

Prozessgeregeltes Mikrodosieren hochviskoser Klebstoffe

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Markus Wiedenhöfer
aus Hechingen

Hauptberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof.E.h. Dr.-Ing.E.h. Dr.h.c.mult. E. Westkämper
Mitberichter:	Univ.-Prof. Dr.rer.nat. H. Kück
Tag der Einreichung:	30.01.2008
Tag der Prüfung:	27.11.2008

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2009

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath

Markus Wiedenhöfer

**Prozessgeregeltes
Mikrodosieren hochviskoser
Klebstoffe**

Nr. 482

Dr.-Ing. Markus Wiedenhöfer

Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN (10) 3-939890-43-X, ISBN (13) 978-3-939890-43-0

Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost-Jetter Verlag, Heimsheim 2009.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt den Leitern des Instituts, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl, für die Unterstützung und Förderung, die zum erfolgreichen Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Herrn Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Heinz Küick danke ich für die Übernahme des Mitberichts und die eingehende Durchsicht der Arbeit.

Aus dem Kreis der Kolleginnen und Kollegen des Instituts, die mich durch ihre Mitarbeit und konstruktive Kritik unterstützt haben, möchte ich im besonderem Maße Herrn Dr.-Ing. Tobias Gaugel, Herrn Dr.-Ing. Stefan Schmid, Herrn Dipl.-Ing. Christof Weis, Herrn Dipl.-Ing.(FH) Kristijan Koncalovic und Herrn Dipl.-Ing.(FH) Stefan Rapp hervorheben.

Herzlich danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mir stets mit viel Verständnis und Unterstützung zur Seite standen.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern für die stete Förderung und Aufmunterung. Ihnen soll dieses Buch deshalb gewidmet sein.

Stuttgart, Februar 2009

Markus Wiedenhöfer

Inhaltsverzeichnis

0	Formelzeichen	12
1	Einleitung	17
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	17
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	19
2	Stand der Technik	21
2.1	Begriffsdefinitionen	21
2.2	Kleben in der Mikromontage	23
2.2.1	Abgrenzung des Produkt- und Klebstoffspektrums	23
2.2.2	Anforderungen bei der Applikation hochviskoser Klebstoffe	24
2.3	Ist-Zustand bei der Klebstoffapplikation	27
2.3.1	Verfahren zur Klebstoffapplikation	27
2.3.2	Verfahren zum Dispensen hochviskoser Klebstoffe	29
2.3.3	Verfahren zur Regelung von Dosierprozessen	32
2.4	Folgerungen aus dem Stand der Technik und Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten	35
3	Grundlagen	37
3.1	Grundlagen zu Zeit-Druck Dosierprozessen	37

3.1.1	Parameterbezogene Grundlagen	37
3.1.2	Komponentenbezogene Grundlagen	39
3.1.3	Modelle zur mathematischen Charakterisierung von Zeit- Druck Dosierprozessen	40
3.2	Grundlagen der Rheologie hochviskoser Klebstoffe	43
3.2.1	Fließverhalten hochviskoser Klebstoffe	43
3.2.2	Einflüsse auf das Fließverhalten hochviskoser Klebstoffe	44
3.2.3	Modelle zur Charakterisierung des Fließverhaltens hochvisko- ser Klebstoffe	47
3.3	Regelungstechnische Grundlagen	48
3.3.1	Linearisierung im Arbeitspunkt	48
3.3.2	Nulldynamik und relativer Grad	50
3.4	Folgerungen aus den Grundlagen	52
4	Entwicklung geregelter Zeit-Druck Dosierprozesse	56
4.1	Entwicklung eines Modells zur Temperaturverlaufsberechnung	56
4.2	Entwicklung eines Modells zur Berechnung des Klebstoffvolumenstroms	63
4.3	Regelungsentwicklung	66
4.3.1	Prozessmodell	66
4.3.2	Regelung des kontinuierlichen Dosierprozesses	67
4.3.3	Regelung des diskontinuierlichen Dosierprozesses	70
4.4	Folgerungen aus den Entwicklungsergebnissen	72
5	Konzeption des Dosierwerkzeugs	74
5.1	Lösungsprinzipien für die Ansteueraktorik	74
5.2	Lösungsprinzipien zur Messgrößenerfassung	76

5.2.1	Druckerfassung	76
5.2.2	Volumenstromerfassung	77
6	Validierung der entwickelten Prozessregelungen	80
6.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Versuchsbedingungen . . .	80
6.2	Vorarbeiten zur Versuchsdurchführung	82
6.2.1	Identifikation der unbekanntenen Modellparameter	82
6.2.2	Bestimmung eines Klebstoffersatzmediums	84
6.2.3	Kalibrierung des Durchflusssensors	86
6.3	Versuchsdurchführung	91
6.3.1	Validierung der kontinuierlichen Dosierprozessregelung	91
6.3.2	Validierung der diskontinuierlichen Dosierprozessregelung . . .	93
6.4	Folgerungen aus den Ergebnissen der Validierungsuntersuchungen . .	96
7	Umsetzung und Erprobung des Pilotwerkzeugs	98
7.1	Aufbau des Pilotwerkzeugs	98
7.2	Ansteuerung des Pilotwerkzeugs	100
7.3	Erprobung des Gesamtsystems	103
8	Zusammenfassung und Ausblick	106
9	Summary	109
10	Literaturverzeichnis	113

Formelzeichen

Lateinische Großbuchstaben

A	$[-]$	Dynamikmatrix
A	$[m^2]$	Fläche
A_K	$[m^2]$	Mantelfläche der Kartusche
A_{Ka}	$[m^2]$	Querschnittsfläche der Kapillare
A_{KaWi}	$[m^2]$	Wandinnenfläche der Kapillare
A_{Kein}	$[m^2]$	Querschnittsfläche des Kartuscheneintritts
A_{konv}	$[m^2]$	konvektiv wärmeübertragende Fläche
A_V	$[mm^2]$	Querschnittsfläche am Ventilschließelement
A_Z	$[m^2]$	Querschnittsfläche der Zuleitung
C	$[m/s^2]$	Integrationskonstante
D_{Klp}	$[mm]$	Durchmesser des Klebstoffpunkts
D_{KL}	$[mm]$	Durchmesser der Klebstofflinie
F_m	$[N]$	magnetische Öffnungskraft
F_p	$[N]$	Druckkraft
F_R	$[N]$	Reibungskraft
F_s	$[N]$	Strömungskraft
F_T	$[N]$	Trägheitskraft
K_P	$[-]$	Verstärkungsfaktor des Reglers
K_V	$[Pa/V]$	Verstärkungsfaktor des Ventils
M_i	$[ml/h; \mu l; nl]$	Messwert

\bar{M}	[ml/h; μ l; nl]	Messwertmittel
\dot{Q}	[W/s]	Wärmestrom
\dot{Q}_{KU}	[W/s]	Wärmestrom zwischen Klebstoff und Umgebung
\dot{Q}_{LU}	[W/s]	Wärmestrom zwischen Luft und Umgebung
\dot{Q}_{LKI}	[W/s]	Wärmestrom zwischen Luft und Klebstoff
R_{Ka}	[m]	Kapillarenradius
T_I	[s]	Zeitkonstante des Reglers
T_V	[s]	Zeitkonstante des Ventils
U	[V]	elektrische Sensorausgangsspannung
U_{KV}	[J]	innere Energie des Kontrollvolumens
V	[m ³]	Volumen
V_{Gb}	[m ³]	Gasblasenvolumen
V_{ges}	[m ³]	Gesamtvolumen
V_{Klp}	[mm ³]	Klebstoffpunktvolumen
V_L	[m ³]	Luftvolumen
V_{Nt}	[m ³]	Nachtropfvolumen
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
\dot{V}_{KI}	[m ³ /s]	Volumenstrom des Klebstoffs
\dot{W}_t	[W/s]	technische Arbeit

Lateinische Kleinbuchstaben

a_V	[m ² /bar ²]	Koeffizient der Ventilflächenapproximationsfunktion
a_0	[ml/h]	erster Regressionspolynomkoeffizient
a_1	[ml/h.V]	zweiter Regressionspolynomkoeffizient
a_2	[ml/h.V ²]	dritter Regressionspolynomkoeffizient
b	[-]	Eingangsvektor
c	[N/m]	Federkonstante der Schließelementfeder
c_i	[-]	Viskositätsfunktionsparameter
c^T	[-]	Ausgangsvektor

c_p	[J/kg.K]	spezifische isobare Wärmekapazität
c_v	[J/kg.K]	spezifische isochore Wärmekapazität
d	[N.s/m]	Dämpferkonstante
d_1	[m]	Kartuscheninnendurchmesser
d_2	[m]	Kartuschenaußendurchmesser
e^{kin}	[J/kg]	spezifische kinetische Energie
e^{pot}	[J/kg]	spezifische potenzielle Energie
$f(\vec{x}, u)$	[-]	Zustandsfunktion
f_T	[1/s]	Taktfrequenz
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h	[J/kg]	spezifische Enthalpie
$h(\vec{x})$	[-]	Ausgangsfunktion
h_{Ktp}	[mm]	Klebstoffpunkthöhe
h_{Kts}	[m]	Höhe der Klebstoffsäule in der Kapillare
k_i	[W/m ² .K]	Wärmeübergangskoeffizient
l	[m]	Länge der Kartusche
l_{Ka}	[m]	Länge der Kapillare
l_Z	[m]	Länge der Zuleitung
m	[kg]	Masse
m_L	[kg]	Luftmasse
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom
\dot{m}_{aus}	[kg/s]	austretender Massenstrom
\dot{m}_{ein}	[kg/s]	eintretender Massenstrom
\dot{m}_L	[kg/s]	Luftmassenstrom
n	[-]	Ostwald/deWaele Exponent
p	[bar]	Druck
p_{gM}	[bar]	Druck in der Umgebung der gekrümmten Meniskusoberfläche
p_K	[bar]	Druck in der Kartusche
p_U	[bar]	Umgebungsdruck
p_V	[bar]	Druck im Ventil

p_Z	[bar]	Druck in der Zuleitung
\vec{q}	[-]	Koordinaten der Nulldynamik
r	[-]	relativer Grad
s	[ml/h; μ l; nl]	Varianz
s_K	[%]	Variationskoeffizient
t	[s]	Zeit
u	[V]	Steuergröße
v	[m/s]	Verfahrgeschwindigkeit
$v_x(r)$	[m/s]	Geschwindigkeitsverteilung in der Klebstoffströmung
v_L	[m/s]	mittlere Geschwindigkeit der Luftströmung
\bar{v}_{KI}	[m/s]	mittlere Geschwindigkeit der Klebstoffströmung
x	[m]	Position des Schließelements
\dot{x}	[m/s]	Geschwindigkeit des Schließelements
\ddot{x}	[m/s ²]	Beschleunigung des Schließelements
\vec{x}	[-]	Zustandsvektor
\vec{x}_0	[-]	Zustandsvektor eines Arbeitspunkts
y	[-]	Systemausgang
\vec{z}	[-]	transformierter Zustandsvektor

Griechische Buchstaben

α_i	[W/m ² .K]	Wärmeübergangskoeffizient
$\dot{\gamma}$	[1/s]	Scherrate
Δ_m	[ml/h; nl]	maximale Abweichung vom Sollwert
ϵ	[-]	Emissionszahl
η	[Pa.s]	dynamische Viskosität
η'	[-]	scheinbare dynamische Viskosität
η'_{KI}	[-]	scheinbare dynamische Klebstoffviskosität
ϑ	[K]	Temperatur
ϑ_L	[K]	Lufttemperatur in der Kartusche

ϑ_U	[K]	Umgebungstemperatur
ϑ_V	[K]	Temperatur der Luft am Ventil
ϑ_{Wi}	[K]	Temperatur der Kartuscheninnenwand
ϑ_{Wa}	[K]	Temperatur der Kartuschenaußenwand
ϑ_Z	[K]	Lufttemperatur in der Zuleitung
κ	[-]	Polytrophenexponent
λ	[W/K.m]	Wärmeleitfähigkeit
ϱ_{kl}	[kg/m ³]	Dichte des Klebstoffs
ϱ_v	[kg/m ³]	Dichte der Luft am Ventil
σ	[W/m ² .K]	Stefan-Boltzmann Konstante
τ	[N/m ²]	Schubspannung
τ_{Wand}	[N/m ²]	Schubspannung an der Kartuschenwand
\Re	[J/kg.K]	individuelle Gaskonstante

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Mikrosystemtechnik avancierte in den vergangenen 25 Jahren zu einer der Schlüsseltechnologien des beginnenden 21. Jahrhunderts /BMB-04, PRO-02/ und zählt zu den größten Wachstumsmärkten im internationalen Wettbewerb. Die Märkte sowie die gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Mikrosystemtechnik entwickeln sich dynamisch und werden in den kommenden Jahren weiterhin deutlich wachsen. Insgesamt rechnen Analysten mit einem Weltmarktvolumen von zirka 25 Mrd. US \$ im Jahre 2009 ausgehend von 12 Mrd. US \$ im Jahre 2004 /NEX-05, PRO-02/. Dies entspricht mittleren jährlichen Steigerungsraten auf Basis des Weltmarktanteils (in Mrd. US \$) von zirka 16 % per anno für den Gesamtmarkt aller Mikrosysteme /NEX-05/.

Zentrale Wachstumstreiber der Mikrosystemtechnik sind die Branchen IT-Peripherie, Biomedizintechnik, Automobil, Haushalt und Telekommunikation /BOT-03/. Zu den besonders umsatzstarken Produkten gehören unter anderem Druckköpfe für Tintenstrahl drucker, Herzschrittmacher und Beschleunigungssensoren /VDI-04/. Die Integration mikrotechnischer Produkte, wie Beschleunigungssensoren in Fahrzeuge, trägt ferner zur Verbesserung der Funktionalität des Endprodukts und somit zur Erhöhung dessen Wertschöpfungspotenzials bei /VDI-04/.

Das starke Wachstum der Mikrosystemtechnikbranche und der steigende Wettbewerb erhöhen zunehmend den Druck auf Unternehmen, kostengünstigere Produkte unter ständig wachsenden Qualitätsanforderungen herzustellen. In der Massenproduktion von Mikrosystemen kommen häufig spezielle Anlagen zum Einsatz, die sich durch einen hohen Automatisierungsgrad bei gleichzeitig geringer Flexibilität auszeichnen. Die flexible Herstellung von kleinen und mittleren Stückzahlen hingegen weist noch deutliche Defizite auf /BIE-99, GAU-04/. Um Mikrosysteme in kleinen und mittleren Stückzahlen bei gleichbleibender Produktqualität kosteneffizient und reproduzierbar herstellen zu können, ist der Einsatz automatisierter, modularer und flexibler Fertigungs- und Montagesysteme unumgänglich /WES-98/.

Die Erreichung der an Mikrosysteme gestellten Qualitätsansprüche und Kostenziele führt insbesondere bei den für die Mikromontage bedeutendsten Verbindungstechnologien zu erhöhten Anforderungen. Studien zufolge bestimmt die Montage bis zu 80 % der Herstellungskosten von Mikrosystemen /CHO-99/ und beeinflusst signifikant die erzielbare Produktqualität und -zuverlässigkeit /EHR-98, REI-98/. Die Integration geeigneter Sensoren, Aktoren und Prozessoren in die Fügwerkzeuge zur Datenverarbeitung und Prozessregelung, ist eine Herausforderung bei der Entwicklung flexibler Mikromontageanlagen /RAT-04, REI-02/ und verspricht entscheidende Verbesserungen hinsichtlich Flexibilität, Reproduzierbarkeit und Qualität.

Ein zentrales Verfahren zur Herstellung stoffschlüssiger Verbindungen zwischen mikrotechnischen Bauteilen ist das Kleben /BAU-99, HOE-01, ZAE-02/. Annähernd ein Drittel aller Verbindungen in der Mikromontage werden mittels Klebstoffen hergestellt /GAU-03/, die das Verbinden nahezu beliebiger Werkstoffpaarungen ermöglichen /KUH-04/. Typische Anwendungen stellen Kapselungsprozesse elektronischer Komponenten /GUS-01, CHE-02/, Fixierungsprozesse oberflächenmontierbarer Bauteile und die Montage optischer Komponenten dar /GEN-98/. Weitere Anwendungen sind das Erstellen elektrisch leitfähiger Verbindungen für Flachbildschirme oder polytronische Schaltungsträger /BAU-01, GAU-04/.

Die ständig steigenden Anforderungen hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Genau-

igkeit der Klebstoffapplikation machen die Entwicklung neuer Applikationsverfahren /MOE-01, ZAE-02, GAU-04/ und die Integration von Sensorik in bestehende Verfahrensprinzipien notwendig /MAR-00, OTH-04/. Um das Potenzial der Klebstoffapplikationsverfahren in flexiblen Mikromontageanlagen ausschöpfen zu können, ist neben der Optimierung der Fügwerkzeuge hinsichtlich Prozessansteuerung und -überwachung die Leistungsfähigkeit der Peripheriesysteme, speziell der Prozessregelung zu erhöhen.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die für die Mikromontage relevanten Klebstoffapplikationsverfahren zu eruieren, das derzeit industriell relevanteste zu identifizieren und mathematische Zusammenhänge zur Beschreibung des Klebstoffdosierprozesses zu erarbeiten, um auf dieser Grundlage eine Dosierprozessregelung zu entwickeln und ihre Potenziale sowie Grenzen aufzuzeigen.

Die Schwerpunkte der Arbeit sind:

- Das Ableiten von Anforderungen an Klebstoffapplikationsverfahren.
- Die Identifikation des derzeit bedeutendsten Klebstoffapplikationsverfahrens für Anwendungen in der Mikromontage.
- Das Erarbeiten zur Charakterisierung und Regelung des Dosierprozesses notwendiger verfahrensbezogener, rheologischer und regelungstechnischer Grundlagen.
- Die mathematische Modellierung physikalischer Zusammenhänge zur Beschreibung des Dosierprozesses.
- Die Ableitung von Regelgesetzen für den kontinuierlichen und diskontinuierlichen Dosierprozess.

- Die Konzeption von Ansteuerung und Überwachung eines Dosierwerkzeugs zur geregelten Klebstoffdosierung sowie dessen Realisierung.
- Die Programmierung einer Software zur Steuerung des Dosierwerkzeugs.

Ausgehend von der Betrachtung eines repräsentativen Anwendungsspektrums werden die Klebstoffapplikationsverfahren sowie die an sie gestellten Anforderungen untersucht. Aus den Ergebnissen erfolgt die Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten und die Erarbeitung der in Bezug auf die zu entwickelnden Prozessmodelle und Regelgesetze notwendigen Grundlagen.

Mit dem Ziel eine umfassende mathematische Charakterisierung des Dosierprozesses zu erhalten, findet anschließend die Entwicklung von Modellen zur Berechnung der wichtigsten, zu identifizierenden Einflussparameter statt. Darauf aufbauend erfolgt die Ableitung von Regelgesetzen, welche das Dosieren hochviskoser Klebstoffe mit großer Reproduzierbarkeit und Genauigkeit ermöglichen.

Zur Umsetzung der theoretischen Erkenntnisse in einem Dosierwerkzeug werden in morphologischer Vorgehensweise alternative Lösungskonzepte zur Ansteuerung und Überwachung des Dosierwerkzeugs entwickelt, bewertet und die geeignetsten bestimmt.

Experimentelle Untersuchungen dienen abschließend zur Eignungvalidierung der entwickelten Modellgleichungen, Regelgesetze sowie des erarbeiteten Dosierwerkzeugs.

Kapitel 2

Stand der Technik

2.1 Begriffsdefinitionen

Allgemeine Begriffe, die im Zusammenhang mit der Montage- und Fügetechnik verwendet werden, sind in /VDI-90/ und /DIN-03/ erläutert. Die Normen /DIN-81/ und /DIN-94/ enthalten Begriffe und Definitionen zur Regelungstechnik. In dieser Arbeit verwendete Fachbegriffe in Bezug auf Klebstoffe sind in den Normen /DIN-06/ und /DIN-07/ definiert.

Weitere für das Verständnis der vorliegenden Arbeit erforderliche, grundlegende Begriffe werden im Folgenden näher erläutert und eingegrenzt.

Dosieren

Dosieren bezeichnet das exakte Abmessen einer bestimmten Stoffmenge nach Größe und zeitlicher Verteilung. Es kann kontinuierlich durch Erzeugung eines definierten Stoffstroms oder diskontinuierlich durch Zuteilung einer bestimmten Stoffmenge erfolgen. Die dazu notwendigen Teilfunktionen umfassen das Fördern, Messen und Einstellen /VET-94/.

Mikrodosieren

Der Begriff des Mikrodosierens bezeichnet analog dem des Dosierens das exakte Abmessen einer bestimmten Stoffmenge nach Größe und zeitlicher Verteilung. Die

maximalen Fördermengen oder Förderströme liegen jedoch im Mikroliterbereich /GAU-04/.

Dispensen

Das Dispensen beinhaltet das Dosieren und anschließende Applizieren einer bestimmten Stoffmenge auf ein Substrat. Dazu stellt ein Dosiervorgang zunächst eine definierte Stoffmenge nach Größe und zeitlicher Verteilung bereit, die teilweise oder vollständig auf ein Substrat übertragen wird /GOE-05/.

Klebstoff, hochviskoser

Die Viskosität eines Klebstoffs wird grundlegend durch seinen strukturellen Aufbau bestimmt. In Abhängigkeit der wirkenden Kohäsionsmechanismen sind unterschiedliche Viskositätsbereiche unterscheidbar. Unter hochviskosen oder als pastös bezeichneten Klebstoffen werden nichtmetallische Stoffe verstanden, die Füge­teile durch Flächenhaftung und Kohäsion verbinden und im nicht ausgehärteten Zustand Viskositäten größer als 2 000 mPa.s aufweisen /HAB-02/.

Rheologie

Der Begriff Rheologie ist ein Derivat des griechischen Worts rheos - der Fluss, das Fließen oder Strömen. Die Rheologie als Wissenschaft ist ein Teilgebiet der Physik. Sie beschreibt das nicht ideale Fließverhalten von Flüssigkeiten, respektive Deformationsverhalten von Festkörpern unter äußerer mechanischer Belastung /MEZ-00/.

Strukturviskosität

Strukturviskoses oder scherverdünnendes Fließverhalten ist dadurch gekennzeichnet, dass die Scherviskosität von der äußeren Belastung abhängig ist. Die Fließkurven strukturviskoser Medien zeigen deshalb eine abnehmende Kurvensteigung unter zunehmender Belastung /HAR-77/.

Prozessregelung

Der Begriff Prozessregelung stammt aus der Verfahrenstechnik und beschreibt das gezielte Beeinflussen eines Prozesses im Sinne eines geschlossenen Wirkungskreises /LUN-04/.

2.2 Kleben in der Mikromontage

2.2.1 Abgrenzung des Produkt- und Klebstoffspektrums

Prinzipiell ist bei der Herstellung mikrotechnischer Systeme zwischen zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen zu unterscheiden - dem monolithischen und dem hybriden Systemaufbau. Im Gegensatz zu monolithisch auf einem gemeinsamen Substrat aufgebauten Mikrosystemen, setzen sich die hybriden, derzeit marktdominanten Mikrosysteme /HIL-06/ aus verschiedenen, auf einem Träger montierten, Komponenten /VOE-00/ zusammen. Zu Ihnen zählen unter anderem SMT-Bauteile, Dioden, Linsen und mechanische Sensorelemente (siehe Abbildung 2.1).

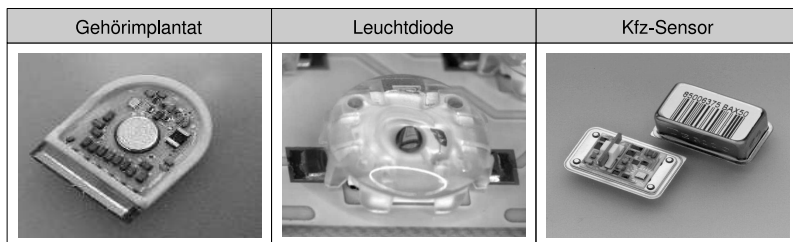


Abbildung 2.1: Beispiele für hybride Mikrosysteme

Die Fixierung und Kontaktierung von Subsystemen hybrider Mikrosysteme erfolgt zunehmend unter Einsatz von Klebstoffen. Andere Technologien wie Schweißen oder Löten ermöglichen es häufig nicht, die mikrotechnischen Komponenten zu verbinden /KLO-03/. In der hybriden Mikromontage werden vorwiegend hochviskose, reaktive Klebstoffsysteme auf Epoxid-, Polyimid-, Silicon- oder Acrylatbasis /HAB-02, ORT-95, OKA-04/ verwendet. Diese können als Ein- oder vorgemischte Zweikomponentensysteme vorliegen. Im Gegensatz zu nicht vorgemischten Klebstoffsystemen bieten sie wesentliche Vorteile in Bezug auf ihre automatisierte Verarbeitbarkeit /WAN-05/. Gegenstand dieser Arbeit sind deshalb ausschließlich hochviskose, chemisch reagierende, in einkomponentiger oder vorgemischter Form vorliegende Klebstoffe.

2.2.2 Anforderungen bei der Applikation hochviskoser Klebstoffe

Das Applizieren von hochviskosen Klebstoffen in Form von Punkten oder Linien ist ein, in der Montage hybrider Mikrosysteme, häufig vorkommender Prozessschritt. Klebstoffe unterschiedlichster Art finden unter anderem zum Schutz und Fixieren optischer Funktionselemente oder zur elektrischen Kontaktierung und mechanischen Befestigung von elektronischen Bauelementen auf Schaltungsträgern Verwendung /LEW-03/. Die Herstellung der hierzu erforderlichen Strukturen stellt differierende Ansprüche an Reproduzierbarkeit und Genauigkeit des Applikationsprozesses.

In Abhängigkeit von Klebstoff und Substrat werden sehr kleine Volumina im Sub-Nanoliter Bereich /GOE-05, GES-97/, Volumina zwischen ein und zehn Nanolitern /MAA-96/ oder auch von mehreren Mikrolitern gefordert /SCH-98, GEN-98-1/. Diese stark differierenden Angaben zeigen, dass das zu applizierende Volumen beziehungsweise der zu applizierende Volumenstrom unmittelbar von der Montageaufgabe abhängig ist, was eine einheitliche Analyse erschwert.

Die bei der Applikation von Klebstoffpunkten in der hybriden Mikromontage gestellten Anforderungen sind am Beispiel von oberflächenmontierbaren Bauteilen aufzeigbar, die beispielsweise auf keramische Schaltungsträger montiert werden.

Aufbauend auf der Kenntnis der SMT-Widerstandsbaureihen, respektive ihrer Abmessungen /MAR-98/, ist die Spezifizierung der aufzubringenden Volumina möglich. Ein in /NES-99/ vorgestellter Ansatz

$$V_{Klp} = \frac{1}{4} D_{Klp}^2 h_{Klp} \quad (2.1)$$

mit:

D_{Klp} = Durchmesser des Klebstoffpunkts [mm]

h_{Klp} = Höhe des Klebstoffpunkts [mm]

V_{Klp} = Volumen des Klebstoffpunkts [mm³]

erlaubt die Berechnung der zu applizierenden Klebstoffvolumina unter der Annahme, dass sich nach der Montage des SMT-Widerstands ein zylindrischer Tropfen im

Hohlraum zwischen Widerstand und Leiterplatte bildet. Die Volumina folgen somit aus den für Leiterplatte und Widerstand gemäß der Konstruktionsvorschrift gültigen geometrischen Daten. Sie stellen Maximalwerte dar und können sich in Abhängigkeit der Genauigkeit des Mikromontagesystems noch dezimieren /MAR-98-1/.

Abbildung 2.2 zeigt die nach /NES-99/ bestimmten maximal beziehungsweise minimal zulässigen Auftragsvolumina für verschiedene SMT-Widerstandsbaureihen.



	1206	0805	0603	0402	0201
Bauelementlänge [mm]	3,05 – 3,35	1,85 – 2,15	1,45 – 1,75	0,95 – 1,05	0,55 – 0,65
Bauelementbreite [mm]	1,4 – 1,6	1,05 – 1,45	0,7 – 0,9	0,45 – 0,55	0,27 – 0,33
Kontaktflächenabstand [mm]	2,0 – 2,5	1,2 – 1,5	0,8 – 1,0	0,5 – 0,6	0,26 – 0,30
Kontaktflächendicke [mm]	0,08 – 0,13	0,08 – 0,13	0,08 – 0,13	0,08 – 0,13	0,08 – 0,13
Maximaler Klebstoffpunktdurchmesser [mm]	1,33	0,80	0,53	0,33	0,17
Maximales Auftragsvolumen [nl]	35,38	12,80	5,62	2,18	0,58
Minimales Auftragsvolumen [nl]	11,79	4,27	1,87	0,73	0,19
Variationskoeffizient [%]	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33
Applikationsvolumenreduktion [%]	–	64	84	94	98
Bauelement, Montage- mit Klebstoffauftragsbereich	Bauelement 		Montagebereich 		

Abbildung 2.2: Zur Fixierung von Bauelementen verschiedener SMT-Widerstandsbaureihen benötigte Klebstoffvolumina

Die seit etwa 1980 andauernde Miniaturisierung der in Abbildung 2.2 gegenübergestellten SMT-Widerstandsbaureihen führt dazu, dass sich die aufzutragenden Volumina

mina um zirka 98 % - ausgehend von 35 nl auf 0,6 nl - reduziert haben. Diese Tatsache bedingt, dass heute völlig neue Anforderungen an Klebstoffapplikationsverfahren gestellt werden /DIX-97/, und ein breites Spektrum diskreter Klebstoffvolumina bei geringer Prozessstreuung zu applizieren ist.

