

**Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von
CFK-Bauteilen für die fertigungsbegleitende
Qualitätssicherung im Automobilbau**

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Dipl.-Ing. Antje Kochan
geb. am 17. März 1981 in Halle (Saale)

Berichte aus der Kunststofftechnik

Antje Kochan

**Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung
von CFK-Bauteilen für die fertigungsbegleitende
Qualitätssicherung im Automobilbau**

Shaker Verlag
Aachen 2012

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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2011

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0820-3

ISSN 1433-9978

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner dreijährigen Tätigkeit als Doktorandin in der Konzernforschung der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Besonderer Dank für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. W. Hufenbach, Leiter des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik der Technischen Universität Dresden. Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. H.-J. Ullrich danke ich für die eingehende Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Koreferates. Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. G. Heinrich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Dr. M. Ehleben für die kritische Durchsicht der Arbeit, die Unterstützung während meiner Zeit in der Konzernforschung und die fachliche Begleitung sowie die kompetenten Ratschläge und Anregungen bedanken.

Herrn Dr. H. Kurz sowie die Kollegen der Forschung und des FKV-Technikums sowie des Qualitätslabores danke ich für die hervorragende Unterstützung seitens der Volkswagen AG. Seitens des Institutes bedanke ich mich für die Unterstützung bei Herrn Oberingenieur Dr.-Ing. F. Adam.

Des Weiteren gilt mein Dank meinen Kollegen, Diplomanden und alle weiteren Personen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meiner Familie möchte ich für Ihr Verständnis danken. Mein besonderer und herzlicher Dank gilt meinem Freund Robert für die Unterstützung und seine endlose Geduld.

Braunschweig, Februar 2011

Antje Kochan

Kurzfassung

Ein großer Vorteil von Kunststoffbauteilen ist neben funktionellen Vorzügen die Kosten- und Gewichtsreduzierung durch integrale Gestaltungsmöglichkeiten. Es können Geometrien umgesetzt werden, die mit metallischen Werkstoffen nur unter hohem Aufwand realisierbar sind. Insbesondere im Bereich der Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) gibt es hohen Forschungsbedarf hinsichtlich Reduzierung von Herstellungskosten, Erhöhung der Langlebigkeit aber auch der Reparaturfähigkeit. Die Erkennung von Defekten ist dabei eine grundlegende Voraussetzung. Für einen FKV-Serieneinsatz im Automobilbau gibt es jedoch kein bekanntes und ausreichendes Prüfkonzept der Schadenserkenkung für die geforderten Stückzahlen. Die aus der Luft- und Raumfahrt bekannten Methoden lassen sich aufgrund ihres hohen apparativen Aufwandes und der eingeschränkten Tauglichkeit bezüglich geometrisch komplexer Bauteile nicht unmittelbar übernehmen. Es bestehen andere Anforderungen an ein Prüfkonzept für FKV-Bauteile im Automobilbau. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zerstörungsfreie Prüfmethoden hinsichtlich ihrer Eignung zur Detektion nicht sichtbarer Schäden systematisch untersucht und bewertet. Der Fokus lag dabei auf Bauteilen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen des Automobils, die sowohl eine flächige als auch eine mehrfach gekrümmte Bauteilstruktur mit nicht-homogenen Wanddicken aufweisen können. In Abhängigkeit von der Art der Schädigung, etwa Einschlüsse, Zwischenfaserrisse oder Delaminationen wurden die unterschiedlichen Verfahren vergleichend in Hinblick auf Detektionssicherheit, -grenzen und Einschränkungen durch gegebene geometrische sowie werkstoffliche Bauteilausführungen bewertet und ein Konzept für eine fertigungsbegleitende Qualitätssicherung entwickelt.

