

Industrialisierende Machine-Vision-Integration im Faserverbundleichtbau

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

vorgelegt von

Christoph Mersmann

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Gries

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Februar 2012

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Christoph Mersmann

Industrialisierende Machine-Vision-Integration
im Faserverbundleichtbau

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 8/2012


RWTHAACHEN

 **Fraunhofer**
IPT

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Christoph Mersmann:

Industrialisierende Machine-Vision-Integration im Faserverbundeleichtbau

1. Auflage, 2012

Apprimus Verlag, Aachen, 2012

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-127-4

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2012)

Vorwort

„Wissen und Erkennen sind die Freude und die Berechtigung der Menschheit.“

ALEXANDER VON HUMBOLDT

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, gilt mein besonderer Dank für das Vertrauen, die Unterstützung meiner Tätigkeit an seinem Lehrstuhl und die Betreuung dieser Arbeit. Besonders für die Handlungsfreiräume, die Professor Schmitt mir eingeräumt hat, um anspruchsvolle Themen und Geschäftsideen an seinem Lehrstuhl vorantreiben zu dürfen, möchte ich mich bedanken.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries, Leiter des Instituts für Textiltechnik und Inhaber des Lehrstuhls für Textilmaschinenbau an der RWTH Aachen, danke ich für die Übernahme des Korreferates und die eingehende Durchsicht meiner Dissertationsschrift, sowie für die aktive Unterstützung und konstruktive Diskussion meiner Arbeiten in gemeinsamen Forschungsprojekten. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann, Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung und Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen, danke ich für die Übernahme des Beisitzes.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Axel Herrmann und Herrn Joachim Piepenbrock, CTC-Airbus GmbH, sowie Herrn Dr.-Ing. Christian Boge, MAG Europe GmbH, danke ich für die Bereitstellung von Produktionsmaschinen für die umfassenden Versuchsreihen in gemeinsamen Forschungsprojekten und die damit einhergehende aktive Förderung meiner Forschungsarbeiten.

Besonders bedanken möchte mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Alexander Schönberg, Herrn Christoph Lamers und Herrn André Duffe für die hilfreichen Konversationen über die prozessseitigen Zusammenhänge bei der Faserverbundproduktion.

Herrn Dr.-Ing. Alexandre Orth danke ich für die thematische Wegbereitung und die fachliche und freundschaftliche Unterstützung während unserer gemeinsamen Zeit am Lehrstuhl.

Herrn Dr.-Ing. Reinhard Freudenberg, Herrn Dr.-Ing. Björn Dietrich und Herrn Dr.-Ing. Philipp Jatzkowski danke ich für ihre umsichtigen Ratschläge, ihre stetige Unterstützung und ihren außerordentlichen Einsatz für ihre Mitarbeiter am Lehrstuhl.

Weiterhin danke ich meinen studentischen Hilfskräften Herrn André Brosig, Herrn Andreas Bußmann, Herrn Vaishak Belle, Herrn Erkan Yalvac, Herrn Ricardo Perez, Herrn Diego Dias, Herrn Christian Dornieden und Herrn Alexander Leutner für ihr Unterstützung bei der Entwicklung und Erprobung des Machine-Vision-Messsystems sowie den zahl-

reichen Untersuchungen zum Erfolg der jeweiligen Fertigungsintegrationen. Ferner möchte ich meinen Studien- und Diplomarbeitern Herrn Martin Peterek, Herrn Robert Wagner, Herrn Maximilian Kaltenecker, Herrn Balaji Ravi, Herrn Robert Deppe, Herrn Henning Deitmer, Herrn Paul Heinen, Herrn Marc Schmidt und Herrn Alexander Lauscher für ihre engagierte Mitwirkung an meiner Arbeit danken.

Meinem Freund und Studienkollegen Herrn Dr. Tobias Melchior und seiner Frau Verena möchte ich für die Unterstützung und die unzähligen gemeinsamen Stunden danken, die meinen bisherigen Bildungsweg maßgeblich geprägt haben.

Ganz herzlich danke ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die meinen Bildungsweg ermöglicht und sehr großzügig gefördert haben. Vor allem aber danke ich meiner lieben Frau Sara und meinem lieben Sohn Paul, die mir den nötigen Rückhalt gaben und mit sehr viel Geduld und großem Verständnis zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Meinen Eltern und Sara widme ich diese Arbeit.