Die Präzisierung von an die linienförmige Klebstoffapplikation gestellten Anforderungen kann an repräsentativen Beispielen hybrider optischer Mikrosysteme wie LEDs oder faseroptischer Bauelemente erfolgen. Dort finden Klebstoffe zur Erfüllung unterschiedlichster Funktionen Verwendung, wie der Fixierung von Glasfasern /KLO-98/, dem Abdichten von Gehäusen /LEW-03/ oder der Herstellung wärmeleitfähiger Strukturen zur Abfuhr von Wärme an Kühlkörper /OSR-06/. Zur Realisierung dieser verschiedenen Zielsetzungen werden Klebstofflinien mit Breiten von zirka 90 bis 250 μm auf ein Substrat aufgebracht, die maximale laterale Abweichungen von 20 μm aufweisen dürfen. Anhand der genannten Werte und der in /RAZ-95/ vorgestellten Approximationsbeziehung

$$D_{KL} = \sqrt{\frac{\dot{V}_{KI}}{\pi v}}, \quad (2.2)$$

mit:

$$\begin{aligned} D_{KL} &= \text{Durchmesser der Klebstofflinie [m]} \\ \dot{V}_{KI} &= \text{Klebstoffvolumenstrom } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \\ v &= \text{Verfahrensgeschwindigkeit } \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \end{aligned}$$

ergeben sich die minimal sowie maximal pro Zeiteinheit zu applizierenden Volumenströme, unter Voraussetzung einer gemäß /CHE-02/ typischen Maschinenverfahrensgeschwindigkeit von 3 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$, zu 1,5 $\frac{\text{ml}}{\text{h}}$ beziehungsweise 24 $\frac{\text{ml}}{\text{h}}$.

Aus den vorstehenden und den Abbildung 2.2 entnehmbaren Zahlenwerten sind unmittelbar die maximal zulässigen relativen Prozessstreuungswerte ableitbar. Die Annahme eines Prozessfähigkeitsindex von 2 und einer Prozessstreuungsbreite von 6σ , die industriell gängige Werte darstellen /JER-98, GOE-05/, ergibt eine maximal zulässige Streuung des Applikationsprozesses für Klebstofflinien von **2,8 %** und für Klebstoffpunkte von **8,3 %**.

2.3 Ist-Zustand bei der Klebstoffapplikation

2.3.1 Verfahren zur Klebstoffapplikation

Eine Betrachtung von Klebstoffapplikationsverfahren legt deren Unterteilung in Druck-, Stempel- und Dispensverfahren nahe.

Die Druckverfahren umfassen den Sieb- /ASH-06, BRE-98, ZAR-97/ und Schablonendruck /LIE-97/, deren Unterscheidungsmerkmal im verwendeten Bildträger für das zu generierende Druckbild liegt. Einseitig ausgesparte und beschichtete Siebe aus Nylon oder Metall beim Sieb-, beziehungsweise entsprechende Metallmasken beim Schablonendruck, dienen zu dessen Erzeugung. Der eigentliche Klebstoffapplikationsprozess ist bei beiden Verfahrenstechniken identisch. Zunächst werden die Siebe, respektive Schablonen, in einen in der Applikationsmaschine vorhandenen Rahmen eingespannt. Anschließend drückt ein Rakel, das über den Bildträger bewegt wird, den Klebstoff durch Sieb oder Schablone auf das Substrat.

Das Stempelverfahren unterscheidet sich dahingehend von den Druckverfahren, dass das Aufbringen des Klebstoffbilds weder Maske noch Schablone erfordert. Es wird durch die Anordnung der Stempel im Werkzeug festgelegt /GIL-97/. Zur Realisierung des Klebstoffübertrags fährt das Stempelwerkzeug zunächst in einen den Klebstoff beinhaltenden Bevorratungsbehälter ein. Bedingt durch die zwischen Stempel und Klebstoff wirksamen Adhäsionskräfte verbleibt nach Beendigung der Gegenbewegung des Stempelwerkzeugs eine gewisse Menge Klebstoff an ihm. Die anschließend erzeugte Berührung zwischen Stempelwerkzeug und Substrat ermöglicht durch erneute Ausnutzung vorhandener Adhäsionswirkungen den Klebstoffübertrag. Bevor das Stempelwerkzeug im nächsten Prozessschritt erneut in das Klebstoffreservoir eintaucht, wird die Klebstoffoberfläche durch eine Rakelbewegung geglättet, um eine bessere Reproduzierbarkeit der Klebstoffaufnahme zu erzielen.

Analog zu den Stempelverfahren unterscheiden sich auch die Dispensverfahren gravierend von den Drucktechniken. Die Applizierung des Klebstoffs erfolgt mittels Dispenswerkzeugen, deren Charakteristika eine Aktorik zum Klebstoffaustrag und

ein vorhandenes oder anbringbares Klebstoffreservoir sind. Neben den bestehenden Gemeinsamkeiten existieren jedoch auch signifikante Unterschiede zwischen den Dispensverfahren, die eine Unterscheidung in berührende und berührungslose erfordern. Berührende Dispensverfahren machen sich die Ausbildung einer fluidischen Brücke zwischen Dosierkapillare und Substrat zu Nutzen. Dazu wird der Klebstoff zunächst durch eine Aktorik kontinuierlich oder diskontinuierlich vom Vorratsbehälter in Richtung Kapillare gefördert (Dosieren). Nach seinem Austritt bildet er einen sogenannten Meniskus an der Kapillarenöffnung aus. Durch Aufsetzen des Klebstoffmeniskus auf das Substrat und die wirkenden Adhäsionsmechanismen erfolgt sein Übertrag (Applizieren). Diese Vorgehensweise ist jener der Stempelverfahren sehr ähnlich, unterscheidet sich aber insofern, dass die Kapillare im Gegensatz zum Stempel das Substrat nicht berührt und die Dosiergeometrie nicht maßgeblich durch das gebrauchte Werkzeug festgelegt ist.

Berührungslose, diskontinuierlich fördernde Dispensverfahren hingegen benötigen keine Ausbildung einer fluidischen Verbindung zwischen Dispenswerkzeug und Substrat zur Klebstoffapplikation. Eine geeignete Aktorik übt in einer kurzen Zeitspanne eine Kraft auf den sich in einer Kammer befindlichen Klebstoff aus. Hervorgerufen durch die zur Kammerentleerung notwendige Kraftwirkung wird der Klebstoff beschleunigt und in Richtung Substrat geschleudert. Dort verbleibt er in Form eines liegenden Tropfens und breitet sich in Abhängigkeit seiner Benetzungsfähigkeit und der wirksamen Oberflächenspannungen aus.

Neben den beschriebenen industriell gängigen und erprobten Verfahren existiert noch ein weiteres. Es handelt sich um ein Verfahren zum Kapselauftrag von Klebstoffen /ZAE-02/. Dabei wird eine bestimmte Menge Klebstoff in einem als Mikrokapsel ausgeführten Vorratsbehältnis eingeschlossen und mittels eines Pick- & Placevorgangs an die Klebstelle gebracht. Durch die Ausübung einer Kraftwirkung auf die Mikrokapsel wird diese zerstört, der Klebstoff tritt aus dem Reservoir aus und verbleibt analog den Kapselresten auf dem Substrat.

Die Relevanz der einzelnen Verfahren für die Applikation von Klebstoffen in der

SMD-Montage ist Abbildung 2.3 zu entnehmen.

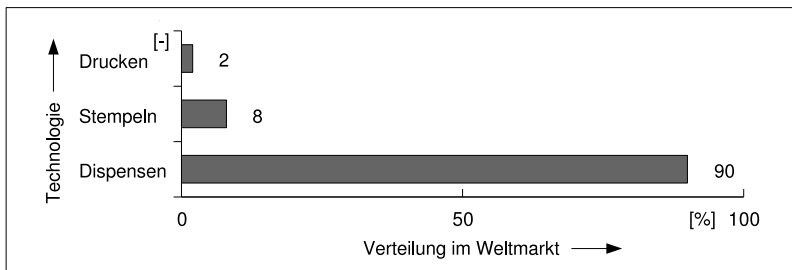


Abbildung 2.3: Relevanz der Klebstoffapplikationsverfahren /MAR-00-1/

Die starke Marktdurchdringung der Dispensverfahren verdeutlicht deren hohen Stellenwert unter den Klebstoffapplikationsverfahren.

2.3.2 Verfahren zum Dispensen hochviskoser Klebstoffe

Die Vielzahl von Dispensverfahren und deren Relevanz für die Klebstoffapplikation legt ihre detaillierte Betrachtung nahe. Eine Übersicht ihrer wichtigsten Eigenschaften enthält Abbildung 2.4.

Die Kategorisierung der berührungslosen Dispensverfahren in volumenverdrängende und druckwellenbasierte ist angesichts der zugrunde liegenden Wirkprinzipien plausibel. Volumenverdrängende Verfahren nach dem Jet-Ventil Prinzip nutzen die durch eine Kraftwirkung erzeugte Geometrieänderung der Bevorratungskammer zur Tropfenablösung am Ende des Förderkanals. Das vom Dispenser ausgebrachte respektive applizierte Volumen ist damit proportional zur erzeugten Volumenreduktion des Klebstoffreservoirs.

Im Gegensatz zu den volumenverdrängenden Dispensverfahren wird bei den auf Druckwellen basierenden Ink-Jet Verfahren nicht die Verminderung des Reservoirvolumens, sondern die durch die Kontraktion bedingte Wellenausbreitung im Medium ausgenutzt. Das Übersteigen der Kohäsionskräfte im Klebstoff aufgrund der her-






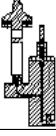
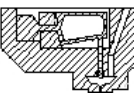
	Prinzipskizze	Übertrag	Förderung		Viskositätsbereich [mPa.s]	Min. Dosiermengen [nl]	Prozessstreuung [%]	Marktdurchdringung [%]
			kont.	diskont.				
Zeit-Druck		berührend	X	X	100 – 100.000	~ 10	> ±10	~ 50
Kolben		berührend	X	X	1 – 100.000	0,2	±4	~ 20
Extruder		berührend	X	X	1.000 – 100.000	~ 10	±4 – ±10	~ 20
Peristaltik		berührend		X	1 – 10.000	~ 2,5	±10	~ 5
Ventil		berührend	X	X	1 – 100.000	~ 100	±5 – ±10	
Jet-Ventil		berührungslos		X	1.000 – 30.000	~ 30	±2 – ±3	~ 5
Ink-Jet		berührungslos		X	50 – 30.000	~ 3	±0,5 – ±2,5	

Abbildung 2.4: Klebstoffdispensverfahren /LEW-99, GOE-05, OTH-05,

SCH-07/

vorgerufenen Kraftwirkung, führt zur Ablösung eines Tropfens am Reservoirende.

Die Gruppe der berührenden Dispensverfahren bedient sich zur Bereitstellung einer bestimmten Klebstoffmenge entweder des Zeit-Druck-, Kolben-, Extruder-, Ventil- oder Peristaltikdosierprinzips.

Dispensverfahren, basierend auf dem Zeit-Druck Dosierprinzip zeichnen sich dadurch aus, dass nach dem Schalten eines pneumatischen Ventils ein Druckimpuls definierter Höhe und Dauer auf das Klebstoffbevorratungsbehältnis wirkt und die Dosiermenge bestimmt. Die so erzeugte Kraftwirkung resultiert in einer Verdrängung des Klebstoffs aus dem Reservoir und bedingt dessen Transport in Richtung Systemaustritt. Zur Erzielung einer vollständigen Entleerung ist ein zusätzlicher beweglicher Stopfen in das Reservoir einzubringen, der Druckluft und Klebstoff trennt.

Kolbendispensverfahren setzen die Bewegung eines elektrisch oder pneumatisch angetriebenen Kolbens zur Dosierung ein. Dieser wird in Abhängigkeit der konstruktiven Ausführung entweder unmittelbar in das Klebstoffreservoir oder in einen Zwischenspeicher eingeführt. Der in Vorschubrichtung des Kolbens zurückgelegte Weg und die geometrischen Verhältnisse des Reservoirs bestimmen das dosierte Volumen. Dadurch ist das Verfahren nahezu unabhängig von der Klebstoffrheologie und als volumetrisch einstuftbar.

Extrusionsdispensverfahren auf der Basis von Rotationsschnecken nutzen die Drehung einer Extruderschnecke zur Klebstoffdosierung. Gangtiefe, Flankensteigung und Umdrehungszahl der Extruderschnecke legen die Dosiermenge fest. Durch eine zusätzliche Beaufschlagung des Vorratsbehälters mit Druck ist der Förderprozess, falls der Klebstoff dies erfordert, unterstützbar.

Auf dem Peristaltik-Prinzip fußende Dispensverfahren bedienen sich einer definierten Sequenz von Öffnungs- und Schließvorgängen von Membranen, die auf Kammern wirken. Durch ihre geometrischen Verhältnisse und die maximal erzielbare Membranverformung ist die Dosiermenge determiniert. Bei Verwendung von mindestens zwei Kammern fungiert die erste als Einlass- und die letzte als Auslassventil.

Ventil-Prinzip Dispensverfahren benötigen ein elektrisch oder pneumatisch betätig-

tes Dosierventil sowie ein unter Druck stehendes Klebstoffreservoir zur Klebstoffförderung. Der auf das Reservoir wirkende Druck führt zu einem Strömungsvorgang zwischen Reservoir und Ventil. Bei geöffneter Ventilstellung fließt der Klebstoff in Richtung Systemaustritt. Ist das Ventil geschlossen, wird der Ausströmvorgang verhindert. Ergo bestimmen die Ventilöffnungszeit und der anliegende Druck maßgeblich die Dosiermenge.

2.3.3 Verfahren zur Regelung von Dosierprozessen

Aufgrund der besonderen Bedeutung der Dosierprozesse für die innerhalb eines Dispensprozesses erzielbare Reproduzierbarkeit und Genauigkeit sind bereits einige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bekannt, die sich mit Regelungsverfahren für Zeit-Druck- und Kolbendosierprozesse beschäftigen /RAZ-93, WES-95, GRU-00, MAR-00, CHE-02, OTH-05/. Sie verfolgen das Ziel, die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Dispensprozesse durch die Regelung der Dosierprozesse zu steigern. Eine Gegenüberstellung durchgeführter Untersuchungen enthält Abbildung 2.5.

	RAZ-93	WES-95	GRU-00	MAR-00	CHE-02	OTH-05
Messgrößen	D_{KL}	D_{Klp}	\dot{V}_{KI}	p, ϑ	m_{KI}	p
Sensorik	Kamera/ LED	Kamera/ Druck- sensor	Durchfluss- sensor	Druck-/ Temperatur- sensor	Waage	Druck- sensor
Regelgrößen	\dot{V}_{KI}	V_{Klp}	\dot{V}_{KI}	V_{Klp}, \dot{V}_{KI}	V_{Klp}, \dot{V}_{KI}	\dot{V}_{KI}
Sollwerte	26 000 ml/h	200-5000 nl	18 000 ml/h	–	27,4 ml/h 560 μ l	–
Reglertyp	P, PI prädiktiv	PI	PI	I	offline Berechnung	–

Abbildung 2.5: Merkmale bekannter Verfahren zur Regelung von Zeit-Druck und Kolbendosierprozessen

In /RAZ-93/ sind Untersuchungen zur linienförmigen Klebstoffapplikation mit Zeit-Druck Dispenssystemen für Volumenströme bis zu $21\,600 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ zu finden. Bei den zur Dosierprozessregelung eingesetzten Reglern handelt es sich um Proportional-, Proportional-Integral- und prädiktive Regler. Ihre Parameterfindung erfolgt auf Basis eines experimentell gewonnenen Systemmodells. Vom prädiktiven Regelungsverfahren abgesehen erwies sich allerdings keines als geeignet. Der Grund dafür ist in bleibenden Regelabweichungen (P-Regler) oder Instabilitäten (PI-Regler) aufgrund von Prozesstotzeiten, hervorgerufen durch Kamerasysteme, zu suchen.

Ähnliche Untersuchungen, bei denen allerdings der Klebstoffvolumenstrom anhand eines Durchflusssensors erfasst wird, sind in /GRU-00/ zu finden. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Anwendungen in der hybriden Mikromontage, bei denen Volumenströme der Größenordnung von wenigen Mikrolitern im Vordergrund stehen /GAU-04/, ist jedoch nicht gegeben.

Umfangreiche Untersuchungen zur Reduktion der Prozessstreuung bei Zeit-Druck Dosierprozessen sind in /WES-95/ zu finden. Als Regelgröße dient die Querschnittsfläche des auf dem Substrat befindlichen Klebstoffpunkts. Ihre Bestimmung erfolgt nach Aufnahme des Klebstoffpunkts mit einer CCD-Kamera anhand geeigneter Software. Die gemessenen Punktdurchmesser entsprechen Dosiermengen zwischen 200 nl und 5 μl . Bei Abweichungen vom geforderten Durchmesserwert werden Höhe und Dauer des Dosierdruckimpulses automatisch korrigiert. Ein Proportional-Integral Regler, zu dessen Parameterfindung ein experimentell ermitteltes Prozessmodell dient, stellt deren Einhaltung sicher. Inakzeptable Dosieraussetzer oder Über- beziehungsweise Unterdosierungen erwiesen sich aber selbst unter Einsatz von Fuzzy-Logik und neuronalen Netzen zur Fehlerdetektion als unvermeidbar.

Das in /CHE-02/ vorgestellte Regelungsverfahren für Zeit-Druck Dosierprozesse nutzt das Model-Updating. Dabei wird ein mathematisches Modell des Dosierprozesses kontinuierlich oder periodisch, anhand des Kartuschenluftvolumens respektive des Druckniveaus in der Kartusche, an den realen Prozess adaptiert. Die Reglereinstellung erfolgt anschließend auf Basis der angepassten Modellgleichungen. Das

angegebene Prozessmodell ist allerdings nicht vollständig. Berechnungsvorschriften zur Bestimmung der Temperaturverläufe sind obsolet und die nichtlinearen Fließigenschaften des Klebstoffs finden in den Gleichungen zur Berechnung des Klebstoffvolumenstroms keine Berücksichtigung. Dennoch ermöglicht diese Vorgehensweise die reproduzierbare Dosierung von Volumenströmen und Volumina in der Größenordnung von $27 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ beziehungsweise $560 \mu\text{l}$.

Die in der Patentschrift /MAR-00/ vorgestellte Vorgehensweise zur Regelung des Zeit-Druck Dosierprozesses ist jener von /CHE-02/ sehr ähnlich. Es erfolgt ebenfalls eine Erfassung der Temperatur- und Druckniveaus in der Kartusche. Auf deren Basis wird, unter Einbeziehung des Kartuschenfüllstands und des Klebstofffließverhaltens, die optimale Höhe und Dauer des als Stellgröße fungierenden Druckimpulses ermittelt.

Die Arbeit von /OTH-05/ enthält einen Ansatz zur Regelung des kontinuierlichen Klebstoffaustrags für einen Kolbendosierprozess. Dazu ist ein Drucksensor in die Kolbenspitze des Dosierers integriert, der in direktem Kontakt zum Klebstoff steht. Zur Gewährleistung eines konstanten Volumenstroms wird der auf den Klebstoff wirkende Druck während der Dosierdauer konstant gehalten.

Außer den Genannten sind keine Ansätze zur Regelung von Dosierprozessen bekannt. Eine durchgängige Überwachung aller Prozessparameter, insbesondere des Volumenstroms, erfolgt bei keinem der für Anwendungen in der hybriden Mikromontage relevanten Ansätze. Ein automatischer Prozessablauf, der gleichzeitig eine hohe Dosiergenauigkeit sicherstellt, ist aber nur dann realisierbar, wenn alle Prozessgrößen permanent erfassbar sind /WES-95/. Als ebenfalls obsolet erweisen sich vollständige mathematische Modelle zur Beschreibung der Dosierprozesse, die zur Reglerauslegung herangezogen werden können.

2.4 Folgerungen aus dem Stand der Technik und Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten

Der Stand der Technik zum Applizieren hochviskoser Klebstoffe in der hybriden Mikromontage ist gekennzeichnet durch folgende Merkmale:

- Den Dispensverfahren kommt unter allen Klebstoffapplikationsverfahren die größte Bedeutung zu.
- Das Zeit-Druck Dispensverfahren ist aus Sicht der Marktdurchdringung das derzeit bedeutendste Verfahren. Der zugehörige Dosierprozess weist aber Prozessstreuungen größer 10 % auf, was in /WES-06/ für ein hochviskoses Öl des Typs SHC 639 bestätigt wird.
- Keines der aufgeführten Verfahren zur Regelung des Zeit-Druck Dosierprozesses gewährleistet konstante, kontinuierlich geförderte Dosiervolumenströme kleiner $27 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ und konstante, diskontinuierlich geförderte Dosiervolumina kleiner 200 nl.
- Es existieren keine mathematischen Modelle, die eine vollständige Charakterisierung des Zeit-Druck Dosierprozesses erlauben.
- Durchgängig automatisierte und geregelte Zeit-Druck Dosierwerkzeuge, die alle Prozessparameter erfassen, sind nicht bekannt.

Aufgrund der beschriebenen Erkenntnisse wird der Entwicklungsschwerpunkt in dieser Arbeit ausschließlich auf die Reduktion der Prozessstreuung von Zeit-Druck Dosierprozessen gelegt.

Dabei steht die Entwicklung von Regelgesetzen im Vordergrund, welche die relative Prozessstreuung, gemessen in Form des Variationskoeffizienten, auf weniger als 2,8 % bei der kontinuierlichen und 8,3 % bei der diskontinuierlichen Förderung reduzieren.

Der Prozessregelung, der Sensorik und dem Dosierwerkzeug kommen im Hinblick auf die Reduktion der Prozessstreuung die größte Bedeutung zu. Zur Erreichung dieses

Ziels sind bis dato fehlende Verfahren zur Berechnung der Temperatur der Kartuschenluft und der Dosiervolumenströme unter Berücksichtigung des nichtlinearen Klebstofffließverhaltens zu entwickeln.

Weiterhin sind Verfahren zur Regelung der kontinuierlichen Förderung von Dosiervolumenströmen und zur diskontinuierlichen Förderung diskreter Dosiervolumina anzugeben sowie Werkzeugprinzipien zur automatisierten und geregelten Dosierung von hochviskosen Klebstoffen mittels Zeit-Druck Dosiersystemen zu konzipieren.

Abgeleitet aus der Ausgangssituation ergeben sich dazu folgende Entwicklungsschwerpunkte:

- Entwicklung eines Modells zur Vorausberechnung des Zeit-Druck Dosierprozesses.
- Entwicklung und Validierung von Prozessregelungen zur kontinuierlichen und diskontinuierlichen Zeit-Druck Dosierung hochviskoser Klebstoffe.
- Konzeption und Realisierung eines Dosierwerkzeugs zur kontinuierlichen und diskontinuierlichen Zeit-Druck Dosierung hochviskoser Klebstoffe.
- Programmierung einer Software zur Steuerung des Dosierwerkzeugs.

Kapitel 3

Grundlagen

3.1 Grundlagen zu Zeit-Druck Dosierprozessen

3.1.1 Parameterbezogene Grundlagen

Das Charakteristikum von Zeit-Druck Dosierprozessen ist, dass nach Freigabe durch ein Ventil Druckluft in ein Bevorratungsbehältnis strömt, in dem sich das zu dosierende Medium befindet, und dieses verdrängt. Durch Variation von Intensität und zeitlichem Verlauf des Druckluftstoßes sind auszubringender Volumenstrom und auszubringendes Volumen veränderbar.

Die im Dosiersystem herrschenden Strömungs- und Druckverhältnisse bestimmen ergo maßgeblich den Ablauf von Zeit-Druck Dosierprozessen. Der vom Druckreservoir in das meist als Kartusche ausgeführte Bevorratungsbehältnis strömende Luftmassenstrom komprimiert bei seinem Eintritt zunächst das bereits vorhandene Luftvolumen /WES-06-1/. Zur Erreichung eines bestimmten Druckniveaus in der Kartusche sind folglich, in Abhängigkeit von deren Füllstand, unterschiedlich lange Kompressionszeiten bei konstanten Eingangsdrukkniveaus erforderlich.

Die Intensität der Kompression ist dabei primär von der kinetischen Energie, der eintretenden Luftmasse sowie dem Widerstand abhängig, der einer Verdrängung des austretenden Mediums entgegenwirkt. Die Dosiermedienviskosität und der Dosier-

kapillarendurchmesser besitzen demnach entscheidenden Einfluss auf die im System ablaufenden Kompressionsvorgänge. Aus der Hagen-Poiseuille Gleichung für eine laminare, stationäre Rohrströmung eines inkompressiblen Fluids geht hervor, dass der dem Verdrängungsvorgang seitens des Dosiermediums entgegengesetzte Widerstand linear mit der Viskosität und bei konstantem Volumenstrom umgekehrt proportional zur vierten Potenz des Dosierkapillarendurchmessers steigt. Je höher also die Viskosität des Mediums und je geringer der Dosierkapillarendurchmesser, desto ausgeprägter ist die Kompression der in der Kartusche befindlichen Luftmenge.

Die stoßartige Kompression der Kartuschenluft zieht entsprechend den Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik auch unmittelbar ihre Erwärmung nach sich. Eine Übersicht über die Höhe der zu erwartenden Temperaturänderungen gibt Abbildung 3.1.

	RAZ-93	WES-95	GRU-00	MAR-00	CHE-02	OTH-05
Messgrößen	D_{KL}	D_{Klp}		p, ϑ	m_{KI}	p
Sensorik	Kamera/ LED	Kamera/ Druck- sensor	Durchfluss- sensor	Druck-/ Temperatur- sensor	Waage	Druck- sensor
Regelgrößen	\dot{V}_{KI}	V_{Klp}	\dot{V}_{KI}	V_{Klp}, \dot{V}_{KI}	V_{Klp}, \dot{V}_{KI}	\dot{V}_{KI}
Sollwerte	26 000 ml/h	200-5000 nl	18 000 ml/h	–	27,4 ml/h 560 μ l	–
Reglertyp	P, PI prädiktiv	PI	PI	I	offline Berechnung	–

Abbildung 3.1: Maximalwerte der Kartuschenlufterwärmung aufgrund einmaliger und periodischer Druckluftstöße /SCH-05/

Aus ihr geht hervor, dass das Temperaturniveau in der Kartusche neben dem Druckniveau und der Kartuschenluftmenge ein weiterer zu berücksichtigender Parameter von Zeit-Druck Dosierprozessen ist.

Der Anstieg der Lufttemperatur in der Kartusche bedingt zwei Wärmeströme, einen in die Umgebung und einen zweiten in den Klebstoff gerichtet. In Abhängigkeit von Höhe und Wirkdauer der Temperaturdifferenz sowie der Wärmeleitfähigkeiten verändert sich folglich die Temperatur des Klebstoffs. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass dieser sich nicht gleichmäßig erwärmt, sondern Temperaturdifferenzen innerhalb des Klebstoffs auftreten. Die lokale Erwärmung an der Berührungsstelle von Luft und Klebstoff ist dabei deutlich ausgeprägter als jene unmittelbar vor der Dosierkapillare.

Unterschiede in der Prozessführung beeinflussen zudem die Temperatur der komprimierten Luft. Bei einer schnellen Dosierfolge ist mit einer wesentlich höheren Temperatur der Luft in der Kartusche zu rechnen als bei einer langsamen /NGU-04/. Demzufolge führt eine schnellere Dosierfolge aber auch zu einer stärkeren Erwärmung des Klebstoffs und zu deutlicheren lokalen Viskositätsänderungen. Bleiben diese Viskositätsschwankungen unkompensiert, tragen sie zu einer Verfälschung des Dosierergebnisses bei.

3.1.2 Komponentenbezogene Grundlagen

Dosiererergebnisse im Mikroliterbereich werden neben den Prozessparametern ebenso durch die Dosiersystemkomponenten determiniert. Großen Einfluss auf das Dosierergebnis üben die Dosierkapillaren aus /SPR-02/. Das Material sowie die Geometrie der Kapillaren sind dabei entscheidend. Als ideal erweisen sich konische, innenpolierte Kapillaren aus Edelstahl /KEC-99, NOR-97/. Handelsübliche Einwegdosierkapillaren besitzen diese Merkmale meist nicht. Das Gegenteil ist der Fall. Sie weisen strömungstechnisch ungünstige Fließwege und abrupte Querschnittsänderungen auf, die zur Ausbildung von Harztaschen oder der Ansammlung von Luftblasen führen /GES-05/. Zudem sind Abweichungen gegenüber den herstellereigenen Durchmesserangaben zu erwarten /GAU-04/. Eine laminare, stationäre Rohrströmung vorausgesetzt, wirken sich diese gemäß der Hagen-Poiseuille Gleichung überproportional auf den Volumenstrom und damit auf das Dosierergebnis aus.

Überdies ist die zu fordernde Kapillarenreinheit oft nicht gegeben. Aus Untersuchungen von Einwegkapillaren geht hervor, dass Metallspäne, die beim Ablängen entstehen, den Strömungsquerschnitt verengen und die Dosiererergebnisse beeinträchtigen /GAU-04/. Eine exakte Dosierung einer bestimmten Klebstoffmenge unter Verwendung gewöhnlicher, am Markt verfügbarer Einwegkapillaren erscheint ohne weitere Maßnahmen in Bezug auf Prozessüberwachung und -führung nahezu unmöglich.

Additional wirken Dosierfehler, welche auf die zur Klebstoffbevorratung verwendeten Einwegkartuschen zurückgehen /DIX-97/. Eine Vielzahl handelsüblicher Klebstoffe werden dennoch in derartige Reservoirs abgefüllt. Diese preiswert aus Polypropylen im Spritzgussverfahren hergestellten Bevorratungsbehältnisse zeigen nicht zu vernachlässigende radiale und axiale Ausdehnungen in Abhängigkeit des anliegenden Drucks und des Kartuschenfüllstands. Bei 5 cm³-Kartuschen, dem in der hybriden Mikromontage meist verwendeten Kartuschentyp, können sie bis zu 6 µl betragen /OTH-05/. Nachlaufeffekte dieser Größenordnung, hervorgerufen durch eine sprungartige Be- oder Entlastung der Kartuschen, sind als inakzeptabel einzustufen.

3.1.3 Modelle zur mathematischen Charakterisierung von Zeit-Druck Dosierprozessen

Gemäß dem Stand der Technik existieren bereits Modelle zur mathematischen Charakterisierung von Zeit-Druck Dosierprozessen. Der wichtigste Ansatz wird in /CHE-02/ vorgestellt und geht auf Vorarbeiten von /AND-67/ und /YE-92/ zurück.

