Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 197

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Frederic Förster

aus Wörth am Rhein

Tag der mündlichen Prüfung:	19.12.2016
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5091-2
ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Meinen Großeltern

Heinrich & Renate Grimm

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner fünfjährigen Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Übernahme des Hauptreferats und für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die mir überlassene Freiheit bei der Durchführung meiner Forschungstätigkeiten. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder für die Übernahme des Korreferats und für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse. Ein weiterer Dank richtet sich an Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Henning für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und das ebenfalls große Interesse an meiner Arbeit.

Allen Kolleginnen und Kollegen am wbk und insbesondere im Bereich der Maschinen-, Anlagen- und Prozessautomatisierung danke ich für die kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit und das stets angenehme Arbeitsklima. An dieser Stelle möchte ich besonders das Service Center Technik hervorheben, das durch den Aufbau zahlreicher Greifer, Sensoren und elektrischer Schaltungen maßgeblich zum Erfolg meiner Arbeit beigetragen hat.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei meinen zahlreichen Studierenden bedanken, welche durch ihre Abschlussarbeiten und Tätigkeiten als wissenschaftliche Hilfskraft zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Gleiches gilt auch für meine Freunde, insbesondere Henning Wagner und Simon-Frederik Koch, die mich durch Ihr Feedback und im Rahmen konstruktiver Diskussionen bei der Fertigstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Julia und meiner Familie. Nur durch ihre Unterstützung habe ich zu jeder Zeit den Rückhalt gefunden, der mir die Erstellung dieser Arbeit erst ermöglichte. Danke, dass Ihr mir das ermöglicht habt!

Maximiliansau, im Dezember 2016 Frederic Förster

Abstract

Nowadays, the realization of a series-ready production of continuous carbon fiber-reinforced polymers can only be mapped with considerable effort. One main reason can be found in the handling of fabrics that are limp and permeable to air, which poses great challenges. In addition, these properties are coupled with variations which influence the process reliability negatively. Today supplying and feeding of fabrics is especially carried out by manually performed steps.

Therefore, the aim of this work is the development of a gripper that matches all requirements of an automated handling of continuous carbon fabrics within the Resin Transfer Moulding Process. In doing so, the gripping principal “low pressure suction” is combined with an advanced sensing technology to record characteristic process variables and to improve the handling process. Based on this, so called “handling strategies” are developed to increase both the insufficient energy efficiency and the inadequate process reliability. Both of them correlate with the usage of low pressure suction grippers in the considered application. Of special significance is the developed handling strategy to increase the process reliability during the execution of separation the upper fabric layer form a stack out of fabrics. Furthermore an additional handling strategy for detecting the presence of a fabric at the gripper’s surface and to evaluate the number of separated fabric layers is developed.

Each handling strategy is based on a novel sensor in order to measure the contact pressure force between the carbon fabric and the suction gripper’s surface. This sensor is suitable for the direct integration into the suction surface of the low-pressure suction gripper. Its operation involves the measurement of the electrical contact resistance which is inversely proportional to the contact pressure force.

Both the developed handling strategies and the novel contact pressure force sensor are integrated in one common prototype gripping system comprising four independent controlled low pressure suction grippers. Within the scope of two endless handling tasks that are carried out repeatedly, the implemented prototype is validated in an extensive way and compared to the state of the art.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **I**

Abkürzungen und Formelzeichen **V**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation und Aufgabenstellung 1

