

**Qualitätssteigerung in automatisierten klebtechnischen
Fertigungsprozessen durch den Einsatz
einer kontinuierlichen Dosierstromregelung**

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur Axel Grüneklee
aus Duisburg

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Dilger
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. G. Habenicht
Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Diltthey

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Dezember 2000

„D 82 (Diss. RWTH Aachen)“

bonding and joining

Band 1

Axel Grünekle

**Qualitätssteigerung in automatisierten
klebtechnischen Fertigungsprozessen durch den
Einsatz einer kontinuierlichen Dosierstromregelung**

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Grünekle, Axel:

Qualitätssteigerung in automatisierten klebtechnischen Fertigungsprozessen durch den Einsatz einer kontinuierlichen Dosierstromregelung / Axel Grünekle.

Aachen : Shaker, 2001

(bonding and joining ; Bd. 1)

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8945-9

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8945-9

ISSN 1617-8890

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnische Fertigungsverfahren (ISF) und im Lehr- und Forschungsgebiet Klebtechnik (LKT) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH Aachen).

Meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Dilger, möchte ich danken für die Überlassung des interessanten Themas, für die Bereitstellung hervorragender Arbeitsbedingungen, die wertvollen Anregungen und Diskussionen sowie sein stetes Interesse an dieser Arbeit.

Dem Direktor des Instituts für Schweißtechnische Fertigungsverfahren, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Dilthey, danke ich für seine Unterstützung und Betreuung sowie die Übernahme des Korreferates dieser Arbeit. Auch Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. G. Habenicht bin ich für die Übernahme des Korreferates zu Dank verpflichtet. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Henning danke ich dafür, dass er den Vorsitz bei der Prüfung übernommen hat.

Allen Mitarbeitern des Instituts für Schweißtechnische Fertigungsverfahren sowie dem Lehr- und Forschungsgebiet Klebtechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen möchte ich meinen Dank aussprechen, auch denen, die mich durch Studien- und Diplomarbeiten oder als studentische Hilfskräfte bei der Vorbereitung und Durchführung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. D. Hasenberg, der durch seine Unterstützung maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ferner möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. G. Schmid und Herrn Dipl.-Ing. J. Band bedanken, die durch eine kollegiale Zusammenarbeit und viele fördernde Diskussionen und Anregungen ihren Teil zu dieser Arbeit beigetragen haben. Herrn Obergeringenieur Dr.-Ing. S. Böhm möchte ich danken, der durch seine konstruktive Kritik und ständige Hilfsbereitschaft zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Schließlich danke ich meinen Eltern für ihre ständige Unterstützung während meiner Studien- und Doktorandenzeit an der RWTH Aachen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Parameter	I
1 Einleitung	1
2 Prozesskette Kleben	3
2.1 Kleinserienfertigung	6
2.2 Großserienfertigung	8
3 Dosierprozess	15
3.1 Auslassventile	15
3.1.1 Auf/Zu-Ventile	15
3.1.2 Proportionalventile	16
3.2 Leitungssystem	18
3.3 Dosiersysteme	19
3.4 Fördereinrichtungen	21
3.4.1 Schneckenpumpen	21
3.4.2 Kolbenpumpen	22
4 Versuchsaufbau und strömungsmechanische Beschreibung der einzelnen Komponenten	25
4.1 Beschreibung der Versuchsdosieranlage	25
4.2 Strömungen durch eine Rohrleitung	26
4.2.1 Kontinuitätsgleichung	27
4.2.2 Dichte von Flüssigkeiten	28
4.2.3 Energiegleichung	29
4.2.4 Impulssatz	30
4.2.5 Laminare - Turbulente Strömung	30
4.2.6 Geschwindigkeitsprofil im Rohr	31
4.2.7 Ausbildung der stationären Strömung im Rohr	34
4.2.8 Temperaturabhängigkeit der Strömung durch innere Erwärmung	34
4.3 Strömungen in Rohrleitungselementen	35
4.3.1 Sprungartige Rohrquerschnittsänderungen	36
4.3.2 Stetige Rohrquerschnittsänderung	38
4.3.3 Richtungsänderungen innerhalb eines Rohrstückes	39
4.4 Strömungen im Dosierkolben	40
4.5 Strömungsverhalten im Auslassventil	44