Die Beschreibung des Druckaufbaus in den Dosiersystemkomponenten erfolgt in /CHE-02/ unter Verwendung eines gewöhnlichen Differenzialgleichungssystems. Zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Systemdrücke werden alle druckluftdurchströmten Dosiersystemkomponenten - das Pneumatikventil, der Schlauch und die Kartusche - betrachtet. Die Beschreibung der Dynamik des Pneumatikventils erfolgt in /CHE-02/ auf der Basis folgender in /YE-92/ vorgestellter Gleichung

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + cx = F_m - F_s. \quad (3.1)$$

Bei Gleichung 3.1 handelt es sich um eine gewöhnliche Differenzialgleichung zweiter Ordnung. Sie ermöglicht die Berechnung der mit x bezeichneten Position des Schließelements für den Pneumatikventilsitz. Die externen am Schließelement angreifenden Kräfte, die magnetische Öffnungskraft F_m und die Strömungskraft F_s bewirken die Positionsänderung. Letzt Genannte ist von dem vor und nach dem Ventilsitz wirkenden Druck abhängig /YE-92/.

Die mathematische Modellierung der Druckverläufe in Zuleitung und Kartusche nimmt /CHE-02/ auf Basis ausführlicher, bei /AND-67/ zu findenden Untersuchungen zur Charakterisierung von Strömungs- und Druckaufbauvorgängen in pneumatischen Übertragungslinien vor. In Anlehnung an die dort angegebenen Beziehungen werden von /CHE-02/ zur Beschreibung des Druckaufbaus in Zeit-Druck Dosiersystemen die Gleichungen

$$\frac{dp_Z}{dt} = \frac{\kappa \Re \vartheta_Z}{A_Z l_Z} (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) \quad (3.2)$$

$$\frac{dp_K}{dt} = -\kappa p_K \frac{1}{V_L} \frac{dV_L}{dt} + \kappa \frac{\Re \vartheta_L}{V_L} \dot{m}_2 \quad (3.3)$$

vorgeschlagen. Die Massenströme \dot{m}_1 und \dot{m}_2 der zuströmenden Luft ergeben sich aus

$$\dot{m}_L = \frac{A p_1}{\sqrt{\vartheta_1}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\Re(\kappa-1)} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}. \quad (3.4)$$

Gleichung 3.4 beschreibt die stationäre Durchströmung einer adiabaten Düse und kann nach /AND-67/ auch als Näherung für ihre instationäre Durchströmung angesetzt werden. Für die Drücke p_1 und p_2 sind entweder der Ventildruck $p_1 = p_V$ und der Zuleitungsdruck $p_2 = p_Z$ oder der Zuleitungsdruck $p_1 = p_Z$ und der Kartuschen- druck $p_2 = p_K$ einzusetzen. In Abhängigkeit vom gewählten Druckverhältnis ist entweder der Massenstrom \dot{m}_1 oder \dot{m}_2 festgelegt. Anhand der Gleichungen 3.1 bis 3.4 ist somit eine umfassende Beschreibung des Druckaufbaus in einem Zeit-Druck Dosiersystem möglich.

Auffällig jedoch ist, dass in den angegebenen Zusammenhängen die Temperaturen der Luft in den jeweiligen Systemteilen lediglich als Parameter auftreten. Gleichungen zu ihrer Bestimmung sind nicht vorhanden. In /AND-67/ wird vorgeschlagen,

sie anhand des im jeweiligen Systemteil wirkenden Drucks unter Annahme polytroper Zustandsänderungen zu berechnen. Damit sind die Temperaturänderungen aber nur eingeschränkt beschreibbar; zu ihrer eingehenden Charakterisierung ist die Aufstellung von Wärmebilanzgleichungen unabdingbar.

Ebenfalls kritisch zu betrachten ist die Berechnung der Schließelementposition des Pneumatikventils. Die Ermittlung der magnetischen Kraft F_m und der Strömungskraft F_s erfordert eine sehr detaillierte Kenntnis von Aufbau und Funktionsweise des betreffenden Ventils. In praxi werden die dazu erforderlichen Kennwerte von den Ventilherstellern häufig nicht zur Verfügung gestellt.

Wesentlich einfacher ist die Angabe einer Beziehung für den Druckaufbau im Pneumatikventil, die lediglich das Ein-/Ausgangsverhalten berücksichtigt und keine explizite Kenntnis der im System ablaufenden Vorgänge verlangt. Gemäß den Angaben von Herstellern derartiger pneumatischer Ventile ist ihr Übertragungsverhalten durch ein Verzögerungsglied zweiter Ordnung charakterisierbar, das häufig im asymptotischen Grenzfall arbeitet oder überkritisch bedämpft ist. Davon ausgehend, kann eine Differenzialgleichung der Form

$$\frac{dp_V}{dt} = -\frac{1}{T_V} (p_V - p_U) + \frac{K_V}{T_V} u \quad (3.5)$$

zur näherungsweisen Beschreibung des dynamischen Ventilverhaltens herangezogen werden. Die Zeitkonstante T_V und der Verstärkungsfaktor K_V sind dem vom Ventilhersteller mitgelieferten Datenblatt entnehmbar.

Des Weiteren ist bei Verwendung von Gleichung 3.4 zur Charakterisierung des Luftmassenstroms im Ventil zu beachten, dass bei Ventilen die Fläche $A = A_V$ unbekannt und von der Position x des Schließelements abhängig ist. Die Kenntnis der Dimension dieser Fläche ist zur korrekten Beschreibung des Verhaltens öffnender und schließender Ventile jedoch Voraussetzung.

Die Tatsache, dass die Position x des Schließelements nach /YE-92/ druckabhängig und die Fläche A_V positionsabhängig ist, ermöglichen aber die Herstellung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Druck und Fläche. In den meisten Fällen spiegelt eine Polynomfunktion zweiten Grades der Form $A_V = a_V p_V^2$ den Zusam-

menhang zwischen Ventilfläche und Schließelementposition korrekt wider /AND-67/. Somit ist der Prozess des Druckaufbaus durch Verwendung der Gleichungen 3.2 bis 3.5 mathematisch beschreibbar.

Die Einbeziehung der Klebstoffströmung in das Prozessmodell erfolgt in /CHE-02/ durch die Gleichung

$$\frac{d\bar{v}_{KL}}{dt} = -\frac{8\eta}{\varrho_{KL}} \frac{1}{R_{Ka}^2} \bar{v}_{KL} + \frac{p_K - p_U}{\varrho_{KL} l_{Ka}}. \quad (3.6)$$

Diese ist zur Berechnung der mittleren Geschwindigkeit \bar{v}_{KL} newtonscher Fluide bei der Durchströmung eines zylindrischen Rohrs heranziehbar. Klebstoffe zeigen jedoch kein newtonsches Fließverhalten, so dass Beziehung 3.6 nur in einem stationären Betriebspunkt des Zeit-Druck Dosiersystems Gültigkeit besitzt. Zur korrekten Beschreibung der Klebstoffströmung müssen die rheologischen Eigenschaften des Klebstoffs in die Modellgleichungen eingehen.

3.2 Grundlagen der Rheologie hochviskoser Klebstoffe

3.2.1 Fließverhalten hochviskoser Klebstoffe

Die Verarbeitung von Polymerschmelzen, zu denen auch die in der hybriden Mikromontage eingesetzten, chemisch reagierenden Klebstoffe zählen, ist wesentlich komplexer als jene mono-molekular disperser Flüssigkeiten. Diese Diskrepanz ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die physikalischen Eigenschaften eines Klebstoffs besonders stark von seinem Aufbau und seiner Zusammensetzung abhängen. Weichmacher, Harze, organische Füllstoffe und weitere Additive, die zur Erzielung bestimmter mechanischer Eigenschaften der Klebung erforderlich sind, beeinflussen maßgeblich das Fließverhalten des Vielstoffgemischs Klebstoff /DUH-94, WIS-80/. Das Fließverhalten des Klebstoffs ist aber im Hinblick auf seine reproduzierbare und genaue Zeit-Druck Dosierung das entscheidende Merkmal /WER-93/. Im Gegensatz zu einfachen Flüssigkeiten, deren Fließverhalten als reinviskos zu betrachten ist und deren Viskosität nur von Druck und Temperatur abhängt, weisen Polymerschmelzen

ein wesentlich komplexeres, von zusätzlichen Einflussfaktoren abhängiges Fließverhalten auf /DOE-02/.

Hohe Molekulargewichte, die bei Klebstoffen zur Erzielung guter Kohäsionseigenschaften einer Klebung unabdingbar sind, finden unmittelbar in den Fließeigenschaften ihren Niederschlag und steigern die Viskosität /BOT-04/. Neben den Molekulargewichten bestimmen weitere Faktoren wie Bindungen innerhalb oder zwischen den Klebstoffmolekülen sowie ihre mechanischen Verschlaufungen das Fließverhalten und führen zu nichtlinearen Viskositätskennlinien /GES-99/. Die Ausrichtung der Moleküle aufgrund mikroskopischer Orientierungsvorgänge in Scher- und Schergradientenrichtung bei äußerer Belastung resultiert in strukturviskos beziehungsweise scherverdünnend bezeichnetem Fließverhalten /MEZ-00/.

Neben der Tatsache, dass die Klebstoffviskosität nicht konstant, sondern eine Funktion der Schergeschwindigkeit ist, treten zusätzlich elastische Verformungsanteile auf /TAN-00/. Dies führt jedoch unmittelbar zur Präsenz eines dreidimensionalen Spannungszustands im Klebstoff, zu jedem Zeitpunkt des Dosierprozesses /MOR-01/. Eine bezüglich der zu entwerfenden Prozessregelung adäquate Modellbildung wird infolgedessen erschwert.

Elastische Verformungsanteile sind jedoch vernachlässigbar /RAZ-95/, da bei einer prozessgeregelten Dosierung, dem durch die Förderung des Klebstoffs hervorgerufenen Druckabfall, und nicht den Dehnströmungseigenschaften des Klebstoffs ein vorrangiges Interesse zukommt. Dadurch reduziert sich der dreidimensionale auf einen eindimensionalen Spannungszustand, welcher die Verwendung skalarer Fließgesetze zur Formulierung des nichtlinearen Viskositätsverlaufs ermöglicht.

3.2.2 Einflüsse auf das Fließverhalten hochviskoser Klebstoffe

Das Fließverhalten hochviskoser Klebstoffe ist neben der Schergeschwindigkeit von fünf weiteren Parametern abhängig: ihrer physikalisch-chemischen Beschaffenheit, der Temperatur, dem Druck, der Zeit sowie elektrischen Feldern /PES-97/.

Unter ihnen stellt die Temperatur allerdings den entscheidenden Parameter dar. Bereits kleine unkompensierte Temperaturschwankungen führen zu Durchflussänderungen /PES-97/. Derartige Schwankungen in der Klebstofftemperatur können in Zeit-Druck Dosierprozessen auf Kartuschenluftherwärmungen, Änderungen der Umgebungsbedingungen, die Dosiersystemkomponenten oder im Klebstoff ablaufende chemische Reaktionen zurückgehen.

Wärmeentwicklung, hervorgerufen durch innere Reibung im Medium, ist insbesondere in der hybriden Mikromontage von Bedeutung. Angesichts der vorwiegenden Verwendung von Klebstoffen hoher Viskositäten und Kapillaren geringer Durchmesser, die hohe Strömungswiderstände bedingen, wird verstärkt Energie beim Durchströmen des Zeit-Druck Dosiersystems dissipiert /SCH-05/.

Bei reaktiven, in Form von vorgemischten Zweikomponentensystemen vorliegenden Klebstoffsystemen treten zudem exotherme Vernetzungsreaktionen zwischen Harz und Härter auf, die zu inneren Wärmequellen führen /HAB-02/. In Abhängigkeit des zeitlichen Ablaufs der einsetzenden chemischen Reaktionen ergeben sich unterschiedliche Viskositätsänderungsszenarien. Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit verzögert auftretender Viskositätsanstiege oder gar einer vorübergehenden Viskositätsminderung /HAB-02/.

Wichtig ist festzuhalten, dass auch während der Topfzeit, die jene Zeitspanne bezeichnet, die zur produktionstechnischen Nutzung eines Klebstoffs zur Verfügung steht /GES-98/, aufgrund auftretender Vernetzungsreaktionen die Viskosität Schwankungen unterliegt. Das Ausmaß der darauf zurückzuführenden Wärmeentstehung ist nur schwer beeinflussbar, da es durch die Reaktionsteilnehmer, die Menge des Klebstoffumsatzes und die Art und Dauer der Durchmischung geprägt ist /HAB-02/. Bezogen auf die Herstellerangabe zur Topfzeit bleibt folglich festzuhalten, dass diese sehr differenziert zu betrachten ist und die angegebene Topfzeit nicht vollständig ausgeschöpft werden kann. Der konkret nutzbare Anteil der angegebenen Topfzeit ist in vielen Fällen experimentell zu bestimmen /GES-05/.

Im Gegensatz zur Temperatur besitzt der Druck nur geringen Einfluss auf die Kleb-

stoffviskosität und ist damit vernachlässigbar. Nach /KUL-86/ ist eine Drucksteigerung von 300 bar mit einer Viskositätserhöhung im Umfang einer Temperaturminderung um 1° C vergleichbar.

Ebenso von untergeordneter Bedeutung und nicht weiter zu betrachten ist der Einfluss von elektrischen Feldern auf die Fließeigenschaften von Klebstoffen. Lediglich spezielle Dispersionen zeigen bei einer Variation der Spannung des sie umgebenden elektrischen Felds eine sich deutlich auswirkende Veränderung ihrer Viskosität /PES-97/.

Abgesehen von der Viskosität existiert eine weitere wesentliche Ursache für Fehler bei der Klebstoffdosierung: im Klebstoff eingeschlossene Gasblasen. Die Vermeidung ihrer Entstehung bei der Abfüllung, durch Ausgasungen oder den Transport ist problematisch /N.N.-91, DIL-01, KEC-99/. Ihre Auswirkungen bei Mikrodosierungen sind allerdings gravierend. Im Gegensatz zur Montage großvolumiger Produkte, bei der Klebstoffdosierfehler infolge mikroskopischer Gasblasen nicht in Betracht zu ziehen sind, führen sie bei der Montage von Mikrobauteilen zu Schwankungen in den Dosiervolumina oder zu vollständigen Dosieraussetzern /N.N.-91, GES-98/. Eine Abschätzung des Über- oder Unterdosierungseffekts, aufgrund der Kompression im Klebstoff vorhandener Gasblasen, wird in /DIL-01/ vorgestellt und ergibt sich zu

$$V_{Nt} = \frac{\pi R_{Ka}^2 p_{gM} V_{Gb}}{\pi R_{Ka}^2 (p_U - \rho_{Kl} g h_{Kls}) + \rho_{Kl} g (V_{Gb} - V_{ges})} \quad (3.7)$$

mit:

- ρ_{Kl} = Dichte [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]
- g = Erdbeschleunigung [$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$]
- R_{Ka} = Kapillareninnenradius [m]
- p_{gM} = Druck in der Umgebung der gekrümmten Miniskusoberfläche [Pa]
- p_U = Umgebungsdruck [Pa]
- h_{Kls} = Höhe der Klebstoffsäule in der Kapillare [m]
- V_{Gb} = Volumen der Gasblase [m³]
- V_{ges} = Gesamtvolumen [m³]
- V_{Nt} = Nachtropfvolumen [m³].

Zur Berücksichtigung der durch Gasblasen hervorgerufenen Effekte bei der Kleb-

stoffdosierung ist die Kenntnis deren Anzahl und Größe notwendig. Hilfreich wären ergänzende Informationen über ihre Verteilung.

3.2.3 Modelle zur Charakterisierung des Fließverhaltens hochviskoser Klebstoffe

Aus der Rheologie sind Modelle zur Beschreibung von schergeschwindigkeits- und temperaturabhängigem Fließ-, respektive Viskositätsverhalten bekannt /KUL-86, BAR-89, PAH-95/. Eine Auswahl von Modellfunktionen, die zur Nachbildung schergeschwindigkeitsabhängiger Klebstoffviskositätseigenschaften bei Vernachlässigung der Nullviskosität heranziehbar sind, zeigt Abbildung 3.2.

	Abbildungsvorschrift	Bemerkungen
Ostwald und deWaele	$\dot{\gamma} = (\eta^{-1} \cdot \tau)^n$	<ul style="list-style-type: none"> • Zweiparametrischer Ansatz • Geschlossene Lösung für einfache Strömungsformen möglich
Steiger und Ory	$\dot{\gamma} = c_1 \cdot \tau + c_2 \cdot \tau^3$	<ul style="list-style-type: none"> • Zweiparametrischer Ansatz • Geschlossene Lösung auch für einfache Strömungsformen nicht möglich
Eyring, Prandtl und Ree	$\dot{\gamma} = c_1 \cdot \sinh\left(\tau/c_2\right)$	<ul style="list-style-type: none"> • Zweiparametrischer Ansatz • Geschlossene Lösung auch für einfache Strömungsformen nicht möglich

Abbildung 3.2: Heuristische Fließgesetze zur Beschreibung von Viskositätskurven strukturviskoser Medien

Als besonders geeignet erweist sich der Potenzansatz von Ostwald/deWaele. Seine Bedeutung zur Modellierung nichtlinearen Viskositätsverhaltens ist auf seine Einfachheit zurückzuführen. Im Gegensatz zu anderen Modellfunktionen, die ebenfalls eine Beschreibung nichtlinearen Viskositätsverhaltens gestatten, besteht bei der Verwendung des Potenzansatzes von Ostwald/deWaele die Möglichkeit eindimensionale Strömungsimpulsgleichungen geschlossen zu integrieren /STR-91/. Aufgrund des-

sen prädestiniert er sich auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei der Entwicklung eines mathematischen Modells der Klebstoffströmung.

Allerdings ist zu beachten, dass der Potenzansatz von Ostwald/deWaele lediglich eine Approximationsfunktion zur Beschreibung realer Viskositätskurven darstellt. Der zur Näherung der Messwerte in das Modell Eingang findende Koeffizient η' und der Exponenten n sind rein rechnerische Größen und repräsentieren nicht unmittelbar rheologische Parameter /MEZ-00/.

Wesentlich komplexer hingegen gestaltet sich die Einbeziehung des Temperaturverhaltens in das mathematische Modell der Klebstoffströmung. Die Rheologie stellt wohl eine Vielzahl verwendbarer Modellierungsansätze wie beispielsweise die Arrheniusbeziehung /KUL-86, BAR-89/ zur Verfügung, welche das temperaturabhängige Stoffverhalten korrekt widerspiegeln. Deren Berücksichtigung in einem Prozessmodell ist allerdings schwierig. Einerseits wäre dazu die bereits in der Kartusche stattfindende prozessbedingte Erwärmung des Klebstoffs, andererseits seine Temperaturänderung durch Energiedissipation auf dem Strömungsweg einzubeziehen.

Analog zu den Temperatureinflüssen sind auch die durch Gasblasen verursachten Veränderungen im Fließverhalten nur schwer im Prozessmodell berücksichtigbar. Damit dennoch eine reproduzierbare und genaue Zeit-Druck Dosierung gewährleistet ist, sind Maßnahmen zur Kompensation beider Einflussfaktoren notwendig.

3.3 Regelungstechnische Grundlagen

3.3.1 Linearisierung im Arbeitspunkt

Das dynamische Verhalten vieler technischer Systeme, so auch jenes des Zeit-Druck Dosierprozesses, wird mathematisch durch nichtlineare Differenzialgleichungen beschrieben. Dieser Umstand erschwert deren regelungstechnische Behandlung jedoch erheblich. In vielen Fällen ist die nichtlineare Systembeschreibung aber durch Vereinfachung der Differenzialgleichungen in eine lineare und zeitinvariante Systembe-

schreibung überführbar. Hierzu ist das System in einem seiner Arbeitspunkte zu linearisieren. Als Arbeitspunkt wird dabei jener Zustand des dynamischen Systems bezeichnet, der nach Beendigung aller Einschwingvorgänge erreicht ist und in dem das System im Folgenden verharren soll.

Für die nachstehenden Betrachtungen wird vorausgesetzt, dass die Beschreibung des realen Systems durch ein nichtlineares Differenzialgleichungssystem mit einer Eingangs- und einer Ausgangsgröße der Form

$$\dot{\vec{x}} = f(\vec{x}, u) \quad (3.8)$$

$$y = h(\vec{x}) \quad (3.9)$$

erfolgt. In den Gleichungen 3.8 und 3.9 bezeichnet \vec{x} den Systemzustandsvektor, u die Steuergröße und y den Systemausgang. Bevor jedoch die eigentliche Linearisierung vorgenommen werden kann, ist zunächst die Menge der möglichen Arbeitspunkte durch Nullsetzen der Beziehung 3.8 zu bestimmen. Daran schließt sich eine Taylorreihenapproximation um einen der ermittelten Arbeitspunkte \vec{x}_0 an. Unter Vernachlässigung von Termen höherer Ordnung geht das System dann in die lineare und zeitinvariante Form

$$\Delta \dot{\vec{x}} = A \cdot \Delta \vec{x} + b \cdot \Delta u \quad (3.10)$$

$$\Delta y = c^T \cdot \Delta \vec{x} \quad (3.11)$$

mit $\Delta \vec{x} = \vec{x} - \vec{x}_0$ über. Die Systemmatrix A beziehungsweise der Eingangsvektor b und der Ausgangsvektor c^T folgen aus den Beziehungen

$$\Delta \dot{\vec{x}} = \frac{\partial f(\vec{x}, u)}{\partial \vec{x}} \cdot \Delta \vec{x} + \frac{\partial f(\vec{x}, u)}{\partial u} \cdot \Delta u \quad (3.12)$$

$$\Delta y = \frac{\partial h(\vec{x})}{\partial \vec{x}} \cdot \Delta \vec{x} \quad (3.13)$$

Nach Transformation des Arbeitspunkts \vec{x}_0 durch Koordinatentranslation in den Ursprung ist das System in der aus der Regelungstechnik bekannten Form

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + bu \quad (3.14)$$

$$y = c^T \vec{x} \quad (3.15)$$

darstellbar. Diese vereinfacht den Entwurf eines Regelkreises erheblich. Die dazu erforderlichen Methoden sind unter anderem in /LUN-04/ dargelegt.

Zur Methode der Arbeitspunktlinearisierung ist anzumerken, dass die so gewonnene Systembeschreibung streng genommen nur für infinitesimal kleine Abweichungen vom Arbeitspunkt Gültigkeit besitzt. Sie ist in der Praxis ausschließlich dann anwendbar, wenn die Abweichungen vom Arbeitspunkt nicht allzu groß sind und das System gegenüber äußeren Störungen bestmöglich im Arbeitspunkt gehalten werden kann /FOE-94/. Mit Blick auf Anwendungen in der Mikrodosiertechnik bedeutet dies in der Konsequenz, dass lediglich kontinuierliche Dosieraufgaben, bei denen der Klebstoffvolumenstrom konstant zu halten ist, unter Verwendung dieser Methodik regelbar sind. Beim diskontinuierlichen Dosieren einer bestimmten Klebstoffmenge hingegen ist, bedingt durch die Prozesscharakteristik, die Methode der Arbeitspunktlinearisierung nicht anwendbar. Während des Prozesses wird eine Vielzahl unterschiedlicher „Arbeitspunkte“ durchlaufen.

3.3.2 Nulldynamik und relativer Grad

Der Begriff der Nulldynamik ist in der nichtlinearen Regelungstechnik von fundamentaler Bedeutung. Das damit verbundene theoretische Konzept kann als eine Verallgemeinerung der Nullstellen von Übertragungsfunktionen linearer Systeme betrachtet werden /SVA-06/. Auf eine Darlegung der Details des Konzepts der Nulldynamik wird an dieser Stelle verzichtet - sie sind beispielsweise /SVA-06/ zu entnehmen.

In /ISI-89/ ist nachstehende Definition der Nulldynamik zu finden:

Definition 1 *Die Nulldynamik beschreibt die interne Dynamik eines Systems für den Fall, dass die Ausgangsgröße $y(t)$ für bestimmte Eingangssignale $u(t)$ und Anfangsbedingungen $\vec{x}(0)$ für alle Zeiten $t \geq t_0$ identisch Null ist.*

Durch Anwendung der Definition auf für diese Arbeit relevante nichtlineare mathe-

matische Systembeschreibungen der Ordnung m der Form

$$\dot{\vec{x}} = f(\vec{x}) + g(\vec{x})u \quad (3.16)$$

$$y = h(\vec{x}), \quad (3.17)$$

folgt die Definition des relativen Grads nach /ISI-95/:

Definition 2 *Der relative Grad eines Systems an einem Punkt \vec{x}_0 ist eine natürliche Zahl r , für die*

- $L_g L_f^k h(\vec{x}) = 0$ für $k = 0, 1, \dots, r - 2$ in einer Umgebung von \vec{x}_0 und
- $L_g L_f^{r-1} h(\vec{x}_0) \neq 0$ gilt.

Diese Definition resultiert aus der Vorgehensweise den Systemausgang y wiederholt zu differenzieren, bis der Systemeingang u unmittelbar auf die y^r -te Ableitung wirkt. Aus der so gewonnenen Beziehung ist das nullende Eingangssignal $u(t)$ bestimmbar. Definition 2 formalisiert diese Vorgehensweise unter Verwendung der Lie-Ableitungen

$$L_f h(\vec{x}) = \frac{\partial h(\vec{x})}{\partial \vec{x}} \cdot f(\vec{x}) \quad \text{und} \quad (3.18)$$

$$L_g h(\vec{x}) = \frac{\partial h(\vec{x})}{\partial \vec{x}} \cdot g(\vec{x}) \quad (3.19)$$

der skalaren Funktion $h(\vec{x})$ entlang der Vektorfelder $f(\vec{x})$ und $g(\vec{x})$.

Mit dem relativen Grad und den Funktionen zu seiner Bestimmung ist auch gleichzeitig die Nulldynamik des Systems festgelegt. Nach /ISI-95/ ist es möglich eine nichtlineare Koordinatentransformation anzugeben, die das nichtlineare System unter Verwendung der Funktionen aus der Bestimmung des relativen Grads und einer geeigneten Vervollständigung in ein System der Form

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ &\vdots \\ \dot{z}_{r-1} &= z_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{z}_r &= a(\vec{z}) + b(\vec{z})u & (3.20) \\
\dot{q}_{r+1} &= q_{r+1}(\vec{z}) \\
&\vdots \\
\dot{q}_m &= q_m(\vec{z})
\end{aligned}$$

überführt.

Das transformierte System 3.20 besteht aus einer Integratorkette der Länge r in den Variablen z_i und $m - r$ nichtlinearen Differentialgleichungen in den Variablen q_i , welche die interne Dynamik kennzeichnen. Diese Systembeschreibung ist als Byrnes-Isidori Normalform bekannt. Unter der Prämisse, dass der Systemausgang y , der dem Zustand z_1 eines in die Byrnes-Isidori Normalform transformierten Systems entspricht, identisch Null ist, beschreiben die Gleichungen der internen Dynamik die Nulldynamik. Für den Spezialfall, dass der relative Grad r und die Systemordnung m identisch sind, existiert keine Nulldynamik des nichtlinearen Systems.

Unter Kenntnis des relativen Grads eines nichtlinearen Systems, seiner Eigenschaften sowie der Eigenschaften der Nulldynamik ist prüfbar, ob die betrachteten Systemgleichungen mittels Verfahren der nichtlinearen Regelungstechnik in ihrem Eingangs-/Zustands- oder Eingangs-/Ausgangsverhalten in einer nicht infinitesimalen Umgebung eines Arbeitspunkts linearisierbar sind. Ist dies der Fall, muss der sich anschließende Reglerentwurf nicht mehr unter Verwendung der nichtlinearen Systembeschreibung erfolgen, sondern ist anhand der neu gewonnen, linearisierten Systembeschreibung vornehmbar. Einen Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Linearisierung nichtlinearen Systemverhaltens durch statische Zustandsrückführungen stellt beispielsweise /ALL-96/ zur Verfügung.

3.4 Folgerungen aus den Grundlagen

Eine Betrachtung der Grundlagen zeigt deutlich, dass verschiedene Einflussparameter die bei der Zeit-Druck Dosierung hochviskoser Klebstoffe erzielbare Reproduzierbarkeit und Genauigkeit beeinflussen. Abbildung 3.3 enthält deren kategorisierte

Gegenüberstellung.

Klebstoffbezogene Einflussparameter	Prozessbezogene Einflussparameter	Komponentenbez. Einflussparameter	Weitere Einflussparameter
<ul style="list-style-type: none"> • Scher- geschwindigkeit • Temperatur • Zeit • physikalisch/ chemische Beschaffenheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Kartuschenluft- druck • Kartuschenluft- temperatur • Kartuschenluft- menge 	<ul style="list-style-type: none"> • Kartuschen- dehnung • Kapillaren- geometrie • Kapillaren- verschmutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Luftblasen • Umgebungs- bedingungen

Abbildung 3.3: Einflussparameter auf Zeit-Druck Dosierprozesse

Zur Kompensation der aufgeführten Einflussparameter sind unterschiedliche Maßnahmen notwendig. Im Zuge einer gesamtheitlichen Prozessregelung ist neben einem adäquaten Prozessmodell auch die Verwendung entsprechender Komponenten zur Prozessüberwachung, eine Vorbereitung des Dosiermediums sowie die Sicherstellung geeigneter Umgebungsbedingungen obligatorisch.

Der Einfluss von Gasblasen auf die erreichbaren Dosierergebnisse ist gemäß Kapitel 3.2.2 signifikant - ihr Einbezug in ein Prozessmodell hingegen gestaltet sich schwierig. Um bei der Prozessmodellgenerierung die Annahme einer konstanten Dichte treffen, und eine weitreichende Beseitigung der Gasblaseneinflüsse auf die Dosierergebnisse gewährleisten zu können, sind die Dosiermedien vor ihrer Verwendung zu entgasen. Ein für Klebstoffe geeignetes Verfahren ist in /GOE-05/ zu finden.

Die Voraussetzung entsprechender Reinraumbedingungen gestattet es weiterhin auftretende Schwankungen in den Umgebungsbedingungen zu kontrollieren, so dass diese bei der Modellbildung des Prozesses als konstant voraussetzbar sind.

Eine Vernachlässigung von Störeinflüssen, hervorgerufen durch Kapillarenverschmutzungen, ist bei der Aufstellung eines Prozessmodells ebenfalls zulässig, wenn entsprechende, vor der Dosierung durchzuführende, Reinigungsmaßnahmen der Kapillaren vorgesehen werden.

