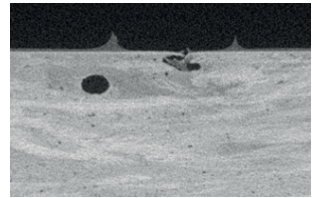
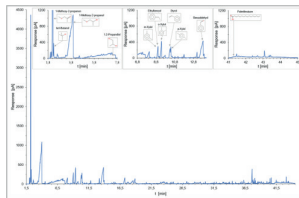
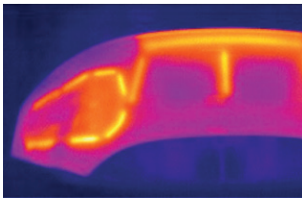


Beitrag zur Reduzierung der Fehlerhäufigkeit bei der Online-Lackierung von SMC-Außenhautbauteilen

Johannes Huber

**Band
2021/50**



Beitrag zur Reduzierung der Fehlerhäufigkeit bei der Online-Lackierung von SMC-Außenhautbauteilen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Johannes Huber, M.Sc. M. Eng.
aus Dingolfing

Tag des Kolloquiums: 03. August 2021
Referent: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Bremser

Schriftenreihe Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen

Band 50/2021

Johannes Huber

**Beitrag zur Reduzierung der Fehlerhäufigkeit bei der
Online-Lackierung von SMC-Außenhautbauteilen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8222-7

ISSN 2196-2200

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die hier vorliegende Dissertation entstand während meiner Teilnahme am ProMotion-Doktorandenprogramm der BMW Group im Bereich Technische Planung Karosseriebau am Standort Dingolfing.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster, welcher durch seine Kooperationsbereitschaft diese Arbeit ermöglicht und fortan fachlich betreut hat. Durch seine hilfreichen Anregungen konnte ich schnell einen wissenschaftlichen Zugang zu den industriellen Fragestellungen finden.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Bremser möchte ich mich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats bedanken.

Ebenso danke ich meinen unternehmensinternen Vorgesetzten Herrn Klaus Sammer und Herrn Matthias Schröder, ohne deren Vertrauen und Unterstützung die Ausarbeitung der Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Für die Überlassung der Themenstellung und die hervorragende Betreuung seitens der BMW Group danke ich Herrn Dr.-Ing. Daniel Enge. Mit seinem Erfahrungsreichtum und der stets dagewesenen Gesprächsbereitschaft stand er mir von Beginn an zur Seite und hat somit maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Den Kollegen der beteiligten Fachabteilungen danke ich für ihre Kollegialität, ihre guten Ratschläge und die stets dagewesene Hilfsbereitschaft. Namentlich möchte ich hier Frau Ingrid Maller, Frau Brigitte Wimbauer, Herrn Günther Mayer, Herrn Manfred Eberl, Herrn Markus Ehrl, Herrn Dominik Widbiller und Herrn Gerhard Meier nennen. Vor allem Herr Gerhard Meier konnte aufgrund seiner fachlichen Kompetenz stets wertvolle Ansätze zur Lösungsfindung einbringen und hat daher den Gang der Arbeit mitgeprägt. Allen Studienabschlussarbeitern und Praktikanten danke ich ebenfalls für ihre Unterstützung.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern Rosa und Hans danken, dass sie mir durch ihre kontinuierliche Unterstützung und die vorausschauende Förderung diesen akademischen und beruflichen Werdegang ermöglicht haben. Mein größter Dank gilt jedoch meiner Freundin Sabine. Durch ihr permanentes Verständnis und die grenzenlose Geduld war sie mir während der Arbeitserstellung eine unverzichtbare Hilfe.