1.2 Vorgehen und Gliederung der Arbeit 4

2 Stand der Technik **5**

2.1 Begriffe und Definitionen 5

2.1.1 Handhabungsfunktionen und -operationen mit Textilzuschnitten 5

2.1.2 Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) 8

2.1.3 Textile Endlosfaserhalbzeuge 9

2.2 Automatisierter RTM-Prozess 12

2.2.1 Betrachtete Handhabungsoperationen mit biegeschlaffen Textilzuschnitten vor dem Preforming 14

2.2.2 Greif- und Handhabungssysteme zur automatisierten Ausführung der betrachteten Handhabungsoperationen 16

2.2.3 Fazit zur automatisierten Ausführung der betrachteten Handhabungsoperationen 23

2.2.4 Abgeleitete Anforderungen an den Handhabungsprozess 25

2.3 Greifprinzipien und Greifelemente für biegeschlaffe Textilzuschnitte 28

2.3.1 Kraftschlüssige Greifelemente 29

2.3.2 Stoffschlüssige Greifelemente 32

2.3.3 Formschlüssige Greifelemente 34

2.3.4 Zusammenfassende Bewertung der verfügbaren Greifprinzipien 35

2.4 Zusammenfassung zum Stand der Forschung und Technik 36

3 Zielsetzung, Lösungsansatz und Vorgehensweise **38**

3.1 Zielsetzung 38

3.2 Lösungsansatz 39

3.3 Vorgehensweise 41

4 Funktionsbeschreibung und Modellierung eines Niederdruckflächensaugers nach dem Coanda-Effekt **43**

4.1 Allgemeine Funktionsweise eines Niederdruckflächensaugers 43

4.2 Aufbau und Funktionsweise eines Niederdruckflächensaugers nach dem Coanda-Effekt 45

4.3 Modellierung der Ein- und Ausgangsgrößenbeziehungen eines Niederdruckflächensaugers nach dem Coanda-Effekt 48

4.3.1 Versuchsaufbau 49

4.3.2 Versuchsdurchführung 50

4.3.3 Modellierungsergebnis 52

4.4 Charakterisierung der Mehrlagenhandhabungsfähigkeit eines Niederdruckflächensaugers nach dem Coanda-Effekt 56

4.4.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung 57

4.4.2 Ergebnisse 58

4.5 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse 62

5 Entwicklung von Handhabungsstrategien 63

5.1 Steigerung der Energieeffizienz: Erforschung bestehender Problemursachen und Entwicklung einer Handhabungsstrategie 63

5.1.1 Erste Problemursache: Globale Druckluftversorgung aller Greifelemente des Greifsystems 63

5.1.2 Zweite Problemursache: Fehlende Kompensation von Störungen während der Ausführung von Handhabungsoperationen 65

5.1.3 Entwicklung einer Handhabungsstrategie zur Steigerung der Energieeffizienz 66

5.2 Zuverlässigkeitssteigerung von Vereinzelungsoperationen: Erforschung bestehender Problemursachen und Entwicklung einer Handhabungsstrategie 68

5.2.1 Erste Problemursache: Globale Druckluftversorgung aller Greifelemente des Greifsystems (statische Betrachtung) 69

5.2.2 Zweite Problemursache: Während des Vereinzelungsprozesses wirkende Störeinflüsse 72

5.2.3 Entwicklung einer Handhabungsstrategie zur Steigerung der Zuverlässigkeit von Vereinzelungsoperationen 73

5.3 Entwicklung von Handhabungsstrategien zur kontinuierlichen Überwachung des Handhabungsprozesses 81

5.3.1 Entwicklung einer Handhabungsstrategie zur Erfolgskontrolle von Vereinzelungsoperationen 81

5.3.2 Entwicklung einer Handhabungsstrategie zur Detektion der Anwesenheit 85
5.4 Zusammenfassung der Handhabungsstrategien 87
6 Auswahl und Charakterisierung eines Messfühlers zur Anpresskraftmessung 88
6.1 Definition eines Sensors zur Messung der Anpresskraft FA 88
6.1.1 Anforderungen an das Messprinzip und den Messfühler 89
6.1.2 Auswahl möglicher Messprinzipien 93
6.1.3 Zusammenfassung und Auswahl eines Messprinzips 96
6.1.4 Ableitung und Integration des Messfühlers 98
6.2 Charakterisierung des abgeleiteten Messfühlers 101
6.2.1 Versuchsaufbauten zur Charakterisierung des Messfühlers 102
6.2.2 Funktionsnachweis mit ausgewählten Kohlenstofffasertextilien 104
6.2.3 Ermittlung des Messbereichs 106
6.2.4 Anpassung des Messbereichs 110
6.2.5 Beurteilung des Hystereseverhaltens 122
6.2.6 Beurteilung der Linearität 124
6.2.7 Beurteilung des Ansprechverhaltens 127
6.2.8 Zusammenfassende Bewertung des abgeleiteten Messfühlers 130
6.3 Definition eines Kalibrierungsvorgehens 132
6.3.1 Kalibrierung des funktionserfüllenden Parameters zur Steigerung der Energieeffizienz 133
6.3.2 Kalibrierung des funktionserfüllenden Parameters zur Steigerung der Vereinzelungszuverlässigkeit 134
6.3.3 Kalibrierung der funktionserfüllenden Parameter zur Erfolgskontrolle von Vereinzelungsoperationen 134
6.3.4 Kalibrierung des funktionserfüllenden Parameters zur Detektion der Anwesenheit 137
6.3.5 Zusammenfassung des Kalibrierungsvorgehens 138
7 Exemplarische Realisierung 139
7.1 Mechanischer Teil des prototypisch umgesetzten Handhabungssystems 140
7.2 Elektrotechnischer Teil des prototypisch umgesetzten Handhabungssystems 142
7.3 Informationstechnischer Teil des prototypisch umgesetzten Handhabungssystems 144

7.3.1 Greifelemente ausgeschaltet (Funktion #0) 145
7.3.2 Antasten Stapellage (Funktion #2) 146
7.3.3 Energieeffizienter Transport und zuverlässige Vereinzelung (Funktionen #1 und #3) 147
7.3.4 Erfolgskontrolle Vereinzelungsoperation (Funktion #4) 149
7.3.5 Gesteuerte Vereinzelung und gesteuerter Transport (Funktion #5 und Funktion #6) 151