Die entsprechend Kapitel 3.2.2 einzubeziehenden, klebstoffbezogenen Einflussparameter, Schergeschwindigkeit, Temperatur, physikalische/chemische Beschaffenheit und Zeit betreffend ist festzuhalten, dass diese ebenfalls nur teilweise in ein Prozessmodell eingehen können. Der Einflussparameter Schergeschwindigkeit ist durch Verwendung des Potenzansatzes von Ostwald/deWaele bei der Modellbildung berücksichtigbar. Die Einflussparameter Temperatur, Zeit und physikalisch/chemische Beschaffenheit dagegen sind nur schwer einzubeziehen. Dennoch ist damit zu rechnen, dass sie indirekt, über Viskositätsänderungen im Klebstoff, Auswirkungen auf das Dosierergebnis besitzen. Auf Viskositätsschwankungen des Klebstoffs kann jedoch durch die Messung des Volumenstroms reagiert werden /WER-93, GRU-00/.

Beeinträchtigungen des Dosierergebnisses aufgrund von Kartuschendehnungseffekten werden durch die Messung von Dosiervolumenstrom beziehungsweise Dosiervolumen sowie deren Regelung unmittelbar minimiert. Durch die Prozessführung, das heißt den permanenten Abgleich zwischen Soll- und Istwert, erfolgt insbesondere bei der diskontinuierlichen Dosierung die Kartuschenentlastung sukzessiv, so dass nur mit geringen Nachlaufeffekten zu rechnen ist.

Einflüsse aufgrund von Durchmesserchwankungen der Dosierkapillaren kann ebenfalls durch eine Messung des Volumenstroms begegnet werden. Durch die Vermessung des Dosierkapillarendurchmessers ist dieser Einflussparameter, falls notwendig, aber auch im Prozessmodell berücksichtigbar.

In Bezug auf das mathematische Modell des Prozesses, welches als Grundlage für den Reglerentwurf dient, bleibt somit festzuhalten, dass es einerseits die prozessbezogenen Einflussparameter Druck, Temperatur und Kartuschenluftmenge widerspiegeln muss, andererseits aber auch der Einflussparameter Schergeschwindigkeit einzuarbeiten ist. Damit wird eine ausreichend exakte Approximation des Zeit-Druck Dosierprozesses möglich. Das daraus hervorgehende Prozessmodell bildet die Basis zur anschließenden Entwicklung geeigneter Regelgesetze.

Im Detail ergeben sich für die in Kapitel 2 angeführten Entwicklungsschwerpunkte

Modellgenerierung und Verfahrensentwicklung folgende zu lösende Problemstellungen:

- Ableitung eines gewöhnlichen Differenzialgleichungssystems zur Beschreibung des Temperaturverlaufs in den Komponenten des Zeit-Druck Dosiersystems.
- Ableitung einer gewöhnlichen Differenzialgleichung zur Beschreibung der schergeschwindigkeitsabhängigen Klebstoffströmung in der Kapillare.
- Entwicklung eines Arbeitspunktreglers zur Regelung der kontinuierlichen Klebstoffdosierung.
- Entwicklung eines Reglers zur Regelung der diskontinuierlichen Klebstoffdosierung.

Kapitel 4

Entwicklung geregelter Zeit-Druck Dosierprozesse

4.1 Entwicklung eines Modells zur Temperatur- verlaufsberechnung

In Anlehnung an die in Kapitel 3.1.3 vorgestellte Modellierung des Druckaufbaus in Zeit-Druck Dosiersystemen werden zur Temperaturverlaufsberechnung ebenfalls gewöhnliche Differenzialgleichungen herangezogen. Diese ermöglichen die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der mittleren Temperaturen in den Dosiersystemkomponenten.

Zur Vereinfachung der mathematischen Modellierung wird im Folgenden jedoch angenommen, dass keine signifikanten Unterschiede der Temperaturniveaus in Zuleitung und Kartusche auftreten. Diese Annahme trifft zu, wenn der Strömungswiderstand am Übergang Zuleitung/Kartusche gering ist, und die Abmessungen der Zuleitung unwesentlich sind. In diesem Fall erfolgt der Druckaufbau im System sehr rasch, so dass nahezu identische Temperaturniveaus in den Komponenten mit geringer zeitlicher Verzögerung erreicht werden.

Die Ermittlung des zeitlichen Temperaturverlaufs in der Kartusche - dem damit

einzig verbleibenden relevanten Teilsystem - erfordert die Aufstellung einer Wärmebilanzgleichung. Das betrachtete Kontrollvolumen wird dabei so gewählt, dass es ausschließlich die in der Kartusche befindliche Luft, nicht aber den Klebstoff beinhaltet (Abbildung 4.1).

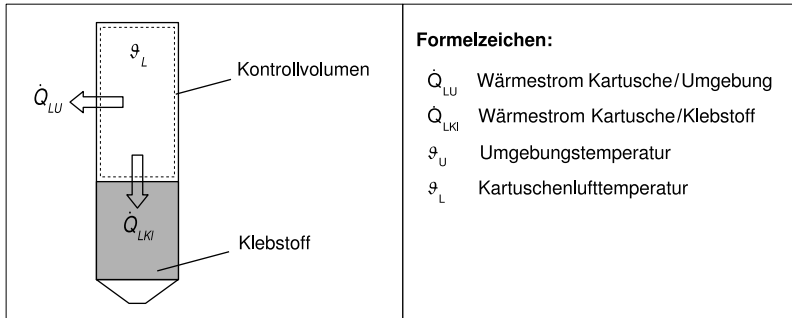


Abbildung 4.1: Wärmebilanz für die Kartuschenluft

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für das dargestellte Kontrollvolumen lautet

$$\dot{Q} + \dot{W}_t = \frac{dU_{KV}}{dt} + \sum_j \dot{m}_j (h_j + e_j^{kin} + e_j^{pot}) - \sum_i \dot{m}_i (h_i + e_i^{kin} + e_i^{pot}). \quad (4.1)$$

Dieser kann durch Berücksichtigung des Umstands, dass am System keine technische Arbeit verrichtet wird und der Einfluss der potenziellen gegenüber der kinetischen Energie aufgrund hoher Strömungsgeschwindigkeiten vernachlässigbar ist, zu

$$\dot{Q} = \frac{dU_{KV}}{dt} - \dot{m}_1 (h_1 + e_1^{kin}) \quad (4.2)$$

vereinfacht werden. Nach Substitution der inneren Energie U durch $m_L c_v \vartheta_L$ und Beachtung der Zeitabhängigkeit von Luftmasse und -temperatur ergibt sich nach Differenzierung

$$\dot{Q} = c_v \frac{dm_L}{dt} \vartheta_L + c_v m_L \frac{d\vartheta_L}{dt} - \dot{m}_1 (h_1 + e_1^{kin}). \quad (4.3)$$

Weiterhin ist die zeitliche Ableitung der Luftmasse durch den eintretenden Luftmassenstrom ersetzbar

$$\dot{Q} = c_v \dot{m}_1 \vartheta_L + c_v m_L \frac{d\vartheta_L}{dt} - \dot{m}_1 (h_1 + e_1^{kin}). \quad (4.4)$$

Vorstehende Gleichung gestattet prinzipiell die Ermittlung des gesuchten Temperaturverlaufs - ihre Umformung ergibt eine Differenzialgleichung für $\vartheta_L(t)$. Allerdings gilt es dabei zu berücksichtigen, dass die spezifische kinetische Energie, die spezifische Enthalpie, der Massenstrom \dot{m}_1 und die Masse m noch unbestimmt sind. Letzt Genannte lässt sich aus dem Massenerhaltungssatz, adaptiert auf den gewählten Kontrollraum

$$\frac{dm_L}{dt} = \dot{m}_{ein} - \dot{m}_{aus} \quad (4.5)$$

bestimmen. Bedingt durch dessen Festlegung kann der austretende Massenstrom $\dot{m}_{aus} = 0$ gesetzt werden. Ferner sind der eintretende Massenstrom \dot{m}_{ein} und der Massenstrom \dot{m}_1 identisch, so dass für die gesamte Luftmasse in der Kartusche

$$m_L = \int_0^t \dot{m}_1 dt \quad (4.6)$$

folgt. Der Luftmassenstrom ist aus Gleichung 3.4 nach Umschreiben auf die Form

$$\dot{m}_L = A_V(p_V) \left(\frac{p_K}{p_V}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_V \varrho_V \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_V}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]} \quad (4.7)$$

bestimmbar. Dadurch sind der gesuchte Massenstrom \dot{m}_1 und die gesuchte Masse m_L unter Einführung zweier neuer Variablen p_V und p_K fixiert. Der Ventildruck p_V ist anhand von Gleichung 3.5 zu berechnen, der Kartuschendruck p_K bleibt weiterhin unbekannt. Eine Option zu seiner Bestimmung ist die konstitutive Gleichung

$$p_K V_L = m_L \Re \vartheta_L \quad (4.8)$$

für ideale Gase. Durch ihre Auflösung nach p_K und ihre Differenzierung nach der Zeit folgt

$$\frac{dp_K}{dt} = \frac{\Re}{V_L} \dot{m}_L \vartheta_L + \frac{\vartheta_L}{dt} m_L. \quad (4.9)$$

Bei Ableitung von Gleichung 4.9 wurde davon ausgegangen, dass das betrachtete Kontrollvolumen zeitlich keiner Veränderung unterliegt. Diese Annahme ist aber nur bedingt, in Abhängigkeit des Prozessverlaufs gültig. Sie trifft dann zu, wenn die Änderung des in der Kartusche befindlichen Luftvolumens gegenüber dem absoluten Wert des Luftvolumens vernachlässigt werden kann. Beim diskontinuierlichen Dosieren von Klebstoffpunkten erweist sich diese Vereinfachung als zulässig, bei einer kontinuierlichen Dosierung hingegen nicht. Dann ist für die Druckänderung die Gleichung

$$\frac{dp_K}{dt} = \left[\frac{(\dot{m}_L \vartheta_L + \frac{\vartheta_L}{dt} m_L) V_L - m_L \vartheta_L \dot{V}_L}{V_L^2} \right] \quad (4.10)$$

zu verwenden, in der auch das Volumen des Kontrollraums als zeitlich veränderlich angenommen wurde. Trifft die Vereinfachung eines konstanten Kontrollvolumens nicht zu, erweitert sich das Differenzialgleichungssystem um zwei Unbekannte, das zeitlich veränderliche Volumen V_L , und die zeitlich ebenso nicht konstante Volumenänderung \dot{V}_L . Diese aber legt die im nächsten Kapitel abgeleitete Beziehung für den Klebstoffvolumenstrom fest. Das Volumen V_L ist damit ebenfalls bekannt und durch Integration von \dot{V}_L unter Berücksichtigung der Anfangsbedingungen berechenbar.

Aufgrund des Faktums, dass die Temperatur im stationären Betrieb des Dosiersystems jedoch als nahezu konstant angesehen werden kann - es finden keine signifikanten Kompressionen statt - und nur zu Beginn des Dosierprozesses ausgeprägte zeitliche Veränderungen im Temperaturverlauf auftreten, wird im Folgenden Gleichung 4.9 als Basis für die weiteren Ableitungen verwendet.

Weiterhin unbestimmt bleiben die spezifische kinetische Energie sowie die spezifische Enthalpie der Luftströmung. Die spezifische kinetische Energie ist durch die Strömungsgeschwindigkeit der Luft

$$v_L = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_V}{\varrho_V} \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}, \quad (4.11)$$

die spezifische Enthalpie durch die Bestimmung der Temperatur der Luftströmung bei ihrem Austritt aus der Düse beziehungsweise ihrem Eintritt in die Kartusche

determiniert. Unter der Annahme, die Kompression in der Düse erfolge schnell und ist in Folge dessen als adiabat zu betrachten, gilt:

$$\vartheta_L = \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \vartheta_V. \quad (4.12)$$

Abschließend bleibt noch der Wärmestrom \dot{Q} , der zwischen Kartuschenluft, Umgebung und Klebstoff ausgetauscht wird, zu berechnen. Alle drei Mechanismen der Wärmeübertragung, die Wärmeleitung, -konvektion und -strahlung können zu dem in toto abgegebenen Wärmestrom beitragen. Der Wärmetransport in der Kartuschenwand, wobei die Kartusche selbst als Hohlzylinder anzusehen ist, wird durch die Beziehung

$$\dot{Q}_{LU} = \frac{2\pi l}{\ln(d_2/d_1)} \lambda_{PP} (\vartheta_{Wi} - \vartheta_{Wa}), \quad (4.13)$$

wiedergegeben, die einen reinen Wärmeleitvorgang beschreibt. Hervorgerufen durch die Wärmeübergänge an den Kartuschenwänden sind weiterhin die konvektiven Anteile

$$\dot{Q}_{LU} = \alpha_1 A_{konv} (\vartheta_L - \vartheta_{Wi}) \quad \text{und} \quad (4.14)$$

$$\dot{Q}_{LU} = \alpha_2 A_{konv} (\vartheta_{Wa} - \vartheta_U) \quad (4.15)$$

zu berücksichtigen. Bis dato uneinbezogen blieb der Beitrag der Wärmestrahlung. Unter der Voraussetzung, das strahlende Element, die Kartusche, sei als grauer Strahler kennzeichenbar, gilt für den in die Umgebung abgestrahlten Wärmestrom

$$\dot{Q}_{KU} = A_K \varepsilon(\vartheta) \sigma \vartheta^4. \quad (4.16)$$

σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante, und ε die von Material und Materialtemperatur abhängige Emissionszahl. Für Kunststoffe im betrachteten Temperaturbereich beträgt sie in etwa 0,9 /HER-07/. Die Vereinfachung, lediglich die Kunststoffkartusche als strahlendes Element zu betrachten, ist zulässig, denn sie kann als strahlungsundurchlässig angenommen werden /BAE-04/.

Ein Größenvergleich der Beiträge aus Wärmekonvektion, -leitung und -strahlung zeigt jedoch, dass der Beitrag der Wärmestrahlung zum abgegebenen Gesamtwärme-

strom gering und somit vernachlässigbar ist. Der Wärmeaustausch zwischen der Kartuschenluft und der Umgebung wird ergo durch Konvektion und Leitung bestimmt. Durch Zusammenfassen der beiden Modellbeziehungen folgt

$$\dot{Q}_{LU} = k_1 A_1 (\vartheta_L - \vartheta_U). \quad (4.17)$$

Den Wärmeübergang zwischen Luft und Klebstoff hingegen prägt ausschließlich der konvektive Anteil

$$\dot{Q}_{LKI} = \alpha_3 A_{konv} (\vartheta_L - \vartheta_{KI}). \quad (4.18)$$

Das analoge Bezeichnen und Zusammenfassen der abgegebenen Wärmeströme zu einem Gesamtwärmestrom führt zu

$$\dot{Q} = -k_1 A_1 (\vartheta_L - \vartheta_U) - k_2 A_2 (\vartheta_L - \vartheta_{KI}). \quad (4.19)$$

Dem Umstand, dass die Wärmeströme aus dem System in die Umgebung oder den Klebstoff gerichtet sind, wurde mittels entsprechender Vorzeichenanpassung bereits Rechnung getragen. Durch Zusammenführung aller angegebenen Beziehungen, die zur Berechnung des Temperaturverlaufs notwendig sind, folgt das Differenzialgleichungssystem

$$\frac{dp_V}{dt} = -\frac{1}{T_V} (p_V - p_U) + \frac{K_V}{T_V} u \quad (4.20)$$

$$\frac{dm_L}{dt} = A_V \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_V \varrho_V \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (4.21)$$

$$\frac{dp_K}{dt} = \frac{A_V \Re}{V_L} \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_V \varrho_V \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \vartheta_L + \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} & \frac{A_V \Re}{V_L c_v} \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_V \varrho_V \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \cdot \\ & \left(c_p \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \vartheta_V + \frac{\kappa}{\kappa-1} p_V \varrho_V \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \right) + \\ & \frac{\Re}{V_L c_v} [k_1 A_1 \vartheta_U + k_2 A_2 \vartheta_{KI} - (k_1 A_1 + k_2 A_2) \vartheta_L] - \\ & \frac{\Re}{V_L c_v} \left(c_v A_V \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_V \varrho_V \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \right) \vartheta_L \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d\vartheta_L}{dt} = & \frac{1}{c_v m_L} A_V \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_V \varrho_V \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} + \quad (4.23) \\
& \frac{1}{c_v m_L} \left(c_p \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \vartheta_V + \frac{\kappa}{\kappa-1} p_V \varrho_V \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \right) + \\
& \frac{1}{c_v m_L} [k_1 A_1 \vartheta_U + k_2 A_2 \vartheta_{Kl} - (k_1 A_1 + k_2 A_2) \vartheta_L] - \\
& \frac{A_V}{c_v m_L} \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} p_V \varrho_V \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \vartheta_L
\end{aligned}$$

zur Bestimmung der Temperaturverläufe der Kartuschenluft unter der Annahme einer vernachlässigbaren Volumenänderung des Kontrollvolumens.

Abbildung 4.2 stellt einen auf Basis vorstehender Gleichungen berechneten sowie einen in Vorversuchen gemessenen Temperaturverlauf gegenüber. Die Ermittlung des Temperaturmesssignals erfolgte nach mittigem Einbringen eines Thermoelements in eine leere, an ihrem Ende verschlossene 10 cm³ Kartusche durch deren sprunghafte Belastung mit 1,5 bar Überdruck. Aus ihr geht hervor, dass die Temperaturände-

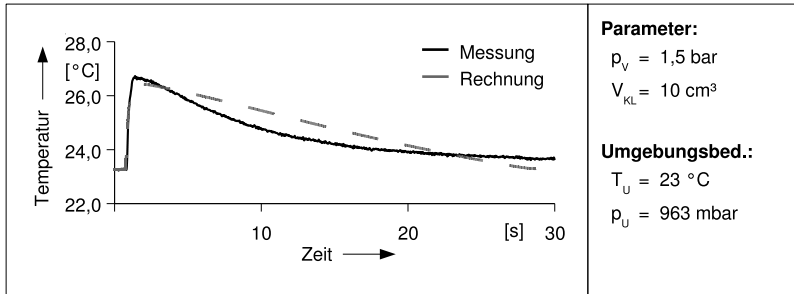


Abbildung 4.2: Vergleich zwischen berechnetem und gemessenem Verlauf der Lufttemperatur in der Kartusche

rungen in der Kartusche mit ausreichender Genauigkeit durch das Differenzialgleichungssystem 4.20 bis 4.23 berechenbar sind. Die Ergebnisse zeigen ebenso den vorausgesetzten raschen Anstieg des Temperaturniveaus in der Kartusche, wodurch die

eingangs getroffenen Annahmen bestätigt werden.

4.2 Entwicklung eines Modells zur Berechnung des Klebstoffvolumenstroms

Die mathematische Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Klebstoffströmung in der Dosierkapillare wird analog jener der Druck- und Temperaturzeitverläufe ebenfalls in Form gewöhnlicher Differenzialgleichungen durchgeführt. Hierzu ist zunächst die Kräftebilanz an einem, aus der Kapillare herausgeschnittenen, Kontrollelement aufzustellen. Zur Modellgenerierung wird die Kapillare als gerades Rohr mit dem Durchmesser D_{Ka} , respektive Radius R_{Ka} , der Länge l_{Ka} und der Klebstoff als inkompressibles Fluid mit der zeitlich konstanten Dichte ϱ_{Kl} idealisiert. Die Hypothese einer konstanten Fluidichte ist durch die geforderte Klebstoffentgasung gerechtfertigt. Das freigeschnittene Kontrollelement zeigt Abbildung 4.3.

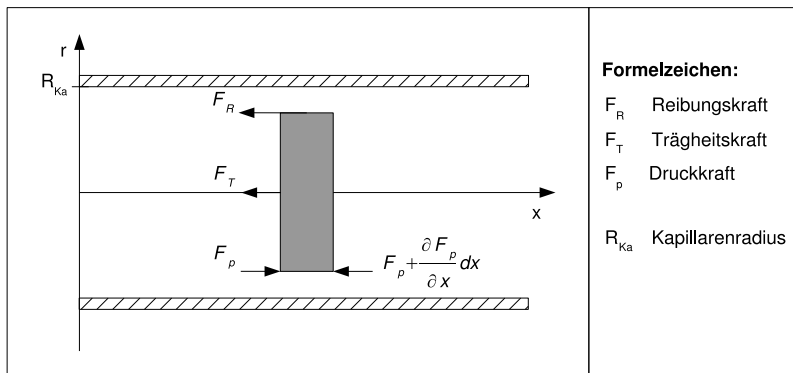


Abbildung 4.3: Kräftebilanz an einem Element der Kapillarenströmung

Die anhand des Impulssatzes aufzustellende Kräftebilanz zur Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit des Klebstoffs \bar{v}_{Kl} lautet zunächst allgemein

$$\frac{D}{Dt}(m\bar{v}_{Kl}) = \sum F_i. \quad (4.24)$$

Unter der Annahme laminarer Strömungsverhältnisse, die aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten nahelegt sowie unter Vernachlässigung von Einlaufeffekten folgt

$$\varrho_{Kl} A_{Ka} \frac{d\bar{v}_{Kl}}{dt} dx = F_D - \left(F_D + \frac{\partial F_D}{\partial x} dx \right) - F_R. \quad (4.25)$$

Bei der Umformung wurde des Weiteren der Umstand berücksichtigt, dass die durchströmte Querschnittsfläche A_{Ka} sowie die Dichte ϱ_{Kl} konstant vorausgesetzt sind. Unter diesen Annahmen gilt für den Massenerhaltungssatz

$$\frac{\partial \bar{v}_{Kl}}{\partial x} = 0. \quad (4.26)$$

Konvektive Änderungen der mittleren Geschwindigkeit sind demnach nicht einzu- beziehen. Die auf die Strömung wirkenden Druck- und Wandreibungskräfte in Form von F_D und F_R sind in bekannten Größen auszudrücken, wodurch

$$\varrho_{Kl} A_{Ka} \frac{d\bar{v}_{Kl}}{dt} dx = -A_{Ka} \frac{\partial p}{\partial x} dx - \int \tau_{Wand} dA_{KaWi} \quad (4.27)$$

Gültigkeit besitzt. In Anbetracht dessen, dass für die Kapillarenwandinnenfläche die Beziehung $dA_{KaWi} = 2\pi R_{Ka} dx$ gilt, ergibt sich

$$\varrho_{Kl} A_{Ka} \frac{d\bar{v}_{Kl}}{dt} dx = -A_{Ka} \frac{\partial p}{\partial x} dx - 2\pi R_{Ka} \int \tau_{Wand} dx. \quad (4.28)$$

Für die gesuchte Wandschubspannung gilt unter Berücksichtigung des nichtlinearen Viskositätsverlaufs und seiner Approximation durch den Potenzansatz von Ostwald/deWaele

$$\tau = -\eta' \left(\frac{d\bar{v}_{Kl}}{dr} \right)^n. \quad (4.29)$$

Zur Auswertung der oben stehenden Beziehung ist die Kenntnis des Geschwindigkeitsprofils der Strömung notwendig. Unter Beachtung der eingangs getroffenen Annahmen kann dazu das Geschwindigkeitsprofil der stationären Strömung

$$v_x(r) = \frac{3n+1}{n+1} \bar{v}_{Kl} \left[1 - \left(\frac{r}{R_{Ka}} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right], \quad (4.30)$$

das aus einer Kräftebilanz zu ermitteln ist, herangezogen werden. Die Auswertung seiner Ableitung an der Stelle $r = R_{Ka}$ ergibt

$$\left. \frac{dv_x}{dr} \right|_{r=R_{Ka}} = - \left(\frac{3n+1}{n} \right) \frac{1}{R_{Ka}} \bar{v}_{Kl} \quad (4.31)$$

und somit gilt für die Wandschubspannung

$$\tau = \eta' \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \frac{1}{R_{Ka}^n} \bar{v}_{Kl}^n. \quad (4.32)$$

Eingesetzt in den Impulssatz folgt

$$\frac{d\bar{v}_{Kl}}{dt} + 2 \frac{\eta'}{\varrho_{Kl}} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \frac{1}{R_{Ka}^{n+1}} \bar{v}_{Kl}^n = -\frac{1}{\varrho_{Kl}} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (4.33)$$

Zur Lösung von Gleichung 4.33 ist die Druckfunktion auf der rechten Gleichungsseite zu bestimmen. Diese hängt im Gegensatz zur zeitabhängigen mittleren Geschwindigkeit \bar{v} vom Ort x ab, so dass beide Seiten der Gleichung nur dann identisch erfüllbar sind, wenn es sich um Konstanten handelt. Infolgedessen gilt

$$C = -\frac{1}{\varrho_{Kl}} \frac{dp}{dx} \quad \text{und} \quad (4.34)$$

$$C = \frac{d\bar{v}_{Kl}}{dt} + 2 \frac{\eta'}{\varrho_{Kl}} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \frac{1}{R_{Ka}^{n+1}} \bar{v}_{Kl}^n. \quad (4.35)$$

Nach Umstellung und Integration von Beziehung 4.35 zwischen dem Kartuschen-
druck p_K und dem Umgebungsdruck p_U sowie der Koordinaten x_1 und x_2 folgt

$$C = \frac{p_K - p_U}{\varrho_{Kl}(x_2 - x_1)}. \quad (4.36)$$

Durch Einsetzen in 4.33 und unter Beachtung der Gegebenheit, dass die Kapillarenlänge l_{Ka} mit der Differenz der Koordinatenwerte identisch ist, ergibt sich letztlich

$$\frac{d\bar{v}_{Kl}}{dt} = -\frac{2\eta'}{\varrho_{Kl}} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \frac{1}{R_{Ka}^{n+1}} \bar{v}_{Kl}^n + \frac{p_K - p_U}{\varrho_{Kl} l_{Ka}}. \quad (4.37)$$

Damit ist der zeitliche Verlauf der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und aufgrund der konstanten Querschnittsfläche auch der Volumenstrom festgelegt. Gleichung 4.37 ist lediglich, unter Berücksichtigung des Zusammenhangs $\dot{V}_{Kl} = A_{Ka} \bar{v}_{Kl}$, in die Form

$$\frac{d\dot{V}_{Kl}}{dt} = -\frac{2\eta'}{\varrho_{Kl}} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \pi^{(1-n)} R_{Ka}^{(1-3n)} \dot{V}_{Kl}^n + \frac{\pi R_{Ka}^2}{\varrho_{Kl} l_{Ka}} (p_K - p_U) \quad (4.38)$$

zu überführen. Die Gewinnung einer Beziehung für den Volumenstrom und damit auch unmittelbar für das Volumen, welches durch zeitliche Integration des Volumenstroms determiniert wird, vervollständigt die Differenzialgleichungen 3.2, 3.3 und 3.5 zur Beschreibung des Zeit-Druck Dosierprozesses. Alle Voraussetzungen für den nachfolgend vorzunehmenden Reglerentwurf sind damit geschaffen.

4.3 Regelungsentwicklung

4.3.1 Prozessmodell

Die bisher zur Charakterisierung des Druckaufbaus und der Klebstoffströmung in einem Zeit-Druck Dosiersystem angegebenen Zusammenhänge bilden den Ausgangspunkt zum Entwurf der Regelungen für den kontinuierlichen und diskontinuierlichen Dosierprozess. Das aus ihnen ableitbare Prozessmodell ist, transformiert in die für die Regelungstechnik typische Form unter Einführung von Zustandsvariablen x_i , an dieser Stelle zusammenfassend dargestellt:

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{1}{T_V}(x_1 - p_U) + \frac{K_V}{T_V}u \quad (4.39)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{\kappa \Re \vartheta_Z a_V x_1^3}{A_Z l_Z \sqrt{\vartheta_V}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\Re(\kappa-1)} \left[\left(\frac{x_2}{x_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{x_2}{x_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} - \quad (4.40)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{\kappa}{V_{L0} + x_5} x_3 x_4 + \frac{\kappa \Re \vartheta_Z A_{Kein} x_2}{A_Z l_Z \sqrt{\vartheta_Z}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\Re(\kappa-1)} \left[\left(\frac{x_3}{x_2} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{x_3}{x_2} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (4.41)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = -\frac{\kappa \Re \vartheta_L A_{Kein} x_2}{V_{L0} + x_5 \sqrt{\vartheta_Z}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\Re(\kappa-1)} \left[\left(\frac{x_3}{x_2} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{x_3}{x_2} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} - \frac{2\eta'}{\varrho_{Kl}} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \pi^{(1-n)} R_{Ka}^{(1-3n)} x_4^n + \frac{\pi R_{Ka}^2}{\varrho_{Kl} l_{Ka}} (x_3 - p_U) \quad (4.42)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = x_4. \quad (4.43)$$

Eine Angabe zugehöriger Anfangsbedingungen entfällt, da diese für die nachfolgenden Aufgabenstellungen nicht einheitlich sind.

Zur rechnerischen Ermittlung der Temperaturen ϑ_V , ϑ_Z und ϑ_L sind die Beziehungen 4.20 bis 4.23 verwendbar. Eine Kopplung der Beziehungen zur Druck- und Temperaturbestimmung erfolgt jedoch nicht. Die Komplexität der abzuleitenden Regelgesetze würde infolgedessen deutlich steigen. Die Temperaturen werden somit weiterhin als Systemparameter, nicht aber als Zustandsvariable betrachtet, separat bestimmt und eingesetzt.

4.3.2 Regelung des kontinuierlichen Dosierprozesses

Bei einer kontinuierlichen Dosierung steht die Erzeugung eines definierten Stoffstroms, hier des hochviskosen Klebstoffs, im Vordergrund. Die Art des Dosierprozesses gibt somit die Anforderungen an die Prozessregelung vor. Der Regelung kommt die Aufgabe zu, einen geforderten Klebstoffstrom über eine längere Zeitspanne aufrechtzuerhalten. Es liegt also eine Arbeitspunktregelung vor, welche die Einwirkung äußerer Störgrößen bestmöglich zu kompensieren sucht.

Unter Einbeziehung der Berechnungsergebnisse aus Kapitel 4.1 ist festzustellen, dass bei kontinuierlichen Zeit-Druck Dosierprozessen anfänglich mit Kartuschenlufteerwärmungen zu rechnen ist (siehe Abbildung 4.2). Diese sind jedoch von kurzer Dauer. Während eines Großteils der Prozesszeit ist die Temperatur in der Kartusche konstant und nahezu identisch mit der Umgebungstemperatur. Signifikante, die Klebstoffviskosität beeinflussende Wärmeströme sind nicht zu erwarten. Demzufolge liegt es nahe, kurzzeitige Temperaturänderungen aufgrund des anfänglich stattfindenden Kompressionsvorgangs zu vernachlässigen. Damit ist nur noch eine vereinfachte Form der Gleichungen 4.39 bis 4.43, für konstante Werte der Temperaturen ϑ_V , ϑ_Z und ϑ_L , zu betrachten.