Paderborn, im August 2021

Kurzzusammenfassung

Der Verbau von Sheet Moulding Compounds im automobilen Außenhautbereich führt in der industriellen Praxis regelmäßig zu abnehmenden Direktläuferquoten in der Technologie Oberfläche, denn neben bekannten Lackierfehlern ergeben sich auch werkstoff-spezifische Oberflächendefekte, welche einen Bauteilwechsel bedingen. Die hier vorliegende Arbeit soll einen aktiven Beitrag zur Reduzierung von Ausschuss und Nacharbeit entlang der Lackierprozesskette leisten. Zu Beginn werden die erfolgskritischen Oberflächendefekte identifiziert und die zugehörigen Fehlerursachen ermittelt, ehe anschließend die Entwicklung der Fehlstellengrößen in Folge der Temperaturbelastung während der Trocknerdurchfahrten untersucht wird. Ferner soll die Auswirkung einer zusätzlich applizierten Oberflächengrundierung auf die Fehlerhäufigkeit sowie die Oberflächengüte im decklackierten Zustand geprüft werden. Als weitere Möglichkeit zur Problemlösung wird eine in den Prozessablauf integrierte Qualitätskontrolle gesehen, weshalb in dieser Arbeit ebenso die Eignung bekannter zerstörungsfreier Prüfmethode für die präventive Fehlererkennung überprüft und ein zweistufiges Prüfkonzept erarbeitet wird. Das Aufzeigen möglicher Handlungsalternativen sowie die kostentechnische Gegenüberstellung der verschiedenen Anbauvarianten runden die Arbeit ab.

Abstract

In industrial practice the shoring of Sheet Moulding Compounds at the automotive exterior frequently induces decreasing first passes at the paint shop, because in addition to traditional paint defects there are material-specific faults, which require a component replacement. This thesis is intended to make an active contribution to reduce scrap and rework along the process chain. Initially all critical surface defects are identified and the associated error causes are determined, before the increase of void volumes as a result of high temperatures along the process chain is investigated. Furthermore the impact of an added primer coating on defect frequency and surface quality after top coating is examined. Another way of solving the problem could be to integrate an inline quality control into the process cycle, so that the suitability of known non-destructive testing methods for early identification of defects is checked and a two-step inspection concept gets developed. At the end of the thesis available options for Online-Painting are presented and a cost comparison method is carried out.

Teilergebnisse dieser Arbeit sind in folgenden Veröffentlichungen erschienen:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung.....	1
1.2	Abgrenzung der Themenstellung.....	4
1.3	Aufbau der Arbeit	6
2	Grundlagen und aktueller Stand der Technik	9
2.1	Sheet Moulding Compounds	9
2.1.1	Halbzeugherstellung und Verfahrenstechnik.....	9
2.1.2	Materialzusammensetzung, Rheologie und Fließverhalten ...	12
2.1.3	Eigenschaftsprofil und Anwendungsbeispiele	18
2.2	Oberflächenqualität automobiler Außenhautbauteile	21
2.2.1	Anforderungen an Außenhautbauteile	21
2.2.2	Begriffsdefinition „Class A-Oberfläche“	23
2.2.3	Möglichkeiten zur Oberflächenklassifizierung	24
3	Großserienfertigung von SMC-Exterieurbauteilen	29
3.1	Konstruktion von SMC-Außenhautbauteilen	29
3.2	Wertschöpfungskette und Prozessablauf.....	31
3.2.1	Formteilherstellung	31
3.2.2	Anbau und Serienlackierung.....	37
3.3	Maßnahmen zur Qualitätssicherung	43
3.3.1	Rohmaterial und Halbzeug	43
3.3.2	Formteilherstellung	44
3.3.3	Lackierprozess	46
3.4	Fehlerbilder und Oberflächendefekte.....	47
3.4.1	Anwendungsbeispiel 1.....	47
3.4.2	Anwendungsbeispiel 2.....	48
3.4.3	Anwendungsbeispiel 3.....	50
3.5	Kritische Betrachtung und Zwischenfazit	51
3.5.1	Prozesskette und Logistik	51
3.5.2	Einfluss des Fließpressprozesses.....	52
3.5.3	Thermische Belastung	54
4	Aufarbeitung werkstoffspezifischer Oberflächendefekte	57
4.1	Einteilung und Zuordnung	57
4.2	Ausgasung	58
4.3	Blasenbildung.....	61