8 Validierung 152

8.1 Zur Validierung eingesetzte automatisierte Versuchszelle 152
8.1.1 Nachbildung lösbarer Verhakungen während der Ausführung von Vereinzelungsoperationen 153
8.1.2 Nachbildung unlösbarer Verhakungen während der Ausführung von Vereinzelungsoperationen 154
8.1.3 Nachbildung dynamischer Transportvorgänge 155

8.2 Auswahl eines Kohlenstofffasertextils und Kalibrierung des Handhabungssystems 156

8.3 Erster Validierungszyklus 160
8.3.1 Ablaufbeschreibung des ersten Validierungszyklus 160
8.3.2 Ergebnisse des ersten Validierungszyklus 163

8.4 Zweiter Validierungszyklus 165
8.4.1 Ablaufbeschreibung des zweiten Validierungszyklus 166
8.4.2 Zweiter Validierungszyklus - Ergebnisse der Zuverlässigkeitsuntersuchung 169
8.4.3 Zweiter Validierungszyklus – Ergebnisse zur Prozessüberwachung 170
8.4.4 Zweiter Validierungszyklus- Ergebnisse zur Energieeffizienz 179

8.5 Zusammenfassende Bewertung 182

9 Zusammenfassung und Ausblick 184

9.1 Zusammenfassung 184

9.2 Ausblick 187

10 Literaturverzeichnis I

Anhang XXI

Abkürzungen und Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
A	Leiterquerschnitt / Elektrodenfläche	[mm²]
a_{11}	Materialkonstante nach KÖHLER (1983, S. 22)	-
A_E	Gesamtelektrodenfläche	[mm²]
A_{EFF}	Effektive Saugfläche	[mm²]
b_{11}	Materialkonstante nach KÖHLER (1983, S. 22)	-
B	Vereinzelungsbereich	[bar]
B_j	Vereinzelungsbereich an Greifelement j	[bar]
C	Kapazität	[F]
d	Elektrodenabstand	[mm]
d_1	relativen Auslenkung	
d_{HZ}	Textildicke	[mm]
DS	Digitalsignal	
D_T	Reglerparameter D-Anteil / Transportoperation	
D_{VE}	Reglerparameter D-Anteil / Vereinzelungsoperation	
ECFK	Endloskohlenstofffaserverstärkter Kunststoff	
F_A	Anpresskraft	[N]
$F_{A,AW}$	Schwellwert Anpresskraft zur Anwesenheitsdetektion	[N]
$F_{A,Crit2}$	Beim Betriebsdruck $p_{N,Crit2}$ resultierende Anpresskraft	
$F_{A,j}$	Anpresskraft an Greifelement j	[N]
$F_{A,max}$	Maximale Anpresskraft	[N]
$F_{A,SP,T}$	Führungsgröße Anpresskraft für Transportoperation	[N]
F_G	Gewichtskraft	[N]
$F_{G,j}$	Gewichtskraft an Greifelement j	[N]
F_H	Haltekraft	[N]
$F_{H,12}$	Haltekraft auf den zweiten Textilzuschnitt	[N]
F_N	Belastungsäquivalent in Normalrichtung (Normalkraft)	[N]
$F_N^{'}$	Belastung in Normalrichtung	[N]
$F_T^{'}$	Belastung in Tangentialrichtung	[N]

Formelzeichen	Größe	Einheit
FVK	Faserverstärkter Kunststoff	
g	Erdbeschleunigung	[m/s²]
G_j	Funktionsspezifische Information an Greifelement j	
h	Abstand Greifelement <> Oberfläche Textilstapel	[mm]
H	Handhabungsvorgang	
I_{const}	Konstantstrom	[A]
I_T	Reglerparameter I-Anteil / Transportoperation	
I_{VE}	Reglerparameter I-Anteil / Vereinzelungsoperation	
j	Greifelementanzahl	
K	Krümmungsmaß	
K_{max}	Maximale Krümmung	
l	Leiterlänge	[mm]
LCM	Liquid Composite Molding	
$m_{F,j}$	Tolerierte Fehlermasse an Greifelement j	[kg]
$m_{i,j}$	Masseanteil i-ter Textilzuschnitts an Greifelement j	[kg]
m_{HZ}	Masse Textilzuschnitt	[kg]
m_{Ref}	Referenzmasse	[kg]
$M_{ges,j}$	Gesamtmasse an Greifelement j	[kg]
n	Anzahl Vereinzelungsoperationen	
n_{niO}	Anzahl fehlerhafter Vereinzelungsoperationen	
Δp	Druckdifferenz	[bar]
p_0	Atmosphärischen Umgebungsdruck	[bar]
p_N	Betriebsdruck	[bar]
$p_{N,Crit1}$	Kritischer Betriebsdruck ein Textilzuschnitt	[bar]
$p_{N,Crit2}$	Kritischer Betriebsdruck zwei Textilzuschnitte	[bar]
$p_{N,global}$	Globaler Betriebsdruck	[bar]
$p_{N,j}$	Betriebsdruck an Greifelement j	[bar]
$\overline{p}_{N,j}$	Klassifikationsgrenze Betriebsdruck an Greifelement j	[bar]
P_N	Betriebsleistung	[W]