Bevor jedoch die eigentliche Arbeitspunktlinearisierung der Gleichungen 4.39 bis 4.43 im Folgenden durchführbar ist, sind die Arbeitspunkte, in denen das Dosiersystem betrieben werden kann, zu bestimmen. Die entscheidende und vorzuziehende Größe dabei ist der Volumenstrom, welcher der Zustandsgröße x_4 entspricht, die gleichzeitig die in jedem Fall zu erfassende Messgröße und den Systemausgang darstellt. Eine Ermittlung der algebraischen Beziehungen, aus denen die Werte der Zustandsgrößen x_i gewinnbar sind, erfolgt unter Ausnutzung der Tatsache, dass in einem Arbeitspunkt des Dosiersystems alle zeitlichen Änderungen der Zustandsgrößen identisch Null sind, so dass

$$x_{1s}^{\frac{6\kappa-2}{\kappa}} x_{2s}^{\frac{2}{\kappa}} - x_{1s}^{\frac{5\kappa-1}{\kappa}} x_{2s}^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} = \frac{\vartheta_V A_{K\text{ein}}^2}{\vartheta_Z a_V^2} x_{2s}^2 \left[\left(\frac{x_{3s}}{x_{2s}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{x_{3s}}{x_{2s}} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right] \quad (4.44)$$

$$\left(\frac{x_{3s}}{x_{2s}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} x_{3s}^{\frac{2\kappa-2}{\kappa}} - x_{2s}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} x_{3s}^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = \frac{(\kappa-1)\vartheta_Z}{2\kappa\vartheta_L A_{K\text{ein}}^2} x_{4s}^2 \quad (4.45)$$

$$x_{3s} = 2\eta' \left(\frac{3n+1}{n} \right) \frac{x_{4s}^n}{\pi^n R_{Ka}^{3n+1}} + pU \quad (4.46)$$

$$x_{5s} = 0 \quad (4.47)$$

$$u_s = \frac{x_{1s} - pU}{K_V} \quad (4.48)$$

gilt. Aus dem Gleichungssystem errechnen sich unter Vorgabe der Zustandsgröße x_4 alle weiteren Zustandsgrößen. Abgesehen von Gleichung 4.44 ist dazu kein numerisches Verfahren notwendig, denn Beziehung 4.45 stellt eine quadratische Gleichung für $x_{2s}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ dar. Anzumerken ist, dass auch Gleichung 4.44 in eine quadratische Gleichung für $x_{1s}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ übergeht, bei Vernachlässigung der Abhängigkeit der durchströmten Ventilquerschnittsfläche vom Druck.

An die Bestimmung der stationären Zustände schließt sich unmittelbar die Arbeitspunktlinearisierung durch eine Taylorreihenentwicklung der nichtlinearen rechten Seite des Gleichungssystems 4.39 bis 4.43 an. Wegen ihres Umfangs und der damit verbundenen Unübersichtlichkeit in der Darstellung werden die Ableitungen nicht explizit aufgeführt, sondern das sich ergebende lineare Differenzialgleichungssystem

$$\Delta \dot{\vec{x}} = A \Delta \vec{x} + b \Delta u \quad (4.49)$$

$$\Delta y = c^T \Delta \vec{x}, \quad (4.50)$$

das in Matrixschreibweise

$$\Delta \dot{\vec{x}} = \begin{bmatrix} F_{x_1}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_{x_1}^2 & F_{x_2}^2 & F_{x_3}^2 & 0 & 0 \\ 0 & F_{x_2}^3 & F_{x_3}^3 & F_{x_4}^3 & F_{x_5}^3 \\ 0 & 0 & F_{x_3}^4 & F_{x_4}^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{x_5}^5 \end{bmatrix} \Delta \vec{x} + \begin{bmatrix} F_u^1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u \quad (4.51)$$

$$\Delta y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \Delta \vec{x} \quad (4.52)$$

lautet. Dabei ist $F_{x_j}^i$ die Ableitung der i -ten Zeile des Differenzialgleichungssystems 4.39 bis 4.43 nach der j -ten Variablen, F_u^i die Ableitung der i -ten Zeile nach der Steuergröße und $\Delta \vec{x}$ steht erneut für die Differenz der Variablen x_j und ihrem stationären Wert x_{js} .

In einem weiteren Schritt ist die Stabilität des Systems durch die Berechnung der Systemeigenwerte λ_i zu prüfen. In Abhängigkeit der Stabilitätseigenschaften, die durch die Eigenwerte determiniert werden, sind unterschiedliche Realisierungen der Regelung denkbar. Ist Systemstabilität im gewählten Arbeitspunkt gegeben, so ist eine Ausgangsrückführung zur Erreichung des Regelziels ausreichend. Ist dies nicht der Fall - das heißt es existieren instabile Systemeigenwerte - ist die Ausgangsrückführung um eine Zustandsrückführung zu erweitern, der die Aufgabe der Systemstabilisierung zukommt. Außer zur Systemstabilisierung kann die Zustandsrückführung auch zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens des geregelten, kontinuierlichen Zeit-Druck Dosierprozesses genutzt werden. Unabhängig vom Einsatzzweck der Zustandsrückführung setzt sie die Kenntnis des vollständigen Systemzustands voraus.

Unter Berücksichtigung der Zustands- sowie Ausgangsrückführung ergeben sich neue Systemgleichungen der Form

$$\Delta \dot{\vec{x}}_n = A_n \Delta \vec{x}_n + b_n y_{soll} \quad (4.53)$$

$$\Delta y = c_n^T \Delta \vec{x}_n, \quad (4.54)$$

oder in Matrixschreibweise

$$\Delta \dot{\vec{x}}_n = \begin{bmatrix} A - bk^T - K_p bc^T & 0 & \frac{K_V}{T_V} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 1 \\ 0 & \dots & \frac{K_p}{T_I} & \dots & 0 \end{bmatrix} \Delta \vec{x}_n + \begin{bmatrix} \frac{K_p K_V}{T_V} \\ \vdots \\ \frac{K_p}{T_I} \end{bmatrix} y_{soll} \quad (4.55)$$

$$\Delta y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Delta \vec{x}_n. \quad (4.56)$$

Der Zustandsregler sowie der PI-Regler mit den Parametern K_p und T_I , für den

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_I} \int_0^t e(\bar{t}) d\bar{t} \quad (4.57)$$

gilt, wurden durch Einführung zweier neuer Zustandsvariablen x_6 und x_7 zur kompakteren Darstellung in das Differenzialgleichungssystem eingearbeitet. Alle nicht besetzten Elemente der Matrizen und Vektoren in den Gleichungen 4.55 und 4.56 sind mit Nullen zu vervollständigen.

Damit liegt ein lineares, zeitinvariantes Differenzialgleichungssystem vor, anhand dessen ein Arbeitspunktregler für verschiedene Arbeitspunkte entworfen werden kann. Falls die Zustandsregelung nicht benötigt wird, ist der Vektor k^T Null zu setzen. Die Eigenschaften des PI-Reglers der Ausgangsrückführung sind über die Parameter K_p und T_I veränderbar.

4.3.3 Regelung des diskontinuierlichen Dosierprozesses

Die Regelung des diskontinuierlichen Zeit-Druck Dosierprozesses unterscheidet sich dahingehend signifikant von der Regelung des kontinuierlichen Zeit-Druck Dosierprozesses, dass wiederkehrend eine Menge von „Arbeitspunkten“ vom Dosiersystem zur Erreichung des Sollwerts zu durchlaufen ist. Diese variiert je nach auszubringender Dosiermenge. Geprägt durch die Prozesscharakteristik ist somit keine Linearisierung in einem Arbeitspunkt möglich. Der Reglerentwurf muss anhand des nichtlinearen oder eines bereichsweise linearisierten Systemmodells erfolgen.

Zudem ist den zeitlich veränderlichen Temperaturverläufen Rechnung zu tragen. Im Gegensatz zur kontinuierlichen Dosierung kann die Zeitspanne der Luftkompression gegenüber der Dosierzeit nicht vernachlässigt werden. Dies erfordert die Lösung der Differenzialgleichungen 4.20 bis 4.23 zur Approximation des realen Temperaturverlaufs. Die Temperaturen finden aber dennoch in dem der Reglerentwicklung zu Grunde gelegten Prozessmodell in Form von Zustandsvariablen keine Berücksichtigung. Zur Vereinfachung der zum Reglerentwurf notwendigen Betrachtungen werden die Systemtemperaturen als Parameter behandelt, rechnerisch anhand der Beziehungen 4.20 bis 4.23 bestimmt und eingesetzt. Die gute Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem Temperaturverlauf legt diese Vorgehensweise nahe.

Den Ausgangspunkt zur Überprüfung einer bereichsweisen Linearisierbarkeit des Dosierprozessmodells bildet das Differenzialgleichungssystem 4.39 bis 4.43. Als Systemausgang ist aber nicht mehr der Volumenstrom, die Zustandsgröße x_4 , sondern das Volumen, die Zustandsgröße x_5 , von Interesse.

Zunächst erfolgt die Ermittlung des relativen Grads des Systems 4.39 bis 4.43. Dieser ergibt sich zu $r = 5$. Er ist somit identisch mit der Systemordnung m , die ebenfalls 5 beträgt. Entsprechend Kapitel 3.3.2 besitzt das System somit keine Nulldynamik und die Bedingung der Minimalphasigkeit ist automatisch erfüllt. Die weiteren durch Definition 2 an das System gestellten Bedingungen werden in der Ruhelage des Systems $[p_U; p_U; p_U; 0; 0]$ aber nicht erfüllt.

Bei einer Betrachtung der Systemgleichungen 4.39 bis 4.43 fällt auf, dass in den Massenstromgleichungen für die Prozessluft sowie der Gleichung für den Klebstoffvolumenstrom Wurzelfunktionen auftreten. Infolgedessen ist die rechte Seite des Differenzialgleichungssystems 4.39 bis 4.43 nicht analytisch, das heißt an der Systemruhelage $[p_U; p_U; p_U; 0; 0]$ in eine Taylorreihe entwickelbar. Deshalb treten in den zur Bestimmung des relativen Grads ermittelten Ableitungen Singularitäten auf. Eine bereichsweise Linearisierung in Form einer Eingangs/Ausgangs- oder Eingangs-/Zustandslinearisierung ist folglich nicht umsetzbar.

Die Regelerentwicklung für den diskontinuierlichen Dosierprozess muss somit anhand des nichtlinearen Systemmodells erfolgen. Durch eine theoretische Untersuchung der Systemruhelagen ist zunächst nachweisbar, dass es sich bei der Ruhelage $[p_U; p_U; p_U; 0; 0]$ um die einzige Ruhelage des Systems handelt.

Am Prozessmodell ist weiterhin ersichtlich ist, dass es sich bei den Gleichungen 4.39 und 4.42 um stabile Differenzialgleichungen handelt, deren Ausgangssignale für beschränkte Eingangssignale ebenfalls beschränkt sind.

Komplizierter zu charakterisieren sind die Gleichungen 4.40 und 4.41. Ist die Stabilität des ersten Summanden von Gleichung 4.41 mathematisch begründbar, kann die Stabilität des verbleibenden zweiten Summanden und jene von Gleichung 4.40 einfacher durch die Eigenschaften der Luftströmung begründet werden. Die aufgrund von Druckunterschieden auftretenden Luftmassenströme nehmen bei ansteigenden Druckniveaus stetig auf einen konstanten Wert oder Null ab. Damit streben die Zustandsgrößen x_2 und x_3 der Gleichungen 4.40 und 4.41 für beschränkte Eingangssignale beschränkten Ausgangssignalen beziehungsweise bei fallenden Druck-

niveaus dem Wert Null und somit der Ruhelage zu. Die grenzstabile Differenzialgleichung 4.43 hingegen beschreibt integrales Verhalten und ist in ihrem Eingangs-/Ausgangsverhalten unbeschränkt.

Insgesamt geht aus den vorstehenden Betrachtungen hervor, dass keine zu stabilisierenden Systemzustände zu erwarten sind, und eine Ausgangsrückführung in Form eines P-Reglers zur Prozessregelung des diskontinuierlichen Dosierprozesses ausreichend ist. Zur Validierung der getroffenen Aussagen sind jedoch nach Bestimmung der unbekanntenen Ventillflächenfunktion A_V rechnerische Untersuchungen zum Prozessverhalten durchzuführen, und anhand dieser die Reglerverstärkungen zu bestimmen.

4.4 Folgerungen aus den Entwicklungsergebnissen

Die Entwicklungsergebnisse zeigen, dass das in Kapitel 3.4 definierte Ziel, ein mathematisches Modell zur vollständigen Charakterisierung des Zeit-Druck Dosierprozesses zu entwickeln, erreicht ist. Das vollständige Prozessmodell umfasst sowohl die prozessbezogenen Einflussparameter Druck, Temperatur und Kartuschenluftvolumen als auch den klebstoffbezogenen Einflussparameter Schergeschwindigkeit und den komponentenbezogenen Einflussparameter Dosierkapillarendurchmesser. Das vollständige Prozessmodell ermöglicht es weiterhin die gemäß Kapitel 3.4 erforderlichen Regelgesetze in Form eines Arbeitspunktreglers für die kontinuierliche und eines ausgangsrückführenden Reglers für die diskontinuierliche Zeit-Druck Dosierung anzugeben. Abbildung 4.4 fasst diese Vorgehensweise schematisch zusammen.

Die bei der Ableitung der Regelgesetze und der Diskussion der Einflussparameter in Kapitel 3.4 getroffenen Annahmen, dass der Dosiervolumenstrom sowie sämtliche in den Dosiersystemkomponenten wirkenden Drücke gemessen werden, legen unmittelbar alle zur Umsetzung der Regelgesetze zu erarbeitenden Sensorikkonzepte fest.

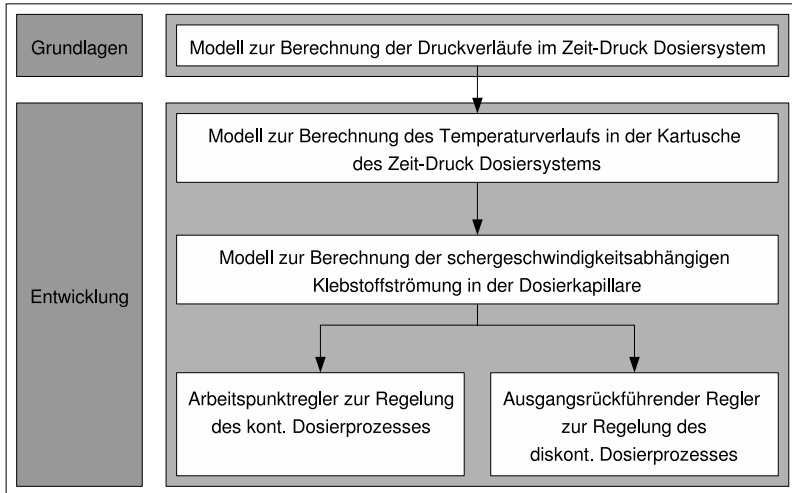


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Regelungsentwicklung

Die Voraussetzung, dass der Zeit-Druck Dosierprozess zudem kontinuierlich beeinflussbar sein muss erfordert ferner die Ausarbeitung eines entsprechenden Aktorikkonzepts. Konzepte zur Temperaturmessung hingegen sind obsolet - entsprechend Kapitel 4.3.1 erfolgt die Ermittlung der Systemtemperaturen rechnerisch auf Basis der angegebenen Beziehungen zur Temperaturverlaufsberechnung.

Konkret sind somit folgende Aufgabenstellungen einer Lösung zuzuführen: Konzeption von Prozessansteuerung und -überwachung inklusive

- eines Aktorikkonzepts, das die kontinuierliche Beeinflussbarkeit des Dosierprozesses gewährleistet.
- eines Sensorikkonzepts zur Erfassung der Druckniveaus in Ventil, Zuleitung und Kartusche.
- eines Sensorikkonzepts zur Erfassung des Dosiervolumenstroms.

Kapitel 5

Konzeption des Dosierwerkzeugs

5.1 Lösungsprinzipien für die Ansteueraktorik

Zur Erfüllung der in Kapitel 4 definierten Anforderung der kontinuierlichen Beeinflussbarkeit des Dosierwerkzeugs ist die automatische Generierung justierbarer Dosierdrücke an der Druckluftversorgungseinrichtung unabdingbar. Je schneller, exakter und schwankungsärmer diese in Abhängigkeit des berechneten Stellsignals einstellbar sind, desto höher ist die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Dosierergebnisse. Eigenschaften verschiedener Alternativen zur Lösung des beschriebenen Problems stellt Abbildung 5.1 gegenüber.

Lösungskonzept A sieht den Einbau einer mechanischen, manuell verstellbaren Drossel in den Strömungsweg vor. Derartige Drosseln gestatten es, durch Drehen an einer Stellschraube, den Strömungsquerschnitt definiert zu verengen und ermöglichen damit die Dezimierung des durch die Engstelle tretenden Luftmassenstroms. Mit der Dezimierung des Strömungsquerschnitts einhergehend wird ein Druckabfall verursacht, so dass nicht mehr der vollständige Druckunterschied zwischen Umgebung und Druckluftversorgungseinrichtung am Dosierwerkzeug zur Verfügung steht. Ein automatischer Betrieb der Drossel ist allerdings, bedingt durch die manuell zu bedienende mechanische Stellvorrichtung, nicht ohne die Adaption eines automatisch steuerbaren Stellelements wie eines Elektromotors möglich.


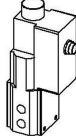
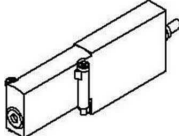
	A	B	C
	Mechanische Drossel	Elektronische Drossel	Schaltventil
Prinzipbild			
Einstellzeit [s]	-	$\sim 7 \cdot 10^{-3} - 1$	$\sim \leq 4 \cdot 10^{-3}$
Stellbereich [bar]	$\sim 0 - 9$	$\sim 0 - 10$	$\sim -0,9 - 8$
Stellunsicherheit [%]	$\sim \leq 10$	$\sim \leq 2$	-
Eignung	gering	gut	mäßig

Abbildung 5.1: Lösungskonzepte für die Ansteueraktorik

Eine Alternative hierzu bietet Lösungskonzept B, welches die Verwendung einer elektronisch gesteuerten Drossel vorsieht. Ihre Funktionsweise ist jener der mechanischen Drossel ähnlich, unterscheidet sich aber insofern, dass das bei Lösungskonzept A zur automatischen Betätigung notwendige zusätzliche Stellelement bereits integriert ist. Ein Elektromagnet oder ein piezoelektrischer Aktor sorgen für das Öffnen und Schließen des Ventilsitzes und ermöglichen so die kontrollierte Durchströmung des Ventils. Dadurch ist ein schnelles Ansprechverhalten sowie eine gute Regelbarkeit über einen weiten Stellbereich zu erzielen.

Lösungskonzept C verwendet gewöhnliche Schaltventile zur Erzeugung eines bestimmten Dosierdrucks. Diese Alternative ist allerdings um eine Steuerung oder Regelung der Pulsweite des anliegenden Druckimpulses zu erweitern. Bedingt durch die Schaltzustände der Pneumatikventile - vollständig geöffnet, beziehungsweise geschlossen - ist nur durch die Steuerung oder Regelung der Pulsweite ein vom Versorgungsdruck unabhängiger Dosierdruck erzeugbar. Durch das An- und Abschalten der Ventile sind jedoch Druckschwankungen in Kauf zu nehmen, die mit negativen Auswirkungen auf die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit des Dosierergebnisses verbunden sind.

Gemäß den erörterten technischen Möglichkeiten und Beschränkungen der Konzepte

erscheint die Weiterführung von Lösungskonzept B zielführend.

5.2 Lösungsprinzipien zur Messgrößenerfassung

5.2.1 Druckerfassung

Neben Konzepten zur permanenten, gezielten Beeinflussung des Zeit-Druck Dosiersystems sind im Hinblick auf Nutzbarkeit einer Zustandsrückführung alternative Lösungskonzepte zur Messung der Prozessgröße Druck in den Komponenten Zuleitung und Kartusche anzugeben. Die Druckmessung in diesen beiden Komponenten ist, im Gegensatz zur Druckerfassung an einer elektronischen Drossel, nicht Stand der Technik. Abbildung 5.2 zeigt Alternativen zur Erfassung der Druckniveaus.




	A	B	C
	Drucksensitive Farbe	Manometer (m./h.)	Manometer (elektr.)
Prinzipbild			
Einstellzeit [s]	$\sim 1 \cdot 10^{-3} - 1$	$\sim < 1 - 30$	$\sim 1 \cdot 10^{-3} - 1$
Messbereich [bar]	~ 3	~ 40	~ 3000
Messunsicherheit [%]	$\sim \pm 0,33$	$\sim \pm 0,01 - 2$	$\sim \pm 0,1 - 0,5$
Eignung	gering	mäßig	gut

Abbildung 5.2: Lösungskonzepte zur Erfassung der Druckniveaus in Zuleitung und Kartusche

Lösungskonzept A ermöglicht die Ermittlung des herrschenden Druckniveaus durch fotochemische Deaktivierung von zuvor mittels Licht aktivierter Moleküle. Die Intensität des entstehenden Fluoreszenzlichts ist ein Maß für den Druck. Eine automatische Auswertung des druckabhängigen Lichtsignals kann durch Zuhilfenahme

von Kamerasystemen und Bildverarbeitungssoftware vorgenommen werden.

Lösungskonzept B, die Druckmessung mittels Manometern auf hydrostatischer oder mechanischer Basis erlaubt, durch Erzeugung unterschiedlich hoher Flüssigkeitsstände in Gefäßen, beziehungsweise elastische Verformung von Federelementen, eine Messung der Druckniveaus. Die automatische Auswertung der Messsignale muss bei Verwendung hydrostatischer oder mechanischer Manometer allerdings analog zu Lösungskonzept A unter Einsatz von Kamerasystemen und Bildverarbeitungssoftware erfolgen.

Unmittelbar automatisiert auswertbar sind die Messsignale der in Lösungskonzept C als Alternative vorgeschlagenen elektrischen Druckaufnehmer. Sie stellen als Ausgangssignale elektrische Spannungen zur Verfügung. Die Verformung des Druckbeziehungsweise Kraftübertragungselements führt entweder unmittelbar zu einer messbaren Spannung, oder die gemessene Spannung verändert sich mittelbar. Dies wird hervorgerufen durch die Änderung einer anderen elektrischen Eigenschaft wie die des Widerstands. Ersteres ist bei piezoelektrischen Druckaufnehmern, Letzteres bei auf Dehnmessstreifen basierenden elektrischen Druckaufnehmern der Fall.

Ein abschließender Vergleich der Alternativen A, B und C zeigt, dass die elektrischen Druckaufnehmer des Lösungskonzepts C zu favorisieren sind. Im Gegensatz zu den Lösungskonzepten A und B benötigen sie keine zusätzlichen peripheren Komponenten zur Signalauswertung. Das Messprinzip ist ferner robuster gegenüber Störungen als das hydrostatische und präziser als das mechanische des Lösungskonzepts B. Ebenfalls nicht erforderlich ist die Verwendung spezieller Komponenten entsprechend Lösungskonzept A, welche die Einsatzflexibilität des Dosierwerkzeugs einschränken. Hinzu kommt die einfache Integrierbarkeit der elektrischen Druckaufnehmer in den Strömungsweg mittels entsprechender Adapter.

5.2.2 Volumenstromerfassung

Die alleinige Feststellung der Druckniveaus in den Dosiersystemkomponenten Ventil, Zuleitung und Kartusche reicht zur Erzielung hoher Reproduzierbarkeiten und Ge-

nauigkeiten bei der Dosierung hochviskoser Klebstoffe nicht aus. Entsprechend der Ergebnisse aus Kapitel 3 ist eine permanente Erfassung der entscheidenden Prozessgröße des Klebstoffvolumenstroms unabdingbar. Auch die in Kapitel 4 abgeleiteten Regelgesetze setzen seine in situ Ermittlung voraus. Lösungskonzepte zur messtechnischen Erfassung des Klebstoffvolumenstroms enthält Abbildung 5.3.



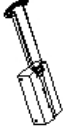
	A	B	C
	Füllhöhsensor	Durchstrahlsensor	Volumenstromsensor
Prinzipbild			
Einstellzeit [ms]	~0,1– 100	~1–10	~1– 10
Messbereich [mm;m;l/h]	~0,01·10 ⁻³ – 0,1	~20·10 ⁻³ – 10	~1·10 ⁻⁶ –10
Messunsicherheit [%]	~ ±0,1– 0,5	~1	~ ±0,1– 3
Eignung	mäßig	gering	gut

Abbildung 5.3: Lösungskonzepte zur Erfassung des Dosiervolumenstroms

Lösungskonzept A erlaubt die indirekte Bestimmung des Klebstoffvolumenstroms anhand einer Messung der Kartuschenfüllhöhe. Hierzu einsetzbare Sensoren hoher Messgenauigkeit, beispielsweise auf dem Prinzip der Triangulation basierend, ermöglichen die Ermittlung des Abstands der Flüssigkeitsoberfläche zur Emitter-/Detektorebene. Anhand des gemessenen Abstands und der für die Kartusche gültigen geometrischen Beziehungen erfolgt die Berechnung des Klebstoffvolumenstroms. Nachteilig an diesem Lösungskonzept erscheint, dass eine nahezu planare Flüssigkeitsoberfläche zur Durchführung aussagekräftiger Messungen notwendige Voraussetzung ist. Ihre Einhaltbarkeit stellt sich allerdings problematisch dar. Selbst bei Verwendung angepasster Verdrängungstopfen kann deren Schiefstellung nicht ausgeschlossen werden.

Dieses Manko weist das alternative Lösungskonzept B nicht auf. Die radiometrische Durchleuchtung der Kartusche gestattet die Aufnahme des Kartuschenfüllstands

durch Veränderungen in der Detektorabschattung. Die ermittelten Füllstandsänderungen ermöglichen in Kombination mit den für die Kartusche geltenden geometrischen Beziehungen, analog zu Lösungskonzept A, eine Berechnung des Dosiervolumenstroms.

An diesem Konzept als problematisch einzustufen, ist das Verbleiben von Klebstoff an der Kartuscheninnenwand, hervorgerufen durch die zwischen Kartuscheninnenwand und Klebstoff vorhandene Adhäsion. Eine schlechte Miniaturisierbarkeit und hohe Kosten erschweren ferner den Einsatz eines derartigen Messsystems.

Lösungskonzept C legt den Einsatz von Volumenstromsensoren nahe. Diese basieren, je nach Typ, auf sich wesentlich unterscheidenden Messverfahren. Aufgrund der hier im Vordergrund stehenden sehr geringen Volumenströme scheidet eine große Anzahl von Messverfahren aber bereits a priori aus. Hohe Genauigkeiten auch für geringe Volumenströme, bei gleichzeitig kompakter Bauweise, versprechen unter anderem thermische Volumenstromsensoren. Sie weisen allerdings den Nachteil auf, dass ihre Kennlinie von den Klebstoffeigenschaften abhängt. Folglich sind die Sensoren bei Verwendung unterschiedlicher Medien wiederholt zu kalibrieren.

Insgesamt gesehen ist dennoch der Einsatz von Volumenstromsensoren (Lösungskonzept C) den Alternativen A und B vorzuziehen. Konträr zu diesen hängt das Messverfahren bei Lösungskonzept C nicht von den, je nach Kartuschengröße, variierenden geometrischen Verhältnissen ab oder wird von der rückstandsfreien Entleerung der Kartusche beeinträchtigt. Zudem erlaubt es bei entsprechender Bauweise eine Messgrößenerfassung unmittelbar vor dem Dosierkapillareintritt.

Kapitel 6

Validierung der entwickelten Prozessregelungen

6.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Versuchsbedingungen

Die Validierung der erarbeiteten Prozessregelungs-, Prozessüberwachungs- und Ansteuerungskonzepte setzt die Realisierung eines Versuchsaufbaus voraus. Diesen beschreibt Abbildung 6.1.

Aus ihr geht hervor, dass der Versuchsaufbau alle gemäß Konzeption erforderlichen Teilsysteme - ein Proportionaldruckregelventil, zwei Drucksensoren, einen Durchflusssensor sowie einen PC zur Messdatenverarbeitung und Stellsignalgenerierung - umfasst.

Das Proportionaldruckregelventil vom Typ PRA10-1000 /AIR-07/ ermöglicht die Erzeugung eines definierten, elektronisch vorwählbaren Ausgangsdruckniveaus von bis zu 10 bar. Dieses stellt sich am Ventil nach zirka 70 ms mit einer Genauigkeit von mindestens 5 % bezogen auf den maximal schaltbaren Ausgangsdruck ein. Weiterhin verfügt das Ventil über einen bereits vom Hersteller integrierten Drucksensor, der die Erfassung des tatsächlich am Ventilausgang wirksamen Drucks zulässt.

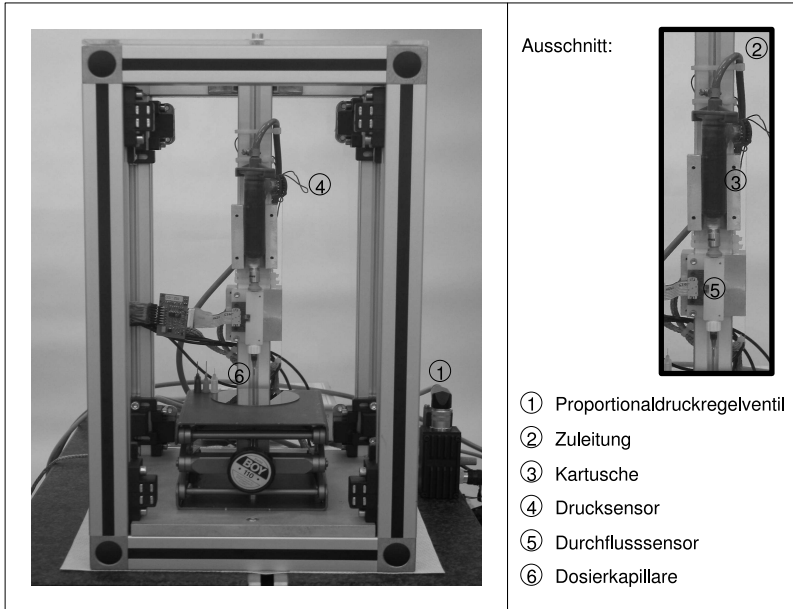


Abbildung 6.1: Darstellung des Versuchsaufbaus zur Validierung von Reproduzierbarkeit und Genauigkeit

Als Zuleitung kommt ein marktgängiger, auf einen Innendurchmesser von 4 mm kalibrierter Pneumatikschlauch /FES-07/ aus Polyurethan, mit einer Gesamtlänge von 0,5 m, zum Einsatz. Zur Klebstoffbevorratung dient eine ebenfalls marktübliche Kartusche /EFD-07/ aus Polypropylen mit einem Fassungsvermögen von 10 cm³, welche durch eine höhenverstellbare Halterung im Aufbau fixiert ist.