5	Rheologische Charakterisierung der Klebstoffe	48
5.1	Viskositätsmodelle	49
5.1.1	Ideal viskoser Körper	49
5.1.2	Ideal elastischer Körper	50
5.1.3	Ideal plastischer Körper	50
5.1.4	Voigt-Maxwell-Modell	51
5.2	Rheologische Untersuchungsmethoden	53
5.2.1	Kegel-Platte-Rheometer	53
5.3	Rheologisches Verhalten von Klebstoffen	55
5.3.1	Viskositäts-Schergeschwindigkeits-Abhängigkeit	56
5.3.2	Viskositäts-Temperatur-Abhängigkeit	58
5.3.3	Viskositäts-Druck-Abhängigkeit	60
5.3.4	Zeitabhängigkeit der Viskosität	61
5.4	Untersuchungen zum ausgewählten Testklebstoff	62
6	Charakterisierung der Durchflussmessverfahren	65
6.1	Volumetrische Durchflussmessung	68
6.1.1	Ringkolbenzähler	68
6.1.2	Ovalradzähler	69
6.1.3	Treibschieberzähler	70
6.1.4	Schraubenvolumeter	71
6.1.5	Zahnradzähler	73
6.2	Messwerterfassung	74
6.2.1	Induktive Messaufnehmer	75
6.2.2	Hall-Effekt	75
6.3	Untersuchungen zum Messverhalten der ausgewählten volumetrischen Durchflussmesszellen	78
7	Entwicklung eines geregelten Klebstoffauftragsprozesses	84
7.1	Untersuchung des Arbeitsverhaltens der Durchflussmesszellen	84
7.1.1	Schraubenvolumeter	85
7.1.2	Zahnradzähler	90
7.2	Aufbau eines Regelkreises	94
7.2.1	Regelungskonzepte	94
7.2.2	Versuchsergebnisse beim geregelten Auftragsprozess	99
7.3	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	102

8	Optimierungsmöglichkeiten des Dosierprozesses	105
8.1	Ventil geregelter Auftragsprozess	105
8.2	Einsatz berührungsloser Durchflussmessgeräte	106
8.2.1	Ultraschall-Durchflussmessverfahren	106
8.2.1.1	Laufzeitmessung	107
8.2.1.2	Dopplereffekt	108
8.2.2	Magnetisch-induktive Durchflussmessverfahren	108
9	Grundlagen für die rechnerunterstützte Simulation	110
9.1	Vor- und Nachteile der Simulation	110
9.2	Ablauf einer Simulationsstudie	112
9.3	CFD-Verfahren	113
9.3.1	FD-Methode	114
9.3.2	FV-Methode	114
9.3.3	FE-Methode	114
9.4	Vorgehen bei numerischen Simulationen	115
10	Zusammenfassung	117
11	Literatur- und Bilderverzeichnis	119
11.1	Literaturverzeichnis	119
11.2	Bilderverzeichnis	129

Abkürzungen und Parameter

a	Konstante	
A ₁	Querschnittsfläche am Rohreinlass	[m ²]
A ₂	Querschnittsfläche am Rohrauslass	[m ²]
A _A	Austrittsquerschnittsfläche	[m ²]
A _E	Eintrittsquerschnittsfläche	[m ²]
A _F	Flussdurchsetzte Fläche	[m ²]
A _K	Querschnittsfläche des Dosierkolbens	[m ²]
a _s	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls in ruhendem Medium	[m/s]
a _{s1}	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in Strömungsrichtung	[m/s]
a _{s2}	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls gegen Strömungsrichtung	[m/s]
A _{ÖQ}	Öffnungsquerschnitt	[m ²]
A _{VDI}	Beiwert nach VDI-Atlas, Tafel 11	
B	Magnetische Induktion	[T]
b	Konstante	
b _{LS}	Breite des Leckage-Spaltes	[m]
c	Konstante	
C _{VDI}	Beiwert nach VDI-Atlas, Tafel 11	
d ₁	Durchmesser eines Rohres am Einlass	[m]
d ₂	Durchmesser eines Rohres am Auslass	[m]
D _A	Durchmesser des Austrittsquerschnitts	[m]
d _{HP}	Dicke des Halbleiterplättchens	[m]
D _{KD}	Durchmesser des Kolbens eines Dosierers	[m]
D _{SM}	Durchmesser eines Statikmischers	[m]
e	Basis des natürlichen Logarithmus	
F	Kraft	[N]
f ₁	Frequenz einer Ultraschallwelle bei der Ausbreitung	[1/s]
f ₂	Frequenz einer Ultraschallwelle bei der Reflektion	[1/s]
f _{DM}	Mischfaktor eines Dynamikmischers	
f _{SM}	Mischfaktor eines Statikmischers	
f _v	Viskositätsfaktor	
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
G _H	Schubmodul in Feder	[N/m ²]