4.4	Oberflächenwelligkeit.....	66
4.5	Randporosität, Pinholebildung	70
4.6	Kleberauppenabzeichnung	74
5	Detailbetrachtung des Fehlerbilds „Ausgasungen“	79
5.1	Entstehungszeitpunkt und -hintergrund	79
5.2	Porenwachstum entlang der Prozesskette.....	82
5.2.1	Versuchsplanung und -durchführung	82
5.2.1.1	Prüfkörperherstellung	82
5.2.1.2	Parametereinstellung und Auswertemethodik	83
5.2.1.3	Versuchsablauf.....	84
5.2.2	Ergebnisauswertung	85
5.2.2.1	Ermitteltes Porenwachstum	85
5.2.2.2	Einfluss der Porengröße	87
5.2.2.3	Einfluss des Randabstands	87
5.2.2.4	Reproduzierbarkeit und Fehlerabschätzung.....	88
5.3	Substratmissionen während der Trocknerdurchfahrten.....	89
5.3.1	Versuchsplanung und -durchführung	89
5.3.1.1	Prüfkörperherstellung	89
5.3.1.2	Versuchsablauf.....	90
5.3.1.3	Verwendete Gerätschaften	93
5.3.2	Auswertung der Ergebnisse	93
5.3.2.1	Ermittelter Massenverlust und Emissionszusammensetzung	93
5.3.2.2	Einfluss der IMC-Beschichtung	95
5.3.2.3	Einfluss der Vortemperung	97
5.3.2.4	Einfluss des Anbauzeitpunkts	99
5.4	Zusammenfassung und Zwischenfazit.....	101
6	Einfluss einer Oberflächenversiegelung auf das Lackierergebnis	103
6.1	Grundlagen zur Oberflächenversiegelung.....	103
6.1.1	Funktion und Motivation.....	103
6.1.2	Ausgewählte Materialien.....	103
6.2	Beitrag zur Erreichung einer Class A-Oberfläche.....	104
6.2.1	Versuchsplanung und -durchführung	104
6.2.1.1	Prüfkörperherstellung	104
6.2.1.2	Versuchsablauf.....	105
6.2.1.3	Auswertemethodik	106
6.2.2	Auswertung der Ergebnisse	107
6.2.2.1	Erreichte Oberflächenqualität	107
6.2.2.2	Einfluss der Oberflächenvorbehandlung	108

6.2.2.3	Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit	110
6.2.2.4	Einfluss der freien Grenzflächenenergie	111
6.3	Beitrag zur Reduzierung der Substratmissionen	113
6.3.1	Versuchsplanung und -durchführung	113
6.3.2	Auswertung der Ergebnisse	114
6.3.2.1	Einfluss der Grundierung A.....	114
6.3.2.2	Einfluss der Grundierung B.....	116
6.4	Zusammenfassung und Zwischenfazit.....	117
7	Möglichkeiten zur präventiven Fehlererkennung.....	121
7.1	Auswahl zerstörungsfreier Prüfmethoden	121
7.2	Praktische Anwendung auf Versuchskörpern	122
7.2.1	Röntgen-Computertomographie.....	122
7.2.1.1	Gerätetechnischer Aufbau und Parametereinstellung.....	122
7.2.1.2	Detektierbare Oberflächendefekte	123
7.2.2	Röntgendurchstrahlung	125
7.2.2.1	Gerätetechnischer Aufbau und Parametereinstellung.....	125
7.2.2.2	Detektierbare Oberflächendefekte	127
7.2.3	Thermographie	129
7.2.3.1	Gerätetechnischer Aufbau und Parametereinstellung.....	129
7.2.3.2	Detektierbare Oberflächendefekte	130
7.2.4	Ultraschallprüfung.....	132
7.2.4.1	Gerätetechnischer Aufbau und Parametereinstellung.....	132
7.2.4.2	Detektierbare Oberflächendefekte	133
7.3	Zusammenfassung und Zwischenfazit.....	135
7.4	Konzeptvorschlag für die Inline-Qualitätskontrolle	137
8	Bewertung der Großserientauglichkeit einer Online-Lackierung	141
8.1	Situationsanalyse im Fahrzeugwerk	141
8.2	Handlungsalternativen bei der Bauteilmontage	142
8.2.1	Inline-Anbau	142
8.2.2	Offline-Anbau.....	143
8.3	Kostentechnische Gegenüberstellung	144
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
10	Abkürzungen und Symbole	149

11 Literaturverzeichnis.....	153
12 Anhang.....	165
12.1 Anhang zu Kapitel 4.4.....	165
12.2 Anhang zu Kapitel 5.2.2.1.....	166
12.3 Anhang zu Kapitel 5.2.2.4.....	167
12.4 Anhang zu Kapitel 5.3.1.3.....	168
12.5 Anhang zu Kapitel 5.3.2.....	169
12.6 Anhang zu Kapitel 6.2.2.1.....	170
12.7 Anhang zu Kapitel 6.2.2.4.....	172
12.8 Anhang zu Kapitel 6.3.2.1.....	173
12.9 Anhang zu Kapitel 6.3.2.2.....	174
12.10 Studentische Arbeiten.....	175