Die Erfassung der Druckniveaus in Zuleitung und Kartusche erfolgt durch Absolutdrucksensoren des Typs AUAE PD22 /ASS-07/. Die Absolutdrucksensoren gestatten die Messung von Drücken zwischen 100 mbar und 25 bar mit einer Genauigkeit von 0,8 % bei Unter- und 0,5 % bei Überdrücken, bezogen auf die jeweilige Messintervallbreite.

Auf einer weiteren, ebenfalls höhenverstellbaren Halterung ist ein Volumenstromsensor zur Erfassung des Dosiermedienstroms montiert, der die Messung von Volumenströmen zwischen -7 und $7 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ erlaubt /HSG-04/.

In Abhängigkeit der zu dosierenden Volumina oder Volumenströme finden zudem unterschiedliche Standarddosierkapillaren /EFD-07/ mit Innendurchmessern von 110, 210 oder 330 μm Verwendung. Sie werden mittels Isopropanol in einem Ultraschallbad bei einer Anregungsfrequenz von 35 kHz vorgereinigt.

Darüber hinaus gehört zum Versuchsaufbau ein PC, welcher die Aufnahme und Verarbeitung der Messsignale sowie die Ausgabe von Stellgrößen ermöglicht. Dazu verfügt er über eine Datenakquisitionskarte vom Typ NI PCI-6071 E und das Programmsystem LabView in der Version 6.1.

Abschließend ist festzuhalten, dass zur Vermeidung partikulärer Kontaminationen der Versuchsmittel und zur Kompensation von Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen alle Versuche ausschließlich in Reinraumumgebungen der Klasse 5 nach DIN EN ISO 14644-1, unter Verwendung von Reinstluft zur Dosierdruckerzeugung durchgeführt werden.

6.2 Vorarbeiten zur Versuchsdurchführung

6.2.1 Identifikation der unbekanntenn Modellparameter

Die Festlegung geeigneter Reglerparameter gemäß Kapitel 4 erfordert die Kenntnis der bis dato noch unbekanntenn Ventilfläche $A_V(p_V)$ des Proportionaldruckregelventils. Sie ist anhand der Gleichungen 4.39 bis 4.43 berechenbar. Die einfach experimentell umzusetzende Voraussetzung, dass die Zuleitung an ihrem Ende verschlossen ist, reduziert das Gleichungssystem 4.39 bis 4.43 auf die Beziehungen

$$\frac{dp_V}{dt} = -\frac{1}{T_V}(p_V - p_U) + \frac{K_V}{T_V}u \quad (6.1)$$

$$\frac{dp_Z}{dt} = \frac{\kappa \Re \partial_Z}{A_Z l_Z} \dot{m}_1(t). \quad (6.2)$$

Aus Gleichung 6.2 ergibt sich nach Umstellung und Umformung die druckabhängige Ventillfläche unter Berücksichtigung der adiabaten Düsengleichung 3.4 zu

$$A_V = \frac{\sqrt{\vartheta_V}}{p_V} \frac{A_Z l_Z}{\kappa \Re \vartheta_Z} \left(\sqrt{\frac{2\kappa}{\Re(\kappa-1)} \left[\left(\frac{p_Z}{p_V} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_Z}{p_V} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \right)^{-1} \frac{p_Z}{dt}. \quad (6.3)$$

Damit ist die Ventillfläche unter Kenntnis der zeitabhängigen Größen p_V , ϑ_V , p_Z und ϑ_Z berechenbar. Die zu ihrer Festlegung notwendigen Druckverläufe sind am Proportionaldruckregelventil und in der Zuleitung durch die im jeweiligen Teilsystem eingebauten Drucksensoren messbar. Eine Messung der Systemtemperaturen ϑ_V und ϑ_Z hingegen ist nicht erforderlich. Durch Ausnutzung der Druckmesswerte ist deren rechnerische Ermittlung möglich.

Die in Kapitel 4 erarbeiteten Ergebnisse zur Temperaturverlaufsberechnung legen die Beschreibung des in der Zuleitung stattfindenden Temperaturanstiegs als adiabaten Vorgang nahe. In Abbildung 4.2 geht sowohl aus dem dargestellten gemessenen als auch berechneten Kurvenverlauf hervor, dass die Lufttemperatur in einer an ihrem Ende verschlossenen 10 cm³ Kartusche bei einer sprunghaften, einmaligen Kompression der Luft zunächst stark ansteigt. Diese für die Kartusche gewonnenen Erkenntnisse sind auch auf die an ihrem Ende verschlossene Zuleitung übertragbar. Das in der Zuleitung vorhandene Luftvolumen von zirka 3 cm³ wird durch den eintretenden Luftmassenstrom ebenfalls komprimiert. Ergo zeigt die Lufttemperatur in der Zuleitung einen ähnlichen zeitlichen Verlauf wie jene in der Kartusche und die Annahme eines adiabaten Temperaturanstiegs während der Kompressionsphase ist zulässig. Dieser ist anhand der Beziehung

$$\vartheta_Z = \vartheta_V \left(\frac{p_Z}{p_V} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (6.4)$$

beschreibbar.

Die anschließend stattfindende Abkühlung der erwärmten Luft auf Umgebungstemperatur spielt im Gegensatz zu ihrer Erwärmung bei der Ventillflächenberechnung keine Rolle. Beim Erreichen des Temperaturmaximums ist der Druckausgleich im

System abgeschlossen, so dass

$$\frac{dp_V}{dt} = \frac{dp_Z}{dt} = 0 \quad (6.5)$$

gilt. Entsprechend Gleichung 6.3 folgt damit - unabhängig vom weiteren Kartuschen-temperaturverlauf - unmittelbar $A_V = 0$. Unter Berücksichtigung von Beziehung 6.4 ergibt sich somit nach Separation und Integration letztlich folgende Bestimmungsgleichung für die Ventilfläche

$$A_V = \frac{1}{t_{ges}} \int_{p_V}^{p_V=p_Z} \frac{A_Z l}{\sqrt{\vartheta_V} p_V \kappa \Re} \left(\frac{\bar{p}_Z}{p_V} \right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} \left(\frac{2\kappa}{\Re(\kappa-1)} \left[\left(\frac{\bar{p}_Z}{p_V} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{\bar{p}_Z}{p_V} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right] \right)^{-\frac{1}{2}} d\bar{p}_Z. \quad (6.6)$$

Die Aufnahme von Sprungantworten des Ventil- und Zuleitungsdrucks im Bereich zwischen 0,5 und 6 bar und das Einsetzen deren zeitlicher Verläufe in Gleichung 6.6 lässt die Angabe der Approximationsfunktion

$$A_V(p_V) = 0,00982 p_V^2 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (6.7)$$

für die bis dato unbekannte Ventilfläche zu. Sie vervollständigt das Gleichungssystem 4.39 bis 4.43.

6.2.2 Bestimmung eines Klebstoffersatzmediums

Klebstoffe sind Vielstoffgemische und bestehen gemäß Kapitel 3 aus einer Fülle unterschiedlicher Komponenten. Diese beeinflussen die Klebstoffeigenschaften in verschiedener Hinsicht. Deshalb ist das Verhalten der Klebstoffe unter anderem zeitabhängig und die Klebstoffe weisen eine maximale Verarbeitungsdauer, die Topfzeit auf. Problematisch allerdings ist, dass auch während der Topfzeit die Klebstoffeigenschaften nicht konstant sind, sondern Veränderungen unterliegen.

Um zunächst eine Bestimmung und Absicherung der anhand der vorgeschlagenen Prozessregelungen maximal zu erzielenden Reproduzierbarkeit und Genauigkeit zu ermöglichen, ist aufgrund der zeitlich veränderlichen Klebstoffeigenschaften ein für Validierungsuntersuchungen geeignetes Ersatzmedium zu bestimmen. Ausschließ-

lich unter Verwendung eines Fluids, dessen Eigenschaften als zeitlich konstant annehmbar sind, wird gewährleistet, dass die Untersuchungen nicht durch undefinierte Schwankungen der Werkstoffkennwerte des Dosiermediums beeinträchtigt werden. Nur so ist eine zuverlässige Aussage über das Verfahrenspotenzial zu treffen.

Analog der Eigenschaften des Klebstoffspektrums sollte das Ersatzmedium ebenfalls höherviskos, aber weiterhin einfach entgasbar, filtrierbar sowie hydrophob sein. So ist sichergestellt, dass das Ersatzmedium nur geringfügig Einfluss auf die Messergebnisse nimmt.

Theoretische und experimentelle Untersuchungen von einigen als tauglich einzustufenden Ersatzmedien wie Glycerinen, Ölen und Stoffgemischen zeigten, dass von den untersuchten Medien das hochviskose Öl des Typs SHC 639 den gestellten Anforderungen am ehesten genügt. Mit geeigneten Laboranlagen ist es von partikulären Kontaminationen größer $0,45 \mu\text{m}$ befreibar und in einer Vakuumumgebung unter Einwirkung von Vibrationen entgasbar. Weiterhin sind bei der Auswertung der Dosierergebnisse keine signifikanten, durch Luftfeuchtigkeit bedingten Einflüsse zu erwarten, wie sie bei Glycerinen feststellbar sind. Die wichtigsten technischen Daten des Ersatzmediums fasst Abbildung 6.2 zusammen.

SHC 639	
Dynamische Viskosität	3,03 Pas
Dichte	867 kg/m ³
Spezifische Wärmekapazität	2,04 kJ/kg*K
Wärmeleitfähigkeit	0,138 W/m*K

Abbildung 6.2: Eigenschaften des Klebstoffersatzmediums bei $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Ihr ist entnehmbar, dass das Öl eine typische Klebstoffeigenschaft, das strukturviskose Fließverhalten, nicht aufweist. In Anbetracht der in Kapitel 3 behandelten Grundlagen, aus denen hervorgeht, dass zur reproduzierbaren und genauen Dosierung von Klebstoffen ein Durchflusssensor unabdingbar ist, relativiert sich die genannte Diskrepanz. Die erforderliche Kalibrierung des Durchflusssensors auf das zu

dosierende Medium stellt sicher, dass die strukturviskose Viskositätskennlinie des Klebstoffs Eingang in die Sensorkennlinie findet.

6.2.3 Kalibrierung des Durchflusssensors

Neben einer ausreichend exakten Festlegung der Parameter des mathematischen Prozessmodells hängen die Dosierergebnisse vom eingesetzten Durchflusssensor ab. Seine Eigenschaften besitzen direkte Auswirkungen auf die im Dosierprozess erreichbare Reproduzierbarkeit und Genauigkeit /WER-93/.

Bei dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Durchflusssensor handelt es sich um einen thermischen Durchflussmesser, der auf dem kalorischen Messprinzip /ASH-98, ASH-98-1/ basiert. Er ist als Mikrosystem auf einer zirka 100 nm dicken, im LPCVD-Verfahren hergestellten Membran aufgebracht und besteht aus zwei Temperatursensoren sowie einem sich zwischen diesen befindlichen Heizelement /ASH-98, ASH-98-1/. Die Abschirmung der Sensorelemente und des Heizelements gegenüber aggressiven Medien erfolgt mittels einer aus unterschiedlichen Schichten aufgebauten Passivierung /ASH-98, ASH-98-1/. Hervorgerufen durch den geringen Abstand der Heiz- und Sensorelemente ist eine hohe Sensitivität des Sensors erzielbar. So wird die Messung von Volumenströmen selbst weniger Nanoliter möglich /ASH-01/.

Der Nachteil dieses Sensorprinzips liegt darin, dass die Sensorkennlinie unmittelbar von den Stoffdaten des zu dosierenden Mediums abhängig ist. Trotz dieses Mankos finden thermische Sensorprinzipien bei Anwendungen, deren Charakteristika die Vermessung kleinster Fluidströme ist, häufig Verwendung. Andere Sensorprinzipien /FRA-04/ sind nicht annähernd so gut miniaturisierbar /DIT-01/.

Bedingt durch die Abhängigkeit der Sensorkennlinie von den Stoffdaten des Dosiermediums ist ihr Verlauf für das als Referenzmedium bestimmte hochviskose Öl zu ermitteln. Diesem Kalibriervorgang muss im Hinblick auf die Güte der später zu erzielenden Dosierergebnisse große Bedeutung beigemessen werden. Prinzipiell kann er nach zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen erfolgen: Durch die Umrechnung der

seitens des Herstellers zur Verfügung gestellten Kalibrierkennlinie für Wasser oder die Entwicklung eines Kalibrierverfahrens zur Aufnahme des Kennlinienverlaufs.

Die Berechnung einer Kennlinie für hochviskose Fluide ist unter Kenntnis ihrer thermodynamisch relevanten Stoffwerte für konvektive Wärmeübergänge grundsätzlich möglich, aber gemäß Aussage des Herstellers nicht zu empfehlen. Folglich muss eine geeignete Vorgehensweise zur Kalibrierkurvenermittlung für hochviskose Fluide erarbeitet werden.

Im Gegensatz zu niedrigviskosen Fluiden wie Wasser, bei denen die Gewichtskraft zur Erzeugung einer Kalibrierströmung ausreichend ist, erfordert die Kennlinienerstellung für hochviskose Medien aufgrund deren Fließwiderstand davon differierende Methoden. Alternativ ist die Abfüllung des hochviskosen Fluids - hier des im gefilterten und entgasten Zustand vorliegenden Öls - in eine mit Druck beaufschlagbare Standardkartusche möglich. Durch Ausbringen einer bestimmten Menge des Fluids, deren anschließende Wägung und den Bezug der ermittelten Masse auf Dichte und Ausbringdauer ist eine Maßzahl für den mittleren Volumenstrom gewinnbar. Die Zuordnung dieser Maßzahl zum zeitlichen Mittelwert der ebenfalls aufgenommenen Sensorspannungsamplitude gestattet die Auffindung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen beiden physikalischen Größen.

Zur Sicherstellung von Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Kennlinie ist die Einbeziehung zweier Faktoren unabdingbar: Der eine ist die Aufrechterhaltung eines über die Messdauer konstanten Druckniveaus in der Kartusche, der andere die Gewährleistung eines reproduzierbaren und vollständigen Ablösevorgangs des Fluidvolumens von der Dosierkapillare.

Während ein konstantes Druckniveau in der Kartusche durch Messung, Rückführung und Regelung des Kartuschendruckes anhand des eingebauten Drucksensors weitgehend problemlos realisierbar ist, erweist sich die Gewährleistung einer korrekten Ablösung der Fluidmenge vom Kapillarenende als wesentlich komplizierter.

Der Ablöse- respektive der bei der Tropfenablösung stattfindende Einschnürvorgang ist von mehreren Parametern abhängig /PAD-97, LOW-97/. Die Oberflächenspan-

nungen und -eigenschaften der Kapillare, des Fluids und des Substrats, auf das der Tropfen zu übertragen ist, dominieren beide Vorgänge. Daher dient als Substrat eine definierte Menge Dosierfluid, die in einer ebenfalls mit Isopropanol vorgereinigten und verschleißbaren Kuvette eingebracht ist. Weiterhin ist bei der Messung seitens des Experimentators darauf zu achten, dass sich die ausgebrachte Fluidmenge nahezu vollständig von der Kapillare löst. Dadurch ist gewährleistet, dass die an der Kapillare verbleibende gegenüber der abgelösten Menge als geringfügig einzustufen ist und somit keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis besitzt.

Die Absicherung der vorgeschlagenen Methode erfolgt anhand von Messungen, bei denen variierende Kartuschendruckniveaus und -füllstände respektive -luftmengen betrachtet werden. Sind reproduzierbare Ergebnisse bei Veränderung dieser Parameter erzielbar, ist sichergestellt, dass das vorgegebene Druckniveau hinreichend konstant und der Ablösevorgang reproduzierbar ist. Eine Ergebnisübersicht enthält Abbildung 6.3.

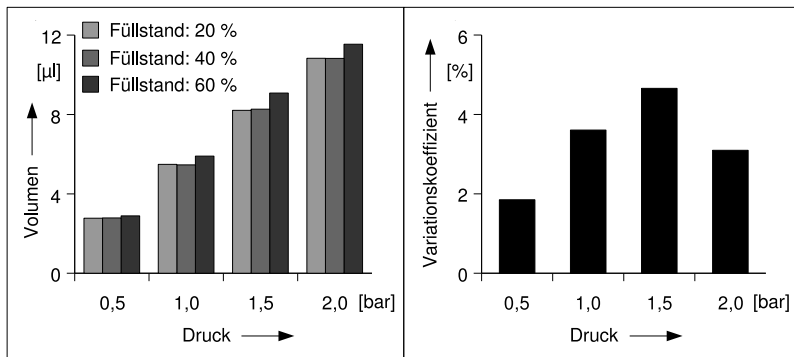


Abbildung 6.3: Absolutwerte und relative Varianz von in Vorversuchen unter einem definierten Druckniveau erzeugter Dosiervolumina

Der links stehenden Grafik in Abbildung 6.3 lässt sich entnehmen, dass das dosierte Volumen aufgrund der Regelung des Kartuschendruckniveaus durch Unterschiede

de im Kartuschenfüllstand nicht signifikant beeinträchtigt wird. Die Auswirkungen unterschiedlicher Kartuschenfüllstände und somit auch eine bei der Kalibrierung stattfindende zwangsweise Kartuschenentleerung sind folglich vernachlässigbar.

Die in Abbildung 6.3 rechts stehende Grafik induziert weiterhin, dass auch der Ablösevorgang reproduzierbar ist, denn der maximale Variationskoeffizient der Mittelwerte aller gemessener, einem bestimmten Dosierdruck zuordenbarer Volumina beträgt weniger als $s_K=5\%$.

Beim Variationskoeffizienten handelt es sich um eine statistische Größe, die sich aus der Varianz s und dem Mittelwert \bar{M} der zu Grunde gelegten Messwerte zu

$$s_K = \frac{s}{\bar{M}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}}{\bar{M}} \cdot 100\% \quad (6.8)$$

ergibt. Insgesamt ist aus den Untersuchungsergebnissen schließbar, dass die vorgestellte Methode zur Kalibrierung des Durchflusssensors geeignet ist und eine Prozessstreuung von weniger als $s_K=5\%$ für den Gesamtprozess zu erwarten ist.

Bevor jedoch die eigentliche Sensorkennlinie aufgenommen werden kann gilt es eine Einschränkung zu beachten, die seitens der Belastbarkeit des Durchflusssensors besteht. Hervorgerufen durch seinen Aufbau ist der Sensor nicht mit Drücken größer 2 bar dauerhaft belastbar /HSG-04/. Um eine Schädigung des Sensors ausschließen zu können, wird der Druckbereich auf 0 bis 1,5 bar Überdruck beschränkt. Dieses Intervall wiederum ist zur Kennlinienermittlung in weitere Teilintervalle zu untergliedern. Dazu prädestinieren sich 14 Teilintervalle der Breite 0,1 bar. An den Grenzen der Teilintervalle werden jeweils fünf Messwerte zur Bestimmung eines repräsentativen Mittelwerts aufgenommen.

Die Tatsache, dass die Messungen nicht zur Auffindung unbekannter Prozessparameter dienen, sondern im Gegenteil die negativen Einflüsse auf den Dosier- und Ablöseprozess bekannt sind, erlaubt eine derartige Reduktion der Messvorgänge. Die Werte der so ermittelten Sensorkennlinie für das hochviskose Öl SHC 639 sind dem linken Bereich der Abbildung 6.4 zu entnehmen.

Die Variationskoeffizienten der abgebildeten Messwerte liegen zwischen $s_K=0,5$ und

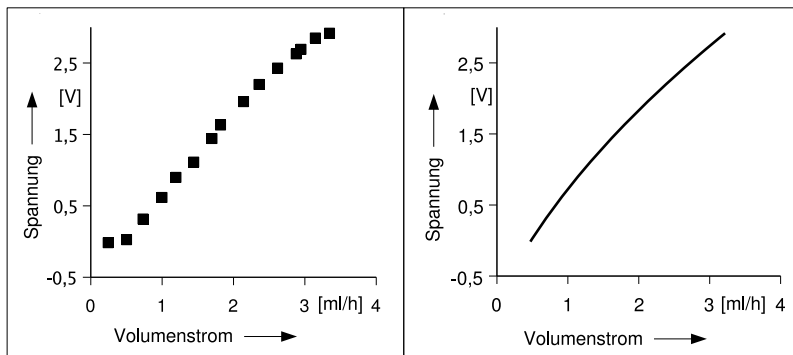


Abbildung 6.4: Kalibrierwerte und sich ergebender Regressionsfunktionsverlauf der Durchflusssensorkennlinie

$s_K=4,9\%$. Zur Verwendung der diskreten Messwerte in einer kontinuierlichen Regelung des Dosierprozesses ist allerdings noch die Angabe einer geschlossenen Funktion erforderlich, die in das Messprogramm implementierbar ist. Die Ermittlung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Sensorspannung U und Volumenstrom \dot{V} ist durch eine Regressionsanalyse möglich. Bei diesem mathematischen Verfahren werden die unbekanntenen Koeffizienten einer vorgegebenen Regressionsfunktion unter Verwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt /VOS-04/. Bei Wahl einer Polynomfunktion zweiter Ordnung der Form

$$\dot{V} = a_2 U^2 + a_1 U + a_0, \quad (6.9)$$

wobei der Volumenstrom in $\left[\frac{\text{ml}}{\text{h}}\right]$ und die Sensorspannung in $[\text{V}]$ anzugeben sind, liefert die Regressionsanalyse folgende Koeffizienten

$$a_0 = 0,481342,$$

$$a_1 = 0,643711,$$

$$a_2 = 0,100868.$$

Der sich ergebende Verlauf der Regressionsfunktion ist im rechten Bereich von Abbildung 6.4 dem gemessenen Verlauf gegenübergestellt.

Auffällig ist, dass die ermittelte Kennlinie einen Offset zeigt. Der Sensorspannung 0 V wird folglich nicht der Massenstrom $0 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ zugeordnet. Dieser offensichtliche Widerspruch ist darauf zurückzuführen, dass die enge Anordnung von Thermosensoren und Heizelement bedingt, dass der im ruhenden Fluid stattfindende Wärmetransport das Vorhandensein einer rückwärtig gerichteten Strömung vortäuscht. In der Messsoftware ist dieses Problem durch eine Offsetkorrektur in Form einer Koordinatentranslation zu beheben.

Als Konsequenz für die nachfolgend durchzuführenden Versuche ist allerdings abzuleiten, dass unmittelbar nach Ausbleiben einer Fluidströmung im System der Sensor zur Vermeidung falscher Messwerte abzuschalten ist.

6.3 Versuchsdurchführung

6.3.1 Validierung der kontinuierlichen Dosierprozessregelung

Die Validierung des theoretisch erarbeiteten Regelungskonzepts zur kontinuierlichen Dosierung setzt entsprechend Kapitel 4 zunächst die Spezifikation eines Arbeitspunkts voraus, in dem das Dosiersystem zu betreiben ist. Der im vorgegebenen Arbeitspunkt gültige Zustandsvektor sowie die Werte der Eingangs- und Ausgangsgrößen ergeben sich nach Festlegung des Dosiervolumenstroms durch Auswertung der Beziehungen 4.44 bis 4.48. Dabei ist jedoch die infolge der maximalen Belastbarkeit der Durchflusssensormembran gegebene Einschränkung des Dosiervolumenstroms auf die in Abbildung 6.4 dargestellten Werte zu beachten.

Im Anschluss an die Arbeitspunktbestimmung ist eine entsprechend Kapitel 4 zur Festlegung der Regelstrategie ebenfalls erforderliche Untersuchung der Arbeitspunktstabilität durchzuführen. Hierzu sind die errechneten Werte der Zustandsgrößen in die linearisierten Systemgleichungen 4.51 und 4.52 einzusetzen und die Eigenwerte der Dynamikmatrix A zu ermitteln. Ihre Vorzeichen geben Aufschluss

über die Systemstabilität im Arbeitspunkt; sind sie durchweg negativ, so ist der analysierte Arbeitspunkt stabil. Existiert jedoch ein positives Vorzeichen so ist er instabil.

Für die Menge der im Rahmen der Validierungsuntersuchungen betrachteten Arbeitspunkte ergeben sich keine positiven, instabilen Eigenwerte, so dass die in Kapitel 4 vorgeschlagene Zustandsrückführung zur Systemstabilisierung unberücksichtigt bleiben kann. Die Regelung zur Gewährleistung eines konstanten Dosiermediensstroms besteht ergo aus einer Ausgangsrückführung.

Bei den Validierungsuntersuchungen ist ferner zu beachten, dass der entworfene Regler ausschließlich in unmittelbarer Umgebung des Arbeitspunkts betrieben werden darf. Der Arbeitspunkt selbst ist im gesteuerten Betrieb anzufahren, was durch Vorgabe des sich aus der Lösung von Gleichung 4.48 ergebenden Spannungswerts für die Stellgröße u am Proportionaldruckregelventil erfolgt. Ein aus der Anwendung dieser Methodik resultierendes Volumenstromsignal zeigt Abbildung 6.5.

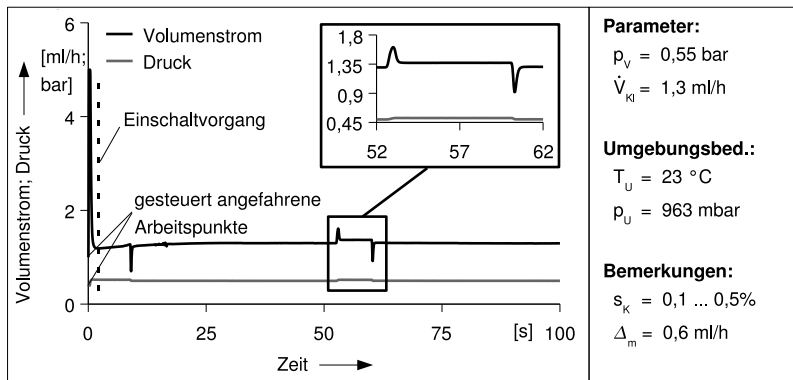


Abbildung 6.5: Kontinuierliche Dosierung - Ergebnisse der experimentellen Validierung

Obenstehende Abbildung verdeutlicht, dass der zunächst gesteuert angefahrne Arbeitspunkt und der später im Reglerbetrieb erreichte Punkt um zirka 10 % diffe-

rieren. Diese Abweichung zwischen dem theoretischen und dem tatsächlichen Wert ist auf Ungenauigkeiten in der Modellbildung des Prozesses zurückzuführen. Der in den Strömungskanal eingebaute Volumenstromsensor ruft einen zusätzlichen Druckabfall im Dosierwerkzeug hervor, welcher im Prozessmodell nicht berücksichtigt ist. Der entworfene Regler korrigiert diese Abweichung jedoch unmittelbar nach seiner Inbetriebnahme.

Weiterhin auffällig ist, dass das Proportionaldruckregelventil Ein- und Ausschaltvorgänge mit einer bestimmten Frequenz vornimmt. Diese äußern sich in zirka 1%igen Schwankungen des Versorgungsdruckniveaus und infolge der hohen Sensitivität des Durchflusssensors in deutlichen Spitzen des Volumenstromsignals. Aus diesem Grund ist der rechnerisch ermittelte Verstärkungsfaktor des Reglers experimentell zu adaptieren. Dadurch wird einerseits die Schalthäufigkeit reduziert und die Genauigkeit erhöht, andererseits aber die Systemdynamik gemindert, weshalb ein Kompromiss zwischen Regelgeschwindigkeit und Genauigkeit zu treffen ist.

Unter optimierten Betriebsbedingungen ergibt sich aus den Versuchen eine maximale Schwankungsbreite der gemessenen Volumenstromsignale des Kennlinienbereichs gegenüber dem Sollwert von $\Delta_m = 0,6 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$. Dieser zunächst sehr hoch erscheinende Wert ist auf die stattfindenden, nur schwer beeinflussbaren Ventilschaltvorgänge des Proportionaldruckregelventils zurückführbar. Aus Abbildung 6.5 geht jedoch hervor, dass es sich bei den Abweichungen lediglich um kurze Signalspitzen von zirka 0,5 s Dauer handelt - signifikante Auswirkungen auf die Dosiererergebnisse sind folglich nicht zu erwarten. Dies bestätigt eine Berechnung der maximalen Variationskoeffizienten für die gemessenen und zeitlich gemittelten Volumenströme in Bezug auf den Sollwert, die weniger als $s_K = 0,5 \%$ betragen.

6.3.2 Validierung der diskontinuierlichen Dosierprozessregelung

Ehe der experimentelle Gültigkeitsnachweis für die in Kapitel 4 erörterte Regelung der diskontinuierlichen Dosierung erbringbar ist, muss zunächst der Verstärkungs-

faktor des vorgesehenen P-Reglers determiniert werden. Die Festlegung des Reglerverstärkungsfaktors ist durch rechnerische Untersuchungen zum Systemverhalten des geschlossenen Regelkreises durchführbar. Dazu ist in einer geeigneten Software, hier MATLAB, ein Modell des Zeit-Druck Dosierprozesses zu implementieren, das sowohl die Gleichungen 4.20 bis 4.24 als auch die Gleichungen 4.39 bis 4.43 und den P-Regler umfasst. Mögliche Werte für den Verstärkungsfaktor sind anschließend, durch Simulation des Systemverhaltens, für Dosierdrücke bis zu 2 bar und Dosierkapillaren bis 330 μm Durchmesser zu bestimmen. Unter den genannten Voraussetzungen ergeben sich für den Reglerverstärkungsfaktor zulässige Werte von $K_p=0,01$ bis 0,15. Weiter geht aus den Untersuchungen hervor, dass mit einem stabilen Systemverhalten zu rechnen ist und keine bleibenden Regelabweichungen zu erwarten sind. Insgesamt zeigt das System das in Kapitel 4.3.3 erörterte Verhalten. Die aus der Rechnersimulation bekannten Reglerverstärkungsfaktoren sind aber aufgrund des im vorigen Abschnitt diskutierten Ventilschaltverhaltens noch experimentell zu adaptieren. Zudem ist die aufgrund der maximalen Sensorbelastbarkeit bestehende Einschränkung in Bezug auf eine maximal zulässige Stellgröße von 1,5 bar zu beachten. Theoretisch bestünde die Möglichkeit, dass der Regler Stellsignale generiert, die den zulässigen Stellbereich überschreiten. Damit würden Druckniveaus am Proportionaldruckregelventil bewirkt, die zur Beschädigung des Durchflusssensors führen.