Aachen, im Februar 2012

Christoph Mersmann

Kurzfassung

Die hohen Produktionskosten für Strukturbauteile aus Faserverbundkunststoffen, insbesondere für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), verhindern aktuell, dass diese Werkstoffe in der Serienfertigung eingesetzt werden. Vor allem die Luftfahrt- und Automobilindustrie betrachten CFK als zukunftsweisenden Leichtbauwerkstoff, der mit seinen herausragenden Eigenschaften einen signifikanten Beitrag zu einer energieeffizienten Mobilität leistet.

Die vorliegende Arbeit sieht die mangelnde Industrialisierung der Faserverbundproduktion als Ursache der hohen Produktionskosten. Mit dem Begriff Industrialisierung wird das Streben nach robusten Produktionsprozessen eingeführt – als notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Transformation von einer manuell geprägten hin zu einer automatisierten Produktion. Als besonders kritisch werden die manuellen Prozessschritte und erste abgeleitete Automatisierungsansätze in den frühen Phasen der Produktion erkannt, die ohne eine objektive Qualitätssicherung durchlaufen werden und weder die geforderte Prozessfähigkeit erreichen noch aufgrund ihrer hohen Komplexität erfolgreich automatisiert werden konnten.

Als Lösungswerkzeug wird ein Machine-Vision-Messsystem konzipiert, welches geeignet ist, fertigungsintegriert die Qualitätsmerkmale wie z. B. die Faserorientierung zu messen, um somit die fehlenden Informationen über den Prozess bei jedem Schritt des generativen Aufbaus der Verstärkungsstruktur bereitzustellen.

Es werden umfangreiche Fallstudien zur Integration des neuen Machine-Vision-Systems entlang der Wertschöpfungskette in der Faserverbundproduktion durchgeführt. Der Fokus liegt dabei auf den frühen Phasen der Fertigung endlosfaserverstärkter Bauteile: Für das Preforming trockener Faserhalbzeuge sowie für das Tapelegen von vorimprägnierten Faserbändern wird für das grundlegende Qualitätsmerkmal „Faserorientierung“ die Prozessfähigkeit bestimmt und deren Verbesserung durch die Rückkoppelung der Messergebnisse an den Prozess als Stellgröße in Qualitätsregelkreisen untersucht.

Die fallübergreifende Analyse der Machine-Vision-Integrationen führt zu einer Industrialisierungstheorie, die darlegt, wie die Fertigungsintegration von Maschine-Vision-Systemen im generativen Faserverbundleichtbau zur notwendigen Verbesserung der Prozessfähigkeit als Kennzahl des Industrialisierungsfortschrittes beiträgt. Auf Basis der begründeten Industrialisierungstheorie werden drei aufeinander aufbauende Handlungsempfehlungen zur erfolgreichen Machine-Vision-Integration formuliert, die die notwendige Kompetenzentwicklung der Faserverbundhersteller auf dem Weg von einer immer noch handwerklich geprägten Fertigung hin zu einer industrialisierten Produktion unterstützen.

Abstract

The high cost of production for structural components made of fiber-reinforced plastics, in particular for carbon fiber-reinforced plastics (CFRP), currently prevent that these materials are used in series production. In particular the aerospace and automotive industry considers CFRP as a forward-looking lightweight construction material, which significantly contributes with its outstanding features to an energy-efficient mobility.

The lack of industrialization in composites production is regarded as the cause of the high production costs. The term 'industrialization' is introduced expressing the search for robust production processes – as a necessary precondition for the successful transformation of a manually conducted to an automated production. The manual process steps and first derivative automation approaches in the early stages of production are identified as the most critical ones, which are passed through without an objective quality assurance and without having reached the required process capability.

As a solution a production integrated machine vision system is designed, which is capable to measure quality features, such as fiber orientation. Thus, information about every process step of the generative reinforcement structure build-up is provided.

Extensive case studies on the integration of the new machine vision system are carried out along the value-added chain. The focus is on the early stages of manufacturing fiber-reinforced components. For the preforming of dry fiber textile fabrics and for the tapelaying of pre-impregnated fiber tapes the basic quality characteristic 'fiber orientation' is measured to determine the process capability. Additionally, the improvement in capability through the feedback of measurement results to the process as a control variable in closed quality control loops is examined.