Formelzeichen	Größe	Einheit
$P_{N,global}$	Globale Betriebsleistung	[W]
P_T	Reglerparameter P-Anteil / Transportoperation	
p_U	Unterdruck Greifersaugkammer	[bar]
$p_{U,12}$	Unterdruck zwischen 1. und 2. Textilzuschnitt	[bar]
$p_{U,12,j}$	Unterdruck zw. 1. und 2. Textilzuschnitt Greifelement j	[bar]
$p_{U,j}$	Unterdruck Greifersaugkammer an Greifelement j	[bar]
P_U	Saugleistung	[W]
$P_{U,j}$	Saugleistung an Greifelement j	[W]
$P_{U,12}$	Saugleistung am zweiten Textilzuschnitt	[W]
P_{VE}	Reglerparameter P-Anteil / Vereinzelungsoperation	
Q	Kombination	
R	Luftdurchlässigkeit	[mm/s]
R^2	Bestimmtheitsmaß	
R_K	Kombinierte Luftdurchlässigkeit	[mm/s]
RTM	Resin Transfer Moulding	
S	Sicherheitsfaktor	
SdT	Stand der Technik	
t_{ges}	Einschwingzeit Regelstrecke	[s]
t_N	Einschwingzeit Proportionaldruckventil	[s]
t_S	Einschwingzeit Messfühler	[s]
t_{Sys}	Systemzeit	[s]
t_U	Einschwingzeit Niederdruckflächensauger	[s]
T_a	Abtastzeit	[s]
T_{ges}	Anstiegszeit Regelstrecke	[s]
T_N	Anstiegszeit Proportionaldruckventil	[s]
T_S	Anstiegszeit Messfühler	[s]
T_U	Anstiegszeit Niederdruckflächensauger	[s]
T_Z	Zykluszeit	[s]
U_b	Versorgungsspannung	[V]

Formelzeichen	Größe	Einheit
U_N	Ventilspannung	[V]
$\overline{U}_{N,j}$	Klassifikationsgrenze Ventilspannung an Greifelement j	[V]
$U_{N,MW,j}$	Mittelwert Ventilspannung an Greifelement j	[V]
U_S	Sensorspannung	[V]
$\overline{U_S}$	Linearisierte Sensorspannung	[V]
$U_{S,AW}$	Schwellwert Sensorspannung Anwesenheitsdetektion	[V]
$U_{S,j}$	Sensorspannung an Greifelement j	[V]
$U_{S,min}$	Minimale Sensorspannung	[V]
$U_{S,SP}$	Führungsgröße Sensorspannung	[V]
$U_{S,SP,K}$	Führungsgröße Sensorspannung Kontrolloperation	[V]
$U_{S,SP,T}$	Führungsgröße Sensorspannung Transportoperation	[V]
$U_{S,SP,VE}$	Führungsgröße Sensorspannung Vereinzelungsop.	[V]
V	Versuchsdurchführung	
$\dot{V}_{Ges}$	Vereinigter Volumenstrom	[m³/s]
$\dot{V}_N$	Betriebsvolumenstrom (Primärvolumenstrom)	[m³/s]
$\dot{V}_{N,ges}$	Gesamtbetriebsvolumenstrom	[m³/s]
$\dot{V}_U$	Saugvolumenstrom (Sekundärvolumenstrom)	[m³/s]
Y	Erfolgsrate	[%]
Z	Kennliniensteigung	[V/bar]
Z_{min}	minimal zulässige Kennliniensteigung	[V/bar]
δ	Offset Kalibrierung Transportoperation	[V]
ε_r	Relative Primitivität	[F/m]
κ	Offset Kalibrierung Vereinzelungsoperation	[V]
μ	Reibkoeffizient	
σ	Standardabweichung	
ρ	Textildichte	[kg/m³]
λ	Fehlerrate	[ppm]
Λ	Nichtlineare Kompensationsfunktion	
ρ_{el}	Werkstoffspezifischer elektrischer Widerstand	[Ωm]

Formelzeichen	Größe	Einheit
ϕ	Steigung	
ψ	y-Achsenabschnitt	[m²/s]
Ω	Elektrischer Widerstand	[Ω]