Um zu verhindern, dass Auslegungsfehler oder Störungen im Betrieb Beeinträchtigungen des Sensors hervorrufen, ist eine softwareseitige Stellgrößenbeschränkung vorzusehen. Diese limitiert den maximalen Dosierdruck auf 1,5 bar. Mit derartigen Stellgrößenbeschränkungen ist im Allgemeinen aber das Problem verbunden, dass sie Instabilitäten des Regelkreises hervorrufen können. Demzufolge ist vor den Validierungsuntersuchungen das Stabilitätsverhalten des Systems mit Stellgrößenbeschränkung zu untersuchen.

Aus den hierzu durchgeführten Untersuchungen ergibt sich jedoch, dass die vorgenommenen Reglereinstellungen nicht zu instabilem Regelverhalten führen. Es zeigt

sich allerdings, dass die Systemdynamik aufgrund des maximal zulässigen Druckwerts von 1,5 bar und der hohen Strömungswiderstände beschränkt ist. Bei der Dosierung kleiner Volumina wirkt sich dies aber nicht signifikant auf die Ausbringdauer aus.

Im Anschluss an die Absicherung der einwandfreien Funktionsweise des Regelsystems sind letztlich die Validierungsuntersuchungen durchführbar. Korrespondierend zur Erstellung der Kalibrierkennlinie des Durchflusssensors erfolgt ebenfalls die fünfmalige Dosierung einer bestimmten Menge des hochviskosen Öls und die anschließende Ermittlung des Mittelwerts der dosierten Volumina. Eine Übersicht der erzielten Ergebnisse enthält Abbildung 6.6.

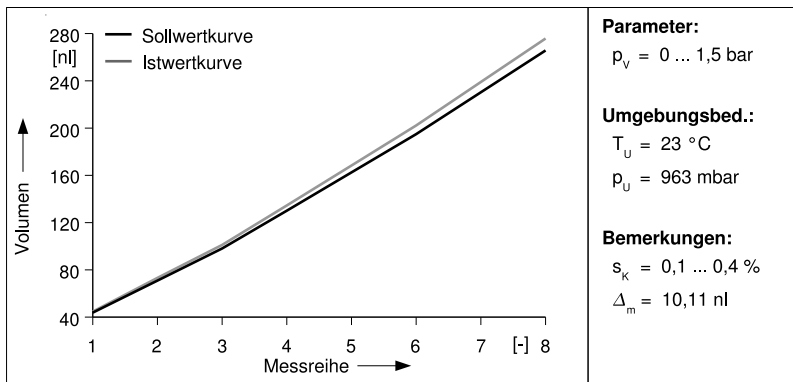


Abbildung 6.6: Diskontinuierliche Dosierung - Ergebnisse der experimentellen Validierung

Die dargestellten Soll- und Istkurven der Volumina in Abbildung 6.6 zeigen eine maximale Abweichung von $\Delta_m=10,11 \text{ nl}$. Die Variationskoeffizienten der Messwerte für ein vorgegebenes Volumen liegen zwischen $s_K=0,1$ und $s_K=0,4 \%$. Insgesamt zeigen die Messwerte eine sehr gute Übereinstimmung von Soll- und Istwerten sowie äußerst geringe Streuungen.

6.4 Folgerungen aus den Ergebnissen der Validierungsuntersuchungen

Die Ergebnisse der Validierungsuntersuchungen bestätigen die Einsatzmöglichkeit der entwickelten Prozessregelungen für Dosieranwendungen, welche höchste Ansprüche hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Genauigkeit stellen. Unter Einsatz des für die Versuche zur Determinierung der Prozessregelungseigenschaften gewählten hochviskosen Öls des Typs SHC 639 ist nachweisbar, dass anhand der entwickelten Prozessregelungen eine hohe Reproduzierbarkeit der Dosiererergebnisse erreichbar ist. Werte der Variationskoeffizienten zwischen $s_K=0,1$ und $s_K=0,5$ % für die bei der kontinuierlichen sowie diskontinuierlichen Dosierung aufgenommenen Messwerte bestätigen dies.

Auch unter Verwendung von hochviskosen Klebstoffen ist mit einer wesentlich geringeren Streuung der geregelten Zeit-Druck Dosierprozesse zu rechnen, als sie der Stand der Technik gemäß Abbildung 2.4 für unregelte Zeit-Druck Dosierprozesse ausweist. Die exakte Steigerung für unterschiedliche Klebstoffarten zu prognostizieren, ist aber diffizil. Hierzu wäre die Kenntnis der Schwankungsbreite der den Wärmeübergang bestimmenden Klebstoffkennwerte über die Dauer eines Kartuschenentleerungszyklus notwendig, da sie beim eingesetzten thermischen Durchflussmessprinzip die erreichbare Messgenauigkeit determinieren. Die Schwankungsbreite ist von der Klebstoffzusammensetzung abhängig und meist unbekannt. Fluktuiert sie nur geringfügig, so sind die gewonnenen Referenzwerte direkt übertragbar.

Die erzielbare absolute Genauigkeit der Verfahren geht aus Abbildung 6.3 hervor. Sie ist besser als $s_K=5$ % und weitestgehend durch das Kalibrierverfahren bestimmt. Dessen Verbesserung führt folglich zur Erhöhung der absoluten Genauigkeit und zu einer besseren Annäherung an den wahren Wert des kontinuierlich beziehungsweise diskontinuierlich zu dosierenden Volumens. Die bei der prozessgeregelten Dosierung erreichbare Genauigkeit ist also durch eine Reduktion der Streuungen jener Messwerte zu verringern, die zur Kennlinienerstellung herangezogen werden.

In toto ist festzuhalten, dass die bei unregelmäßigen Zeit-Druck Dossierprozessen analog Kapitel 2 bestehenden Defizite, im Hinblick auf Reproduzierbarkeit sowie Genauigkeit, durch die getroffenen Prozessregelungsmaßnahmen zu beseitigen sind, und eine Realisierung des Dossierwerkzeugs erfolgen kann.

Kapitel 7

Umsetzung und Erprobung des Pilotwerkzeugs

7.1 Aufbau des Pilotwerkzeugs

Um die in Kapitel 4 entwickelten und in Kapitel 6 experimentell validierten Dosierprozessregelungen für Anwendungen in der hybriden Mikromontage nutzbar zu machen, ist deren Umsetzung in einem Dosierwerkzeug unumgänglich. Dieses muss sämtliche in Kapitel 5 erarbeiteten Sensorikkonzepte sowie das ausgearbeitete Aktorikkonzept derart vereinen, dass eine einfache Austauschbarkeit aller Komponenten gewährleistet wird.

Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass Modifikationen der Kartusche unzulässig sind. Mit der Verwendung eines speziellen Bevorratungsbehälters ginge unmittelbar eine Umfüllung des Klebstoffs und damit die Möglichkeit zum ungewollten Gasblaseneinbruch einher. Auf Grund dessen verbleiben die Kartusche und des Weiteren auch die Druckluftzuleitung sowie die Einwegdosierkapillaren als Standardkomponenten im Dosierwerkzeug.

Neu entworfen ist der die Kartusche verschließende Deckel und der in die Druckluftzuleitung einsetzbare Adapter. Beide Komponenten beinhalten einen Absolutdruck-

sensor zur Erfassung der herrschenden Druckniveaus.

Als Aktor kommt ein Proportionaldruckregelventil vom Typ PRA10-1000 /AIR-07/ zum Einsatz. Im Gegensatz zu marktgängigen Zeit-Druck Dosiersystemen kann damit die Steuerung der Druckniveaus direkt am Dosierwerkzeug erfolgen - zusätzliche externe Steuergeräte sind obsolet. Das vollständige Dosierwerkzeug zeigt Abbildung 7.1.

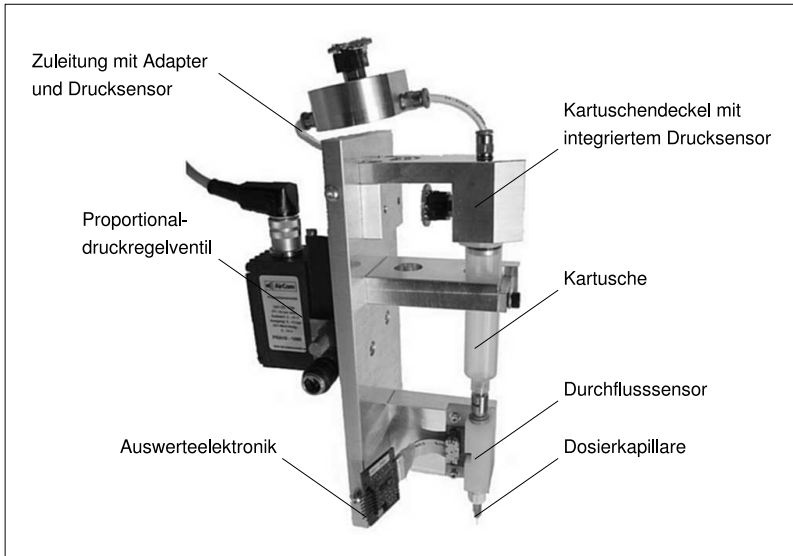


Abbildung 7.1: Aufbau des neu entwickelten Zeit-Druck Dosierwerkzeugs zur prozessgeregelten Mikrodosierung hochviskoser Klebstoffe

Seine Abmessungen betragen $220 \times 155 \times 80 \text{ mm}^3$ und übersteigen jene kommerziell erhältlicher Zeit-Druck Dosiersysteme nur unwesentlich. Durch Einsatz eines höhenverstellbaren Kartuschendeckels wird zudem die einfache Austauschbarkeit aller Komponenten insbesondere aber der Kartusche gewährleistet.

Nach Anbringung des Dosierwerkzeugs an einen Mikromontageroboter oder eine

hochpräzise Linearachse ist es zur geregelten Klebstoffdosierung und zur Applikation der zugeteilten Mengen einsetzbar. Die Kopplung des Dosierwerkzeugs und der Druckluftversorgung erfolgt mittels des in Abbildung 7.1 ersichtlichen, am Proportionaldruckregelventil vorhandenen, Druckluftanschlusses. Zur Sicherstellung der notwendigen elektrischen Betriebsspannung für Aktorik und Sensorik ist eine Versorgungsspannung von 24 V bereitzustellen.

Im Anschluss kann die Vorgabe des Sollwerts für den Dosiervolumenstrom beziehungsweise das Dosiervolumen anhand der Bedienoberfläche der Steuerungssoftware erfolgen. Entsprechend der softwareseitig ermittelten Stellgröße findet ein Druckaufbau oder -abbau in den Komponenten Proportionaldruckregelventil, Druckluftzuleitung und Kartusche statt. Dies ergibt sich durch die sich einstellende Luftströmung bis das augenblicklich zur Dosierung des Klebstoffs benötigte Druckniveau eingestellt, und der Sollwert des Dosiervolumenstroms beziehungsweise des Dosiervolumens erreicht ist.

7.2 Ansteuerung des Pilotwerkzeugs

Ergänzend zur konstruktiven Ausarbeitung des Dosierwerkzeugs muss eine Steuerungssoftware erstellt werden. Diese soll dem Benutzer die Möglichkeit bieten, auf einfache Art und Weise mit ihr zu interagieren. Elementare Einstellungen wie die Angabe der Dosierwerkzeugkonfiguration oder der auszubringenden Volumenströme beziehungsweise Volumina müssen vornehmbar sein.

In puncto Dosierwerkzeugbetrieb hingegen stehen die prozessnahen Funktionen im Vordergrund. Ihnen kommt die Aufgabe zu, auf Basis der entwickelten Regelgesetze aus den aufgenommenen Messsignalen Stellsignale zu berechnen. Die dazu hinterlegten Parameter dürfen, um eine korrekte Funktionsweise des Dosierwerkzeugs gewährleisten zu können, durch den Benutzer nicht manipulierbar sein. Eine strikte Trennung zwischen Verwaltungs- und Prozessfunktionen ist somit nahe liegend. Die sich daraus ergebende Steuerungsarchitektur zeigt Abbildung 7.2.

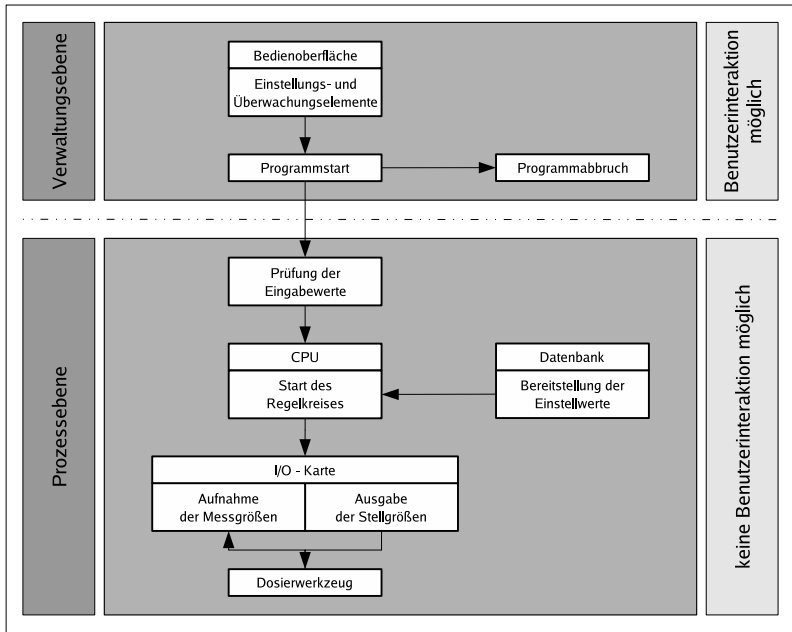


Abbildung 7.2: Struktur der Steuerungssoftware des prozessgeregelten Zeit-
Druck Dosierwerkzeugs

Ihre Umsetzung erfolgt auf PC-Basis unter Verwendung des Programmsystems Lab-View. Dieses erlaubt sowohl die Programmierung der auf Verwaltungsebene notwendigen Bedienoberfläche als auch der auf Prozessebene unabdingbaren Signalverarbeitungsfunktionen.

Die Bedienoberfläche der Ansteuerungssoftware ist so gestaltet, dass sie lediglich Elemente zur Anzeige oder Eingabe benutzerrelevanter Informationen und Schaltelemente zum Start beziehungsweise Stopp des Dosiervorgangs enthält. Startet der Benutzer den Dosiervorgang, so werden die von ihm eingegebenen Werte oder vorgenommenen Einstellungen zunächst auf Sinnhaftigkeit überprüft. Stellen sich die überprüften Werte als plausibel heraus, erfolgt ihre Weitergabe an Routinen zur

Werkzeugansteuerung auf Prozessebene.

Dort übernehmen Funktionen die Parameter, zu deren Funktionalitäten sowohl die Berechnung der Stellgrößen anhand der angegebenen Regelgesetze als auch die korrekte Parametrisierung der Regler zählt. Sie ermitteln aus einer Datenbank zuerst deren Einstellparameter, übermitteln diese an die Reglerfunktionen und starten dann den Dosierprozess.

Um dem Benutzer trotz der beschriebenen Trennung von Verwaltungs- und Prozessebene einen Eindruck vom Prozessverlauf zu vermitteln, kommen auf der Bedienoberfläche die aufgenommenen Messsignale zur Darstellung (Abbildung 7.3).

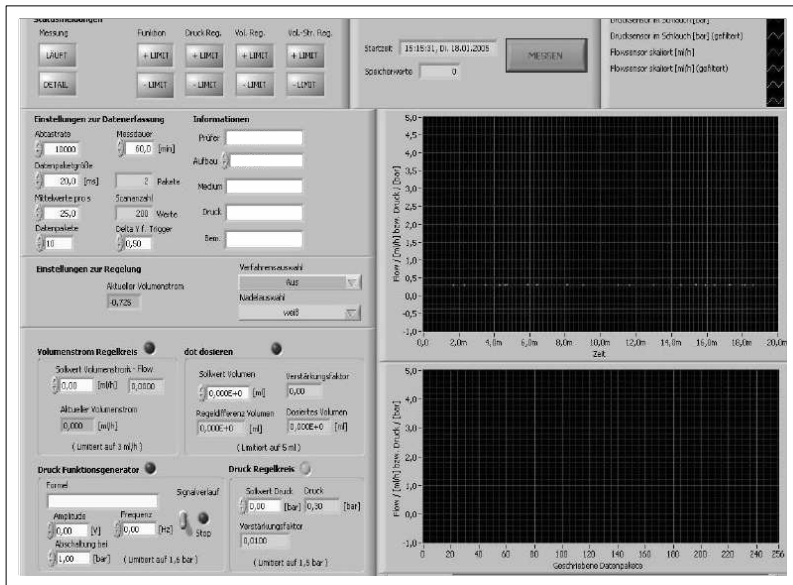


Abbildung 7.3: Bildschirmoberfläche der Steuerungssoftware inklusive Messsignalanzeigen

7.3 Erprobung des Gesamtsystems

Zur Erprobung des entworfenen Gesamtsystems - bestehend aus Dosierwerkzeug und Ansteuerung - werden abschließend Untersuchungen zur kontinuierlichen und diskontinuierlichen Dosierung des hochviskosen SMT-Klebstoffs Typ PD 955 M /HER-07-1/ durchgeführt. Ziel dieser Betrachtungen ist es nachzuweisen, dass eine einwandfreie Funktion aller Systemkomponenten auch unter Verwendung eines hochviskosen Klebstoffs als Dosiermedium gegeben ist.

Aus den Kapiteln 3 und 4 geht hervor, dass die Fließeigenschaften des Klebstoffs Eingang in die Verfahren zur kontinuierlichen und diskontinuierlichen Dosierprozessregelung finden, weshalb Abbildung 7.4 eine Übersicht der charakteristischen Kennwerte des hochviskosen Klebstoffs PD 955 M enthält.

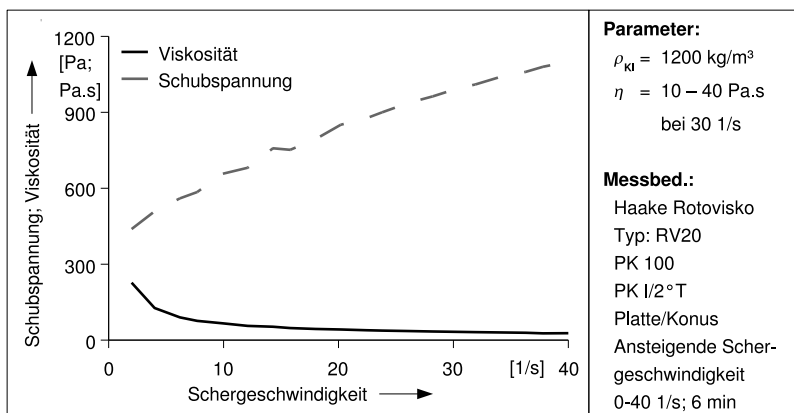


Abbildung 7.4: Kennwerte des Klebstoffs Typ PD 955 M bei $\vartheta_{Kl}=23 \text{ }^\circ\text{C}$

Nach Einarbeitung der Viskositätskennlinie in das Modell des Dosierprozesses, der rechnerischen Ermittlung und experimentellen Adaption der Reglerverstärkungsfaktoren erfolgen die Klebstoffdosiervorgänge. Ausschnitte aus dem Verlauf je eines, mit einer Dosierkapillare von 330 beziehungsweise 210 μm Innendurchmesser vorgenommenen, kontinuierlichen und diskontinuierlichen Dosiervorgangs sowie die zu-

gehörigen Messsignalverläufe zeigt Abbildung 7.5.

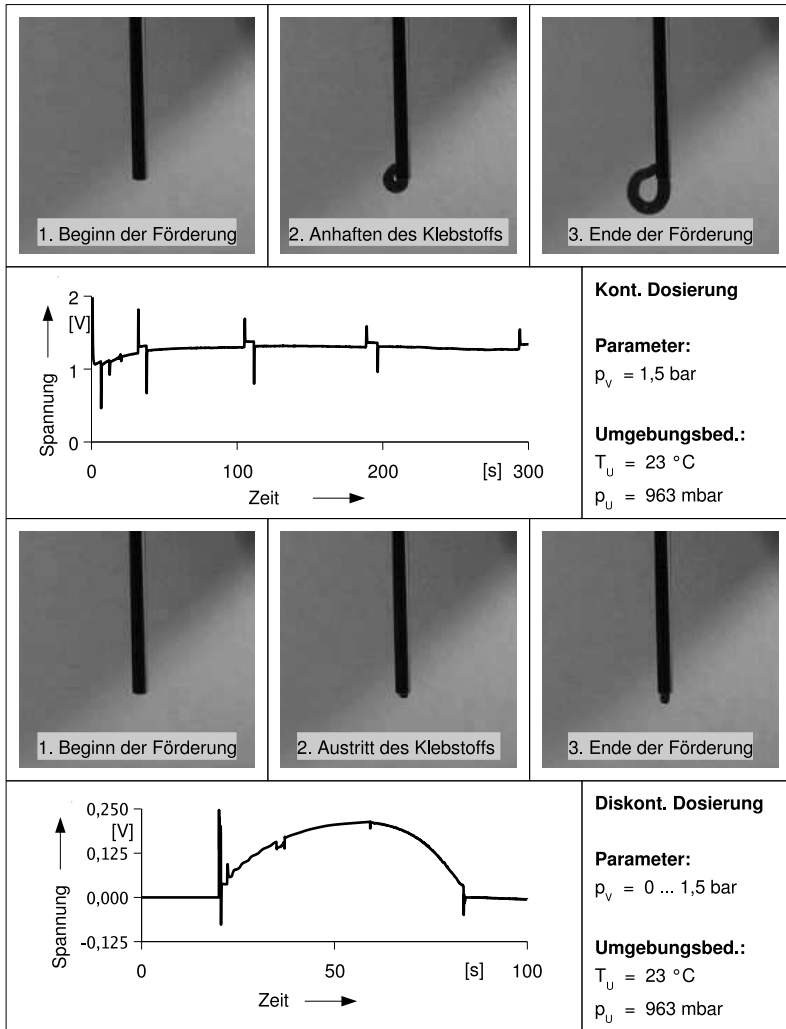


Abbildung 7.5: Prozessverlauf bei der kontinuierlichen und diskontinuierlichen Dosierung des hochviskosen Klebstoffs PD 955 M

Die Darstellungen in Abbildung 7.5 verdeutlichen, dass die Kombination aus neu entwickeltem Dosierwerkzeug und Ansteuerung die Dosierung kleinster Mengen hochviskoser Klebstoffe ermöglicht.

Weiterführende Untersuchungen zum Dosierverhalten, die eine Kalibrierung des Systems auf das Dosierfluid PD 955 M bedingen, konnten allerdings nicht vorgenommen werden. Der prototypische Charakter des Durchflusssensors verhindert dies. Die Fixierung der Sensormembran im Teflongehäuse des Prototyps erfolgt mit einem Klebstoff der nicht resistent gegenüber aggressiven Lösungsmitteln wie Aceton ist /HSG-04/. Zur rückstandsfreien Entfernung des verwendeten hochviskosen Klebstoffs PD 955 M aus dem Strömungskanal ist der Einsatz von Aceton hingegen notwendig. Andere Lösungsmittel ermöglichen es nicht, den zu dosierenden Klebstoff rückstandsfrei zu entfernen.

Aceton allerdings führt bei seiner Verwendung zum Aufquellen der Klebverbindung zwischen Sensormembran und Teflongehäuse und schädigt sie irreversibel, wodurch der Durchflusssensor unbrauchbar wird. Aus diesem Grund bleiben die vorgestellten Untersuchungen auf die Machbarkeit der Klebstoffdosierung beschränkt.

Unter den eingangs getroffenen Annahmen einer Klebstoffentgasung und der Verwendung eines kalibrierten Durchflusssensors sind aber im späteren Systembetrieb keine signifikanten Unterschiede zu den in Kapitel 6 erzielten Ergebnissen zu erwarten. Die in Abbildung 7.5 dargestellten Messsignale weisen gleiche Verläufe und dasselbe qualitative Verhalten auf wie die in Kapitel 6 diskutierten.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Das Anwendungsspektrum hochviskoser Klebstoffe erstreckt sich über die Herstellung einfacher stoffschlüssiger Verbindungen zwischen Bauteilen hinaus bis hin zu deren elektrischer oder thermischer Kontaktierung. Als problematisch dabei erweist sich in zunehmendem Maße die stetige Dezimierung der Bauteilabmessungen. Damit geht eine überproportionale Reduktion bei der Applikation von Klebstofflinien kontinuierlich zu dosierender Klebstoffvolumenströme und bei der Applikation von Klebstoffpunkten diskontinuierlich zu dosierender Klebstoffvolumina einher. Diese sind häufig nicht mehr mit ausreichender Reproduzierbarkeit und Genauigkeit zu erzeugen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war demzufolge die Angabe von Regelgesetzen zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit und Genauigkeit von Zeit-Druck Dosierprozessen. Des Weiteren sollte ein Werkzeug zur prozessgeregelten Zeit-Druck Dosierung einschließlich der hierzu erforderlichen Steuerungssoftware konzipiert und realisiert werden.

Ausgehend von einer Betrachtung des Stands der Technik bei Dispensverfahren wurde durch Analyse von Marktdaten das Zeit-Druck Dispens- respektive Dosierverfahren als das bedeutendste Verfahren zur Dosierung kleinster Mengen hochviskoser Klebstoffe identifiziert. Anhand repräsentativer Anwendungsbeispiele der hybriden Mikromontage konnten zudem an die kontinuierliche und diskontinuierliche Zeit-

Druck Dosierung gestellte Anforderungen aufgezeigt werden. Dabei erwiesen sich Prozessstreuungen von 2,8 % bei der kontinuierlichen Dosierung von Klebstofflinien und 8,3 % bei der diskontinuierlichen Dosierung von Klebstoffpunkten als zulässige Maximalwerte.

Darauf aufbauend erfolgte die Ableitung von Problemstellungen, die im Rahmen der durchgeführten Entwicklungen gelöst wurden. Diese bestanden aus der Angabe eines vollständigen, mathematischen Modells des Zeit-Druck Dosierprozesses, das auch die Temperaturentwicklung im Dosiersystem sowie das nichtlineare Klebstofffließverhalten berücksichtigt. Zudem umfassten sie die Entwicklung eines Arbeitspunktreglers zur Regelung der kontinuierlichen und eines ausgangsrückführenden Reglers zur Regelung der diskontinuierlichen Klebstoffdosierung.

Die Problemstellungen in Bezug auf die mathematische Modellbildung wurden durch Ableiten eines Differenzialgleichungssystems zur Berechnung des instationären Kartuschenlufttemperaturverlaufs sowie einer Differenzialgleichung zur Charakterisierung der instationären Klebstoffströmung nichtlinearen Fließverhaltens in der Dosierkapillare gelöst. Mittels des vollständigen Prozessmodells erfolgte danach die Entwicklung eines Arbeitspunktreglers zur Regelung der kontinuierlichen Klebstoffdosierung. Für die diskontinuierliche Klebstoffdosierung wurde ein ausgangsrückführender Regler zur Beseitigung der bestehenden Defizite hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Genauigkeit entwickelt.

Anschließend konnten, zur Umsetzung der entworfenen Regelungen notwendige, alternative Lösungskonzepte zur gezielten, kontinuierlichen Beeinflussung des Zeit-Druck Dosierprozesses sowie zur Erfassung der erforderlichen Messgrößen Druck und Volumenstrom erarbeitet und die geeignetsten bestimmt werden.

Die Verifikation der neu entwickelten Prozessregelungen und erarbeiteten Lösungskonzepte zur Prozessüberwachung und -ansteuerung erfolgte durch experimentelle Untersuchungen unter Verwendung des hochviskosen Öls Typ SHC 639 als Ersatzmedium. Es zeigte sich, dass die entworfenen Regler die gestellten Anforderungen erfüllen. Die Untersuchungen verdeutlichten, dass sowohl bei der kontinuierlichen als

auch diskontinuierlichen Dosierung die Reproduzierbarkeit der Dosierwerte signifikant erhöht werden konnte. Sie war aufgrund der durchgeführten Entwicklungen auf weniger als 0,5 %, bei einer Genauigkeit besser 5 %, reduzierbar. Damit sind auch die bei der kontinuierlichen sowie diskontinuierlichen Klebstoffapplikation an Zeit-Druck Dosierprozesse gestellten Anforderungen zu saturieren.

Ferner ermöglichten die beschriebenen Entwicklungen eine Erweiterung des in geregelten Zeit-Druck Dosierprozessen reproduzierbar erzeugbaren Dosierspektrums um $23 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$ bei der kontinuierlichen Dosierung und 160 ml bei der diskontinuierlichen Dosierung.

Mit der abschließenden Umsetzung der Verfahren in einem geregelten Zeit-Druck Dosierwerkzeug wurde die technische Machbarkeit der prozessgeregelten Dosierung hochviskoser Klebstoffe am Beispiel des Klebstoffs vom Typ PD 955 M nachgewiesen.

Der Einsatz der entwickelten Verfahren in industriellen Anwendungen, bei denen die reproduzierbare Dosierung kleinster Mengen hochviskoser Klebstoffe im Vordergrund steht, ist durch Weiterentwicklung von Ansteuerung, Dosierwerkzeug und Durchflusssensor denkbar. Dabei stünden Entwicklungen im Vordergrund die es ermöglichen die Belastbarkeit der Durchflusssensormembran zu steigern, so dass höhere Dosierdrücke realisiert werden können.