The cross-case analysis of the machine vision integration leads to an industrialization theory, which sets out how the integration of manufacturing integrated machine vision systems in a generative composites production improves the process capability. Based on this industrialization theory three progressive recommendations for the successful integration of machine vision are formulated to support the necessary competence development for composite manufacturers away from a still manually conducted to an industrialized production.

Inhaltsübersicht

Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xvii
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
2 Industrialisierung des Faserverbundleichtbaus in der Praxis	15
3 Fertigungsintegrierte Messtechnik in der Wissenschaft	33
4 Machine-Vision-Messsystem	59
5 Fallstudien zur Machine-Vision-Integration	93
6 Industrialisierungstheorie zur Machine-Vision-Integration	123
7 Industrialisierende Machine-Vision-Integration im Faserverbundleichtbau	151
8 Zusammenfassung	159
Literaturverzeichnis	161
A Musterkatalog CFK-Gelege	173

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xvii
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Ziel der Arbeit	5
1.3 Forschungsdesign	8
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	11
2 Industrialisierung des Faserverbundleichtbaus in der Praxis	15
2.1 Industrialisierung	15
2.1.1 Industrialisierungsbegriff	15
2.1.2 Prozessfähigkeit als Industrialisierungskennzahl	15
2.2 Faserverbundkunststoffe	17
2.2.1 Allgemeine Eigenschaften	17
2.2.2 Verstärkungsfasern	17
2.2.3 Matrix	19
2.2.4 Textile Faserhalbzeuge	19
2.3 Branchenübersicht	20
2.4 Industrialisierung der Fertigungsverfahren	22
2.4.1 Heutiger Stand der Fertigung	22
2.4.2 Neue Textil- und Imprägnierverfahren	23
2.4.3 Industrialisierungsansätze	24
2.5 Handlungsbedarf aus der Praxis	30
3 Fertigungsintegrierte Messtechnik in der Wissenschaft	33
3.1 Fertigungsmesstechnik im Qualitätsmanagement	33
3.2 Nutzenbewertung von Messungen für die Produktion	35
3.2.1 Wert- und Wertschöpfungsbegriff	35
3.2.2 Qualitätsbezogene Kosten- und Leistungsrechnung	36
3.3 Fertigungsintegrierte Messungen in Qualitätsregelkreisen	41
3.3.1 Informationen über die Produktion durch Messen	41
3.3.2 Informationen im Qualitätsmanagement	42
3.3.3 Informationen in der Entscheidungstheorie	43

3.4	Lösungsansätze für die fertigungsintegrierte Faserverbundprüfung	45
3.4.1	Potenzial der etablierten Verfahren	46
3.4.2	Machine-Vision	47
3.4.3	Konzepte zur Sensordatenfusion	50
3.5	Grundlagen zur Beschreibung orientierter Strukturen	51
3.6	Implikationen zur industrialisierenden Messtechnik-Integration	54
3.6.1	Anforderungen an ein Machine-Vision-System	55
3.6.2	Anforderungen an eine industrialisierende Integrationsgestaltung	56
4	Machine-Vision-Messsystem	59
4.1	Machine-Vision-Systemkonzept	59
4.2	Aufbau des Machine-Vision-Basissystems	60
4.3	Ausdetaillierung der Machine-Vision-Methoden	61
4.3.1	Bildanalytische Messung der Faserorientierung	61
4.3.2	Optische 3D-Geometrie-Messung	71
4.4	Untersuchung der Messunsicherheit	74
4.4.1	Statistische Optimierung der Faserorientierungsmessung	75
4.4.2	Bestimmung der Messunsicherheit	88
4.5	Zwischenfazit zur technischen Machine-Vision-Gestaltung	92
5	Fallstudien zur Machine-Vision-Integration	93
5.1	Auswahl der Fallbeispiele	93
5.2	Komplexe Drapierung von CFK-Halbzeugen	96
5.2.1	Ausgangssituation	96
5.2.2	Zielsetzung	98
5.2.3	Aktion: Machine-Vision-Integration	99
5.2.4	Ergebnisse	101
5.2.5	Erkenntnisse zum Industrialisierungspotenzial	103
5.3	Automatisierte Handhabung von GFK-Halbzeugen	104
5.3.1	Ausgangssituation	104
5.3.2	Zielsetzung	105
5.3.3	Aktion: Machine-Vision-Integration	105
5.3.4	Ergebnisse	107
5.3.5	Erkenntnisse zum Industrialisierungspotenzial	109
5.4	Automatisiertes Flechten von CFK-Preforms	110
5.4.1	Ausgangssituation	110
5.4.2	Zielsetzung	111
5.4.3	Aktion: Machine-Vision-Integration	111
5.4.4	Ergebnisse	113
5.4.5	Erkenntnisse zum Industrialisierungspotenzial	116
5.5	Automatisches Tapelegen	116
5.5.1	Ausgangssituation	116
5.5.2	Zielsetzung	118
5.5.3	Aktion: Machine-Vision-Integration	118
5.5.4	Ergebnisse	119