h	Höhe des Eintritts bzw. Austritts	[m]
h_{LS}	Leckage-Spaltweite	[m]
h_{KZ}	Spaltweite Kolben-Zylinder	[m]
I	Impuls	[gm/s]
I_S	Strom	[A]
k	Konstanten	[Pas]
l	Länge eines Rohres	[m]
L	Induktivität	[H]
l_E	Länge des Klebstoffkontrollvolumens	[m]
L_E	Einlaufstrecke	[m]
L_{EA}	Elektrodenabstand	[m]
L_F	Mittlere Feldlinienlänge	[m]
l_{LS}	Länge des Leckage-Spaltes	[m]
l_{SK}	Länge des Spaltes Kolben-Zylinder	[m]
L_{US}	Abstand zwischen zwei Ultraschallwandlern	[m]
m	Masse	[g]
\dot{m}	Massestrom	[g/s]
m_A	Masse am Austrittsquerschnitt	[g]
M_D	Drehmoment	[Nm]
m_E	Masse am Eintrittsquerschnitt	[g]
n	Konstante	
n_{DM}	Mischerdrehzahl	[U/s]
n_{SM}	Mischelementanzahl eines Statikmischers	
n_{WZ}	Windungsanzahl	
p	Druck	[N/m ²]
p_a	Druck am Auslass	[N/m ²]
p_e	Druck am Einlass	[N/m ²]
p_K	Druck des Kolbens	[N/m ²]
p_{ges}	Gesamtdruck	[N/m ²]
$p_{statisch}$	Statischer Druck	[N/m ²]
$p_{dynamisch}$	Dynamischer Druck	[N/m ²]
Δp	Druckdifferenz	[N/m ²]
Δp_v	Druckverlust in einem Rohrleitungselement	[N/m ²]
Q_{el}	elektrische Ladung	[C]
r	Koordinate in radialer Richtung	[m]
r_0	Radius eines Rohres	[m]
R	Radius eines Rohres	[m]
Re	Reynoldszahl	

R_H	Hall-Konstante	[m ³ /As]
t	Zeit	[s]
T	Temperatur	[°C]
ΔT	Temperaturdifferenz	[°C]
dt	Zeit	[s]
T_a	charakteristische Temperaturbeiwerte	
T_b	charakteristische Temperaturbeiwerte	
U_A	Benetzter Umfang des Austrittsquerschnittes	[m]
U_H	Hall-Spannung	[V]
v	Geschwindigkeit eines Fluids	[m/s]
V_{DM}	Mischerkammervolumen	[m ³]
v_r	Geschwindigkeit in radialer Richtung	[m/s]
v_m	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
v_φ	Geschwindigkeit in φ -Richtung	[m/s]
v_{ϑ}	Geschwindigkeit in ϑ -Richtung	[m/s]
\dot{V}	Volumenstrom	[m ³ /s]
\dot{V}_{DM}	Volumenstrom	[m ³ /s]
\dot{V}_{LS}	Leckage-Volumenstrom	[m ³ /s]
\dot{V}_{tat}	Tatsächlicher Volumenstrom	[m ³ /s]
\dot{V}_{theo}	Theoretischer Volumenstrom	[m ³ /s]
w_K	Kolbengeschwindigkeit	[m/s]
w_1	Geschwindigkeit des Fluids am Rohreingang	[m/s]
w_2	Geschwindigkeit des Fluids am Rohrausgang	[m/s]
w_\emptyset	Durchschnittliche Geschwindigkeit	[m/s]
$w_{E\emptyset}$	Durchschnittliche Geschwindigkeit im Eintrittsquerschnitt	[m/s]
$w_{A\emptyset}$	Durchschnittliche Geschwindigkeit im Austrittsquerschnitt	[m/s]
dz	Länge des Kontrollvolumens in axialer Richtung	[m]
α	Strahleinschnürung	
α_D	Druckbeiwert	[m ² /N]
α_K	Öffnungswinkel des Kegels	
β_p	Isobarer Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/°C]
β_T	Isothermer Kompressibilitätsfaktor	[m ² /N]
δ_v	Verdrängungsdicke der Grenzschicht	[m]
γ_1	Scherung in Modul 1	
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit	[1/s]
$\dot{\gamma}_1$	Schergeschwindigkeit in Dämpfer 1	[1/s]

γ_2	Scherung in Feder 2	
$\dot{\gamma}_2$	Schergeschwindigkeit in Dämpfer 2	[1/s]
$\dot{\gamma}_C$	Konstante	[1/s]
η	Viskosität	[Pas]
η_1	Viskosität, dargestellt durch Dämpfer 1	[Pas]
η_2	Viskosität, dargestellt durch Dämpfer 2	[Pas]
$\eta_{0,D}$	Viskosität bei $p = 1$ bar	[Pas]
$\eta_{0,T}$	Viskosität bei $T=273$ K	[Pas]
η_p	Viskosität bei einem Druck p	[Pas]
μ_0	absolute Permeabilität	[Vs/Am]
μ_r	relative Permeabilität	
Θ	Winkel zwischen Ultraschallwandler und Strömungsrohr	
π	Kreiszahl	
ρ	Dichte	[g/m ³]
ρ_A	Dichte am Austritt	[g/m ³]
ρ_E	Dichte am Eintritt	[g/m ³]
$\rho_{0,T}$	Dichte bei Bezugstemperatur T	[g/m ³]
$\rho_{0,p}$	Dichte bei Bezugsdruck p	[g/m ³]
τ	Schubspannung	[N/m ²]
τ_w	Schubspannung an Zylinderwand	[N/m ²]
Ω	Drehfrequenz	[1/s]
ζ	Widerstandszahl	