Zudem von Interesse sind Untersuchungen zur Reduktion der, unter Verwendung vorstehend beschriebener Prozessregelungen, in Zeit-Druck Dosierprozessen minimal erzielbaren Dosiervolumenströme und -volumina. Des Weiteren wäre die Übertragung der Ergebnisse auf andere Dispens- beziehungsweise Dosierverfahren sowie die Erweiterung der geregelten Dosierprozesse auf geregelte Dispensprozesse sinnvoll, die auch eine Kontrolle des Klebstoffapplikationsprozesses einschließen.

Summary

Process-controlled micro-dosing of highly viscous adhesives

Over the last 25 years, microsystem technology has developed to become a key technology of the first part of the 21st century. With a world market share of approximately 25 billion US dollars forecast for the year 2009 and an anticipated annual rate of increase of 16 %, microsystem technology is one of the world's largest growth markets. The main growth drivers of this development are the industries of IT periphery, bio-medical technology, automotive technology, household and telecommunications.

The strong growth and mounting competition in the field of microsystem technology are gradually stepping up the pressure on companies to manufacture cheaper products under constantly rising quality requirements. The decisive factor in this instance is microsystem assembly: according to surveys, up to 80 % of microsystem manufacturing costs are incurred by assembly. At the same time, assembly processes significantly influence the achievable levels of product quality and reliability.

A core process in the fabrication of substance-to-substance connections in microassembly is bonding. It is often not possible to join microcomponents using other techniques such as welding or soldering. However, the use of adhesives to create substance-to-substance bonds is becoming more and more difficult due to ever-smaller component dimensions. The associated over-proportional reduction in size

frequently results in the inability to ensure adequate levels of reproducibility and accuracy when continuously applying lines or discontinuously applying dots of adhesive.

Based on the current state of the art of adhesive application processes, by analyzing market data it was possible to identify the dispensing process as the most significant process for applying adhesives. On considering the varying dispensing processes that exist, the time-pressure method showed to be the most important dispensing technique. However, the dosing process of the time-pressure dispensing method does not enable the amounts of adhesive fed to be applied with a high degree of reproducibility and accuracy. This results in process scattering levels of approximately 10 %.

The aim of this thesis was therefore to specify control laws to improve reproducibility and accuracy of time-pressure dosing processes. An additional aim was to design and realize a tool and the necessary control software for process-controlled time-pressure dosing.

Firstly, using representative examples of hybrid microassembly application, it was possible to define the requirements of continuous and discontinuous time-pressure dosing. This resulted in maximum permitted process scattering levels of 2.8 % for the continuous dispensing of lines of adhesive and 8.3 % for the discontinuous dispensing of dots of adhesive.

Based on this information, it was possible to identify problems associated with the process which could be solved within the scope of this thesis. This involved defining a complete mathematical model of the time-pressure dosing process which took into account not only the changes in temperature occurring in the dosing system but also the non-linear flow behavior of the adhesive. This also included the development of a working point control unit to regulate the continuous dosing of adhesive and an output control unit to regulate the discontinuous dosing of adhesive.

The problems associated with forming the mathematical model were solved in two ways; first of all, a differential equation system was derived to calculate the transient

temperature of the air in the syringe. Secondly, a differential equation was derived to characterize the transient, non-linear flow behavior of the adhesive in the dispensing capillary. Using the complete process model, a working point control unit was subsequently developed to regulate the continuous dosing of adhesive. To regulate the discontinuous dosing of adhesive, a reproducible output control unit was developed to resolve deficits regarding reproducibility and accuracy.

In order to implement the control units realized, alternative solution approaches were developed to enable the targeted, continuous influence on the time-pressure dosing process and to record the required values of pressure and volume flow. The most suitable solutions were then determined.

The newly-realized process control units as well as the solutions developed for monitoring and steering the processes were verified by carrying out experimental tests using the highly-viscous oil type SHC 639 as a replacement medium. The tests demonstrated that the control units developed were capable of fulfilling requirements and showed that the reproducibility of dispensing results could be significantly increased both for continuous and discontinuous dosing processes. The developments made enabled variations in reproducibility to be reduced to less than 0.5 % with an improved degree of accuracy of over 5 %, thus fulfilling the requirements placed on the continuous and discontinuous application of adhesive using time-pressure dosing processes.

Furthermore, these developments also enabled the reproducible dosing spectrum attainable with controlled time-pressure processes to be extended by 23 ml/h for continuous dosing and 160 nl for discontinuous dosing.

When the techniques were finally implemented in a controlled time-pressure dispensing tool, it was possible to prove the technical feasibility of the process-controlled dosing of highly-viscous adhesives in an example using the type of adhesive PD 955 M.

If the control, dispensing tool and the volumetric flow sensor are further developed, it is conceivable that the technique developed could be implemented in industrial

applications requiring the reproducible dosing of tiny volumes of highly-viscous adhesive. The main focus of interest should be on increasing the load capacity of the flow sensor membrane in order to enable higher working pressures and thus reduce dosing times.

Another interesting aspect would be to carry out further investigations using the above-mentioned process control units with the aim of reducing minimum dispensing flow rates and volumes achievable with time-pressure dispensing systems. In addition to this, it would also make sense to transfer these results to other dispensing or dosing techniques, as well as to extend controlled dosing processes to controlled dispensing processes which also possess a feedback control of the adhesive application technique.

Literaturverzeichnis

- [AIR-07] AirCom: Datenblatt. Proportionaldruckventil AirTronic.
Ratingen, 2007 - Firmenschrift
<http://www.aircompneumatik.de> (06.11.2007)
- [ALL-96] Allgöwer, F.:
Näherungsweise Ein-Ausgangs-Linearisierung nichtlinearer Systeme
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996
Zugl. Stuttgart, Univ., Diss., 1996
- [AND-67] Andersen, B. W.:
The Analysis and Design of Pneumatic Systems
New York u. a.: Wiley, 1967
- [ASH-98] Ashauer, M.; u. a.:
Thermal Flow Sensor for Liquids and Gases
In: Proceedings IEEE 11th Annual International Workshop on Micro Electro
Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators,
Machines and Systems, Heidelberg, Germany, January 25th-29th 1998.
New York, USA: IEEE, 1998, S.351-55
- [ASH-98-1] Ashauer, M.; u. a.:
Thermal Flow Sensor for Liquids and Gases
In: Proceedings of Microelectromechanical Systems (MEMS) 1998, Anaheim,
CA, USA, November 15th-20th 1998. New York, USA: ASME, 1998, S. 427-32
- [ASH-01] Ashauer, M.; u. a.:
Thermal flow sensor for very small flow rate
In: Proceedings of 11th International Conference on Solid State Sensors and
Actuators Transducers 01/Euroensors XV, Munich, Germany, June 10th-14th
2001. Berlin, Springer, 2001, S. 1464-67
- [ASH-06] Ashmore, C.:
SMT step by step. Step 5: adhesives/epoxies and dispensing
In: Surface Mount Technology 20 (2006), Nr. 5, S. 34-36

- [ASS-07] Aktiv Sensor: AU Druckmessumformer 1. Generation. Datenblatt
Stahnsdorf, 2007
http://www.aktiv-sensor.de/pdf/dt/AU_2006_06DE.pdf (06.11.2007)
- [BAE-04] Bähr, H. D.; Stephan, K.:
Wärme- und Stoffübertragung
4. Aufl.
Berlin u. a.: Springer, 2004
- [BAR-89] Barnes, H. A.; Hutton, J. F.; Walters, K.:
An Introduction to Rheology
Amsterdam: Elsevier, 1989
- [BAU-99] Bauer, G.; u. a.:
Montagesystem für die Feinwerk- und Mikrotechnik
In: Maschinenmarkt 105 (1999), Nr. 18, S. 30-35
- [BAU-01] Baumbach, J.:
Aufbau- und Verbindungstechnik für kompakte, aktivmatrix-adressierte
Flachbildschirme
Aachen: Shaker, 2002
Zugl. Stuttgart, Univ., Diss., 2001
- [BIE-99] Bierhals, R.; u. a.:
Wirtschaftliche Potenziale der Miniaturisierung aus industrieller Sicht:
Studie, Karlsruhe, Univ., Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, 1999
- [BMB-04] Bundesministerium für Bildung und Forschung:
Mikrosysteme. Rahmenprogramm zur Förderung 2004-2009
Bonn, 2004
- [BOT-03] Botthof, A.; Pelka, J. (Hrsg.):
Mikrosystemtechnik Zukunftsszenarien
1. Aufl.
Berlin u. a.: Springer 2003
- [BOT-04] Borchard Tuch, C.:
Klebstoffe im Brennpunkt der Entwicklung
In: Chemie in unserer Zeit 38 (2004), Nr. 6, S. 437-39
- [BRE-98] Breed, S. R.; Pernice, R. F.:
Stencil printing SMT adhesives: A technology review
In: Proceedings of NEPCON West 98, Anaheim, CA, USA, March 1-5 1998,
Vol. 1
Norwalk: Reed Exhibition, 1998, S. 225-36

- [BRO-05] Brockmann, W.; u. a.:
Klebertechnik Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren
Weinheim u. a.: Wiley-VCH Verlag, 2005
- [CHE-02] Chen, D. X.:
Modeling and off-line control of fluid dispensing for electronics packaging
Ann Arbor, USA: UMI - University Microfilms International, 2002
Saskatoon, Univ. of Saskatchewan, Ph. D. Thesis 2002
- [CHO-99] Koelemeijer Chollet, S.; Jacot, J.:
Cost Efficient Assembly of Microsystems
In: MST-News (1999), Nr. 1, S. 30-32
- [DIL-01] Dilthey, U.; Brandenburg, A.; Möller, M.:
Study of factors influencing the microdosing of unfilled adhesives
In: Journal of Micromechanics and Microengineering 5 (2001) Nr. 5, S. 474-80
- [DIN-81] Norm DIN 19 225 1981-12
Messen, Steuern und Regeln: Benennung und Einteilung von Reglern
- [DIN-94] Norm DIN 19 226-1 1994-02
Leittechnik, Regelungstechnik und Steuerungstechnik: Allgemeine Grundbegriffe
- [DIN-03] Norm DIN 8593-8 2002-09
Fertigungsverfahren Fügen - Teil 8: Kleben
- [DIN-06] Norm DIN-EN 923 2006-01
Klebstoffe - Benennungen und Definitionen; Deutsche Fassung EN 923:2005
- [DIN-07] Norm-Entwurf DIN-EN 923/A1 2007-11
Klebstoffe - Benennungen und Definitionen; Deutsche Fassung EN 923:2005/
prA1:2007
- [DIT-01] Dittmann, D. M.:
Durchflusssensoren aus Kunststoff für sehr kleine Volumenströme auf Basis
des AMADA-Verfahrens
Karlsruhe, Univ., Diss., 2001
- [DIX-97] Dixon, D.; u. a.:
Practical issues concerning dispensing pump technology
In: Circuits Assembly 8 (1997) S. 36-40
- [DIX-97] Dixon, S.; u. a.:
Kleber-Dosierverfahren in Theorie und Praxis
In: Productronic 17 (1997), Nr. 10, S. 38, 40, 42
- [DOE-02] Dörfler, H.-D.:
Grenzflächen und kolloid-disperse Systeme
Berlin u. a.: Springer, 2002

- [DUH-94] Duhm, L.:
Fließverhalten und innerer Strukturaufbau von hochgefüllten Klebstoffsystemen im Hinblick auf technische Verarbeitungsprozesse
Hamburg, Diss. 1994
- [EFD-07] EFD: Dosierkatalog
Pforzheim, 2007 - Firmenschrift
<http://www.glt-pforzheim.de> (06.11.2007)
- [EHR-98] Ehret, P.:
Technologische Entwicklungen in der Mikrosystemtechnik und ihre Bedeutung für den Innovationsprozess in der mittelständischen Wirtschaft
In: Produktionstechnik für Mikrosysteme: Fraunhofer IPA Kongress, 5. und 6. November 1998
Stuttgart: Fraunhofer IPA, 1998, 7 S.
- [FES-07] FESTO: Produktkatalog 2007
Esslingen, 2007 - Firmenschrift
<http://www.festo.de> (06.11.2007)
- [FOE-94] Föllinger, O.; u. a.:
Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendungen
8., überarb. Aufl.
Heidelberg: Hüthig, 1994
- [FRA-04] Fraden, J.:
Handbook of modern sensors, physics, designs and applications
3rd ed.
New York: AIP Press, 2004
- [GAU-03] Gaugel, T.; Wiedenhöfer, M.:
Mikromontage: Stand der Technik, Defizite und Trends in der Mikromontage-
technik. Unveröffentlichte Studie
Stuttgart: Fraunhofer IPA, 2003
- [GAU-04] Gaugel, T.:
Verfahren zum flexiblen Mikrodosieren von isotrop leitfähigen Klebstoffen
Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2004
Zugl. Stuttgart, Univ., Diss. 2003
- [GEN-98] Gengenbach, U.:
In: Entwicklung und Erprobung von fertigungsgerechten Montage- und Füge-
verfahren zum Aufbau von Mikrosystemen / VDI/VDE (Hrsg.). Teltow, 1998,
S.82-100
(Innovationen in der Mikrosystemtechnik 60)
- [GEN-98-1] Gengenbach, U.:
Montagesystem für die Duplexermontage

- In: VDI/VDE Technologiezentrum GmbH (Hrsg.): Entwicklung und Erprobung von fertigungsgerechten Montage- und Fügeverfahren zum Aufbau von Mikrosystemen. Teltow: VDI-VDE IT, 1998, S. 81-100
- [GES-97] Gesang, T.; u. a.:
 Industrieller Einsatz von Verbindungstechniken für die Mikro-/Millimeterwellenkomponenten, Teilvorhaben Klebetechnik
 In: Proceedings Micro-Engineering 97, September 24th-26th 2007, Stuttgart. Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft, 1997, S. 1-8
- [GES-98] Gesang, T.; u. a.:
 Fine-Pitch-Dispensen: Klebstoffe auf den Punkt gebracht
 In: Adhäsion - Kleben & Dichten 42 (1998), Nr. 11, S. 28-33
- [GES-99] Gesang, T.:
 Was eine Klebung zusammenhält (Teil 4)
 In: Adhäsion - Kleben & Dichten 43 (1999), Nr. 1/2, S. 36-37
- [GES-05] Gesang, T.; Netzelmann U.:
 Reproduzierbares Dispensen von Leitklebstoffen im Sub-Nanoliter-Bereich
 In: Adhäsion - Kleben & Dichten 49 (2005), Nr. 3, S. 18-24
- [GIL-97] Gilleo, K.:
 SMT solutions for today. V. Adhesives/epoxies and dispensing
 In: Surface Mount Technology 11 (1997), S. 18-20
- [GOE-05] Götz, J.:
 Dispensen von gefüllten Klebstoffen im Sub-Nanoliter-Bereich in der automatisierten Fertigung
 Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005
 Zugl. Bremen, Univ., Diss., 2005
- [GRU-00] Grünekle, A.:
 Qualitätssteigerung in automatisierten klebtechnischen Fertigungsprozessen durch den Einsatz einer kontinuierlichen Dosierstromregelung
 Aachen: Shaker, 2001
 Zugl. Aachen, RWTH, Diss., 2000
- [GUS-01] Gustin, M.:
 Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik - Leitkleben und Glob Top auf flexiblen Schaltungsträgern
 Bremen, Univ., Diss. 2001
- [HAB-02] Habenicht, G.:
 Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen
 4. erw. Aufl.
 Berlin u. a.: Springer, 2002

- [HAR-77] Harris, J.:
Rheology & non-Newtonian flow
1. ed.
London u. a.: Longman, 1977
- [HER-07] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.:
Physik für Ingenieure
10., vollst. neu bearb. Aufl.
Berlin u. a.: Springer, 2007
- [HER-07-1] Heraeus: PD 955 M SMT-Adhesive. Thermosetting Polymer SMT-Adhesive for High-Speed Dispensing
Hanau, 2007 - Datenblatt
[http://www.wc-heraeus.de/wch2/cmd/e_CMD_home.nsf/\\$webpopup?readform&http://www.wc-heraeus.de/wch2/cmd/e_CMD_Techinfo.nsf/shownews?openform&SMT_Adhesives](http://www.wc-heraeus.de/wch2/cmd/e_CMD_home.nsf/$webpopup?readform&http://www.wc-heraeus.de/wch2/cmd/e_CMD_Techinfo.nsf/shownews?openform&SMT_Adhesives) (06.11.2007)
- [HIL-06] Hilleringmann, U.:
Mikrosystemtechnik Prozessschritte, Technologien, Anwendungen
Wiesbaden: Teubner, 2006
- [HOE-01] Höhn, M.:
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
München: Utz, 2001
Zugl. München, Fakultät für Maschinenwesen, Diss. 2001
- [HSG-04] HSG-IMIT: Sensordatenblatt und Kalibrierkurve.
Villingen-Schwenningen, 2004 - Firmenschrift
- [ISI-89] Isidori, A.:
Nonlinear Control Systems: An introduction
2. ed.
Berlin u. a.: Springer, 1989
- [ISI-95] Isidori, A.:
Nonlinear Control Systems
3. ed.
Berlin u. a.: Springer, 1995
- [JER-98] Jeremias, M.:
Mikromontage von Mikrowellen- und Millimeterwellenmodulen
In: Produktionstechnik für Mikrosysteme
Fraunhofer IPA Kongress 5. und 6. November 1998
Stuttgart: Fraunhofer IPA, 1998, 11 S.
- [KEC-99] Keck, M.:
Silberleitklebstoffe auf den Punkt gebracht
In: Adhäsion - Kleben & Dichten 43 (1999), Nr. 10, S. 12-15

- [KHA-02] Khalil, H. K.:
 Nonlinear systems
 3. ed.
 Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2002
- [KLO-98] Klocke Nanotechnik:
 Assembly and Calibration with Nanometer-Precision (1998)
 Online im Internet: http://www.nanomotor.de/pdf/s-h_e_lo.PDF (10.12.2007)
- [KLO-03] Klocke, V.; Gesang, T.:
 Nanorobotics for Micro Production Technology
 In: Fiber-based Component Fabrication, Testing and Connectorization, Brügge, Belgien, Oktober 29th and 30th 2002. Bellingham Wash. SPIE, 2003 S. 132-41
 (Proceedings of the SPIE 4943)
- [KUH-04] Kuhlenkötter, B.; Gayk, K.:
 Mikrotechnik Fertigung und Handhabung von Geometrien im Mikrometerbereich
 In: wt Werkstattstechnik online 94 (2004), Nr. 11/12, S. 581-85
- [KUL-86] Kulicke, W. M.:
 Fließverhalten von Stoffen und Stoffgemischen
 Basel: Hüthig und Wepf, 1986
- [LEW-99] Lewis, A.; Babiarz, A.:
 Conductive Adhesive Dispensing Process Considerations.
 In: Proceedings of the technical program - NEPCON West'99: Conference: February 21-25, 1999 Anaheim, California.
 Norwalk: Reed Exhibition, 1999, 15 S.
- [LEW-03] Lewis, A.; u. a.:
 Fluid Dispensing Capabilities for Assembly of MEMS
 In: Proceedings Workshop on MEMS sensor packaging, March 20th and 21st 2003, Lungby, DK
 Horsholm: DELTA, 2003
- [LIE-97] Lieske, R.; Quigley, K.:
 Screen Printing bottom side chip attach adhesive
 In: Proceedings of NEPCON West'97: Conference: February 23-27, 1997 Anaheim, California, Vol. 1.
 Norwalk: Reed Exhibition, 1997, S. 167-77
- [LOW-97] Lowry, B. J.; Steen, P. H.:
 Stability of slender liquid bridges subjected to axial flows
 In: Journal of Fluid Mechanics 330 (1997), S. 189-213

- [LUN-04] Lunze, J.:
 Regelungstechnik 1. Systemtheoretische Grundlagen: Analyse und Entwurf
 einschleifiger Regelungen
 4., erw. und überarb. Aufl.
 Berlin u. a.: Springer, 2004
- [MAA-96] Maas, D.; u. a.:
 Fabrication of microcomponents usind adhesive bonding techniques
 In: Proceedings of the Ninth International Workshop on Micro Electromechanical Systems, San Diego, USA, February 11th-15th 1996. New York: IEEE, 1996, S. 331-36
- [MAR-98] Marongelli, S.; u. a.:
 Managing high speed adhesive dispensing
 In: Surface Mount Technology 12 (1998), Nr. 6, S. 50, 52
- [MAR-98-1] Marongelli, S.; u. a.:
 Practical production uses of SMT adhesives
 In: 22nd IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium: IEMT-Europe, Berlin, Germany, April 27th-29th 1998. New York: IEEE, S. 147-155
- [MAR-00] Schutzrecht DE 42 18 064 C2 (1996-04-04):
 Martin GmbH
- [MAR-00-1] Marinelli, C.; Burns, B.:
 Step by step SMT. V. Adhesives/epoxies and dispensing
 In: Surface Mount Technology 14 (2000), Nr. 5, S. 90-92
- [MEZ-00] Mezger, T.:
 Das Rheologie-Handbuch: für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern
 Hannover: Vincentz, 2000
- [MOE-01] Möller, M. U.:
 Mikroapplikation von ungefüllten Klebstoffen zum Kleben in der Mikrotechnik
 Aachen: Shaker Verlag, 2001
 Zugl. Aachen, RWTH, Diss. 2001
- [MOR-01] Morrison, F. A.:
 Understanding Rheology
 Oxford u. a.: Oxford University Press, 2001
- [NES-99] Ness, Q. N.; Lewis, A. R.:
 Best Practices in Surface Mount Adhesive Dispensig
 Carlsbad, CA: Asymptek, 1999
http://www.asymtek.com/news/articles/1999_02_asymtek_best_practices_for_sma.pdf (06.11.2007)

- [NEX-05] Wicht, H. (Mitarb.) u. a.; The NEXUS Association:
Market Analysis for MEMS and Microsystems III 2005-2009: A NEXUS Task
Force Report
Grenoble, Frankreich, 2005
- [NGU-04] Nguon, B.; Jouaneh, M.:
Design and characterization of a precision fluid dispensing valve
In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 24 (2004)
Nr. 3/4, S. 251-60
- [N.N.-91] N. N.:
Ein Tropfen wie der andere. Der Laser kontrolliert den Dosiervorgang
In: Surface Mount Technology 4 (1991), Nr. 7, S. 40, 42-43
- [NOR-97] Norris, M. J.:
Dispensing high speed SMD adhesives, important parameters and process im-
plementation
In: Proceedings of NEPCON West 97, Anaheim, CA, USA, February 23rd-27th
1997 Vol. 1, S. 267-74
- [OKA-04] Okada, F.; Larsen, M.:
Step 5 - adhesives/epoxies & dispensing
In: Surface Mount Technology 18 (2004), Nr. 5, S. 74-77
- [ORT-95] Orthmann, K.; u. a. :
Kleben in der Elektronik. Elektrisch leitende Klebstoffe - Anwendungen, Auf-
bau, Applikation, Qualität, Zuverlässigkeit
Renningen-Malsheim: expert, 1995
- [OSR-06] Stich, Andreas; Lang, Kurt-Jrgen; Sailer, Michael:
Mounting Guideline for Golden DRAGON®with Lens (2006)
Online im Internet: <http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?jsessionid=B3BF4FEE2DDB75A5ADB430E6B1563D3D?act=downloadFile&favOid=020000030003f8de000100b6> (10.12.2007)
- [OTH-04] Othman, N.; Schlenker, D.:
Zuverlässiger Auftrag von hochviskosem Leitkleber
In: wt Wertstattstechnik online 95 (2005), Nr. 3, S. 167-71
- [OTH-05] Othman, N.:
Entwicklung eines Verfahrens zum präzisen Punkt- und Linienauftrag von
hochviskosem Leitkleber mit einem geregelten Mikrodosiersystem
Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2005
Zugl. Stuttgart, Univ., Diss. 2005
- [PAD-97] Padday, J. F.; u. a.:
The shape, stability and breakage of pendant liquid bridges
In: Journal of Fluid Mechanics 352 (1997), S. 177-204

- [PAH-95] Pahl, M.; Gleißle, W.; Laun, H.-M.:
Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995
- [PES-97] Peschka, M.:
Zwei-Komponenten Kleb- und Dichttechnik in der Serienfertigung.
In: Kleben im Automobilbau, Tagung, Berlin / Hrsg. Dilger, K.
Berlin: Technik+Kommunikation-Verl. 1997,
S. 153, 155-74
- [PRO-02] Prognos; u. a.:
Studie: Evaluation des Förderkonzepts Mikrosystemtechnik 2000+
Endbericht im Auftrag des BMBF
Berlin u. a., 2002
- [RAT-04] Ratchev, S.:
EPSRC Grand Challenge Micromanufacturing: WP Microassembly - Initial
Scope
Nottingham: University of Nottingham, 2004
<http://www.3d-mintegration.com/inc/nottingham.pdf> (09.06.2005)
- [RAZ-93] Razban, A.:
Intelligent control of an automated adhesive dispensing cell
London, Imperial College, Ph.D. Thesis, 1993
- [RAZ-95] Razban, A.; Davies, B. L.:
Analytical modelling of the automated dispensing of adhesive material
In: Journal of Adhesion Science Technology 9 (1995) Nr. 11, S. 1435-50
- [REI-98] Reichelt, H. (Hrsg.):
Direktmontage: Handbuch zur Verarbeitung ungehäuster IC's
1. Aufl.
Berlin u. a.: Springer, 1998
- [REI-02] Reinhart, G.:
Automatisierung in der Montage - die zweite Welle
In: wt Werkstattstechnik online 92 (2002), Nr. 9, S. 398
- [SCH-05] Schlenker, D.; Othman, N.; Lenz, T.; Wiedenhöfer, M.:
Intelligentes Mikrodosiersystem für den Einsatz in der Mikromontage (IMI-
DOS):
Abschlussbericht; Stiftung Industrieforschung Förderkennzeichen S 602. Pro-
jektlaufzeit 01. Mai 2003 bis 30. April 2005. Stuttgart: Fraunhofer IPA, 2005
- [SCH-98] Schmitz, G.:
Grundsatzversuche zur Fasermontage
In: VDI/VDE Technologiezentrum GmbH (Hrsg.): Entwicklung und Erpro-
bung von fertigungsgerechten Montage- und Fügeverfahren zum Aufbau von
Mikrosystemen. Teltow: VDI-VDE IT, 1998, S. 15-39

- [SCH-07] Schulze, G., Nordson Asymptek, Hardegsen
Telefongespräch über die Marktverteilung von Dosiersystemen, Stuttgart,
13.06.07, 14:20
- [SPR-02] Sprovieri, J.:
Dispensing Dots
In: Assembly 45 (2002) Nr. 4, S. 44
- [STR-91] Strauß, K.:
Strömungsmechanik: Eine Einführung für Verfahreningenieure
1. Aufl.
Weinheim u. a.: Wiley-VCH Verlag, 1991
- [SVA-06] Svaricek, F.:
Nullodynamik linearer und nichtlinearer Systeme: Definitionen, Eigenschaften
und Anwendungen
In: at Automatisierungstechnik 54 (2006), Nr. 7, S. 310-22
- [TAN-00] Tanner, R. I.:
Engineering Rheology
2. ed
Oxford u. a.: Oxford University Press, 2000
- [VDI-90] Richtlinie VDI 2860 1990-05
Montage- und Handhabungstechnik Handhabungsfunktionen, Handhabungs-
einrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole
- [VDI-04] Steg, H.:
Internationale Marktentwicklung in der MST
Januar, 2004
<http://www.mst-online.de/trends/monitoring/papmst-markt-cd2003.pdf>
(09.06.2005)
- [VET-94] Vetter, G. (Hrsg.):
Handbuch Dosieren
Essen: Vulkan Verlag, 1994
- [VOE-00] Völklein, F.; Zetterer, T.:
Einführung in die Mikrosystemtechnik
Braunschweig u. a.: Vieweg, 2000
- [VOS-04] Voß, W.:
Taschenbuch der Statistik
2. Aufl.
Leipzig: Fachbuch Verlag, 2004
- [WAN-05] Wang, X.; u. a.:
Automatic Micro-bonding Technology of Capillaries with Adhesives

In: 6th International Conference on Electronic Packaging Technology.
August 30th-September 2nd 2005, Shenzhen, China
Piscataway: IEEE, 2005, S. 624-28

- [WER-93] Wern, A.:
Beitrag zur Automatisierung der Klebstoffdosierung durch Echtzeit-Volumenstrommessung
Aachen: Shaker, 1993
Zugl. Aachen, RWTH, Diss., 1993
- [WES-95] West, A. A.; Williams, D. J.; Hinde, C. J.:
Experience of the application of intelligent control paradigms to real manufacturing processes
In: Proc. Inst. Mech. Eng. 209 (1995) 14, S. 293-308
- [WES-98] Westkämper, E.; u. a.:
Produktionskonzepte für die Mikrotechnik
In: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA:
Produktionstechnik für Mikrosysteme - 1998 : Fraunhofer IPA-Kongress, 5. und 6. November 1998. Stuttgart, 1998
- [WES-06] Westkämper, E.; Wiedenhöfer, M.:
Regelung eines Zeit-Druck-Dosierprozesses
In: wt Werkstattstechnik online 96 (2006), Nr. 3, S. 94-97
- [WES-06-1] Westkämper, E.; Wiedenhöfer, M.:
Arbeitspunkt-Beobachter für einen Zeit-Druck-Dosierprozess
In: wt Werkstattstechnik online 96 (2006), Nr. 5, S. 339-43
- [WIS-80] Wistuba, E.:
Kleben und Klebstoffe
In: Chemie in unserer Zeit 14 (1980), Nr. 5, S. 124-33
- [YE-92] Ye, N.; u. a.:
Models of a Pneumatic PWM Solenoid Valve for Engineering Applications
In: Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 114 (1992), S. 680-88
- [ZAE-02] Zäh, M. F.; Schilp, M.; Jacob, D.:
Kapsel und Tropfen - Fluidauftrag für Mikrosysteme
In: wt Werkstattstechnik online 92 (2002), Nr. 9, S. 428-31
- [ZAR-97] Zarrow, P.:
Step-by-step SMT: back to the basics. IV. Printing
In: Surface Mount Technology 11 (1997) Nr. 4, S. 64-70