5.5.5	Erkenntnisse zum Industrialisierungspotenzial	119
6	Industrialisierungstheorie zur Machine-Vision-Integration	123
6.1	Fallübergreifende Analyse der Integration	123
6.2	Modellgrundlage zur Industrialisierungstheorie	125
6.3	Konstitutive Bestandteile	127
6.3.1	Stochastische Abhängigkeit von Fertigungs- und Messprozess	127
6.3.2	Entscheidungsabhängige Umweltsituationen	128
6.3.3	Quantifizierung des Integrationsnutzens	129
6.3.4	Integration von Entscheidungsbaum und Qualitätsregelkreis	130
6.3.5	Systemgrenzen bei generativer Fertigung	130
6.3.6	Zwischenfazit	130
6.4	Entscheidungsbasierte Industrialisierungstheorie	132
6.4.1	Basismodell „Wert von Informationen durch Messen“	132
6.4.2	Modelleinbettung von Qualitätsregelkreisen	136
6.4.3	Nutzenbewertung der Fertigungsintegration	140
7	Industrialisierende Machine-Vision-Integration im Faserverbundleichtbau	151
7.1	Erkenntnisgewinn	151
7.2	Handlungsempfehlungen für die Praxis	154
7.2.1	Integrationsgestaltung „Lernen über Material und Fertigung“	154
7.2.2	Integrationsgestaltung „Fertigungsintegrierte Qualitätssicherung“	154
7.2.3	Integrationsgestaltung „Automatisierende Qualitätsregelkreise“	155
7.3	Kritische Reflexion	155
7.4	Zukünftige Machine-Vision-Integration im Faserverbundleichtbau	157
8	Zusammenfassung	159
	Literaturverzeichnis	161
A	Musterkatalog CFK-Gelege	173
A.1	Erläuterungen zum Musterkatalog	173
A.2	Musterkatalog	175

Abbildungsverzeichnis

1.1	Herstellung von CFK-Bauteilen für die Luftfahrt	3
1.2	Ausschnitt aus der Wertschöpfungskette: textile Faserverbundproduktion	3
1.3	„Die Hürde zur Großserie“	5
1.4	Zielbild zur Kostensenkung durch integrierte Qualitätsregelung	6
1.5	Forschungsfrage und deren Konkretisierung	8
1.6	Forschungsprozess	11
1.7	Aufbau der Arbeit zum gewählten explorativen Forschungsdesign	12
2.1	Eigenschaften von Verstärkungsfasern	18
2.2	Weltweite Produktionsvolumina und Wachstumsraten	21
2.3	Automatisierte CFK-Spant-Fertigung	29
3.1	Zusammenhang zwischen Qualitäts- und Opportunitätskosten	40
3.2	Modell des Regelkreises	42
3.3	Basiselemente eines Entscheidungsmodells	43
4.1	Morphologie zum Aufbau des Machine-Vision-Systems	61
4.2	Beispiel eines konfigurierten Machine-Vision-Systems	62
4.3	Prüfbild eines typischen Kohlenstofffasergeleges	63
4.4	Modell zur Bestimmung der Faserorientierung	64
4.5	Segmentierungsergebnis der Nähte aus dem Grauwert-Histogramm	65
4.6	Segmentierungsergebnis der Nähte nach morphologischen Filtern	66
4.7	Diskrete 2D-Gauß-Ableitungsfiler mit Querglättung	68
4.8	Ableitungen des Prüfbildes I	68
4.9	Glättungsfilter B (13×13 Px, $\sigma_B = 3$)	69
4.10	Komponenten des Strukturtenors	70
4.11	Ergebnisse der lokalen Orientierungsbestimmung	71
4.12	Globale Orientierungsbestimmung	72
4.13	Positionsmessung eines Dickensprunges bei einem Glasfasergelege	73
4.14	Machine-Vision-System für die Spantentwicklung am DLR, Braunschweig	74
4.15	Auswahl der Faktoren und Faktorstufen	77
4.16	Prüfstand mit MVS für den statistischen Versuch	78
4.17	Texturbilder bei unterschiedlichen Auflösungen und konstantem Sichtfeld	79
4.18	Vergleichsmessung zur Bestimmung der Messunsicherheit	80
4.19	Ergebnisse des Versuchs zur systematischen Messabweichung	83
4.20	Ergebnisse des Versuchs zur Streuung der Messungen	86
4.21	Bestimmung der Messunsicherheit durch Vergleichsmessungen	89
4.22	Vergleichsmessung zur Bestimmung der Faserorientierung	91

5.1	Fertigungsablauf zum Aufbau eines CFK-Spantes	98
5.2	Machine-Vision-Integration in die Spantfertigung	99
5.3	Prüfbilder der Sektionen 13, 14 und 16 einer Spant-Decklage	100
5.4	Qualitätslandkarte der Faserorientierungsmessung einer Spant-Decklage	102
5.5	Untersuchungsergebnisse zur Prozessfähigkeit des Spant-Preformings	104
5.6	Machine-Vision-Integration beim roboterbasierten Preformingprozess	106
5.7	Bildverarbeitung zur Bestimmung und Referenzierung der Faserorientierung	106
5.8	Untersuchungsergebnisse zur Prozessfähigkeit beim Drapieren	109
5.9	Beispiele zum Radialumflechten aus der Automobilindustrie	110
5.10	Flechtmaschine und -prozessparameter	111
5.11	Integration des Machine-Vision-Systems in den Umflechtprozess	112
5.12	Flechtversuche (Sollwinkel oben: 30°; mittig: 45°; unten: 60°)	114
5.13	Untersuchungsergebnisse zur Prozessfähigkeit des Radialumflechtens	115
5.14	Verbesserung der Prozessfähigkeit durch Prozessregelung	115
5.15	MAG Tapelegemaschine und Beispiel eines Laminataufbaus	118
5.16	Lösungsansatz zur Messung der Prozessfähigkeit	119
5.17	Machine-Vision-Integration für das Tapelegen von Prepreg-Bändern	120
5.18	Prozessfähigkeitskennwerte bei Spaltnmessungen	120
6.1	Stochastische Abhängigkeit des Messergebnisses vom Fertigungsprozess	134
6.2	Entscheidungsbaum zur Modellunterstützung	137
6.3	Einbettung des Entscheidungsbaums in einen Qualitätsregelkreis	138
6.4	Erhöhung des Outputs beim iterativen regelungstechnischen Eingriff	140
6.5	Beispiele zur Streuung des generativen Fertigungsprozesses	149
6.6	Präventionsleistung beim generativen Faserverbundaufbau	150
7.1	Modellbildung und Erkenntnisgewinn	152

Tabellenverzeichnis

2.1	Anforderungen im Praxiszusammenhang	32
3.1	Entscheidungsmatrix	44
3.2	Klassifizierung der Eigenwerte des Strukturtenors	53
3.3	Anforderungen an das Machine-Vision-System	56
4.1	Varianzanalyse zur systematischen Abweichung	85
4.2	Varianzanalyse zur zufälligen Abweichung (Streuung)	87
5.1	Ausgewählte Fallstudien	95
5.2	Positionsgenauigkeit des Robotersystems	100
5.3	Messergebnisse zum Greifen (G) und Ablegen (A)	108
6.1	Bewertung der Umweltsituation in Abhängigkeit der Handlungsalternative	129
6.2	Spiegelung der Modellelemente an den Anforderungen	131
6.3	Entscheidungsfeld als Modellgrundlage	136
6.4	Zusammenfassung der Nutzenwerte u im Entscheidungsfeld	147