Schlagwörter: zerstörungsfreie Prüfung, kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, Ultraschall-Prüfung, Thermografie-Prüfung, Röntgen

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung - CFK-Bauteile im Automobilbau	1
1.1. Ausgangssituation - thematische Einführung	1
1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise	2
2. Grundlagen - Stand der Technik	5
2.1. Zerstörungsfreie Prüfung	5
2.1.1. Radiografische Verfahren	7
2.1.2. Elektrische Verfahren	9
2.1.3. Optische Verfahren	11
2.1.4. Thermografische Verfahren	13
2.1.5. Akustische Verfahren	16
2.2. Qualitätssicherung	20
2.2.1. Aufgaben der Qualitätssicherung im Produktentstehungsprozess . .	20
2.2.2. FMEA und Fehlerbaumanalyse	22
2.2.3. Qualitätsprüfung und Rolle der zerstörungsfreien Prüfung	25
2.2.4. Qualitätssicherung in der Fertigung im Automobilbau	26
3. Analyse potentieller Fehler im Fertigungsprozess von CFK-Bauteilen	29
3.1. Fehler und ihre Fehler-Schadens-Grenze	29
3.2. Durchführung einer FMEA im CFK-Fertigungsprozess	32
3.2.1. Durchführung FMEA - RTM-Fertigung	33
3.2.2. Ergebnisse FMEA	37
3.3. Spezifische Bauteilfehler	39
3.3.1. Luftporeneinschlüsse	39
3.3.2. Fremdstoffeinschlüsse	40
3.3.3. Delaminationen	41
3.3.4. Stoß- bzw. Schlagbeanspruchung - Impact	42
4. Systematische Untersuchungen - ZfP von CFK-Prüfkörpern	45
4.1. Auswahl geeigneter zerstörungsfreier Prüfverfahren	45
4.2. Versuchsaufbau und Prüftechnik	49
4.2.1. Thermografie-Untersuchungen	49
4.2.2. Röntgen-Untersuchungen	52
4.2.3. Ultraschall-Untersuchungen	54
4.3. Prüfkörperaufbau und -herstellung	59
4.3.1. Erzeugung von künstlichen Imperfektionen	60
4.3.2. Einfluss der Prüfkörperoberfläche	67
4.3.3. Einfluss der Fertigungsparameter	70
4.4. Diskussion der Ergebnisse der Platten-Prüfkörper	79
4.4.1. Ultraschall-Tauchbad-Untersuchungen	79
4.4.2. Gegenüberstellung unterschiedlicher Ultraschallprüftechniken	86
4.4.3. Untersuchungen mit optisch angeregter Lockin-Thermografie	87
4.4.4. Röntgen-Untersuchungen	94
4.5. Diskussion der Ergebnisse der Profil-Prüfkörper	102
4.5.1. Profil PR01 - Geometrien	102

4.5.2. Profil PR02 - Hohlprofil mit Verklebungen	105
4.5.3. Profil PR03 - mit PUR-Hartschaumstoff	109
4.6. Zusammenfassung der Ergebnisse	112
5. Anwendung - Überprüfung der Anwendbarkeit der ZfP-Methoden an einem CFK-Bauteil	115
5.1. Versuchsaufbau und Prüftechnik	115
5.2. Diskussion der Ergebnisse	117
6. ZfP im Serienprozess - Fertigungsbegleitende QS im Automobilbau	124
6.1. Anforderungen an eine fertigungsbegleitende QS	124
6.2. Eingliederung in die Serienfertigung	126
6.3. Prüfkonzept und technische Aspekte	128
6.3.1. Variationen im Aufbau einer Prüfanlage	128
6.3.2. Erprobung einer möglichen Serienprüfung am Beispiel Thermografie	131
6.3.3. Einflussgrößen auf die Prüfung in der automobilen Serienanwendung	132
6.4. Fazit der Konzeptuntersuchungen einer serienbegleitenden ZfP	138
7. Zusammenfassung	139
Literaturverzeichnis	141
A. Anhang	i
A.1. FMEA - Fehlerfunktionsanalyse	i
A.2. FMEA - Ergebnisse	iv
A.3. Übersicht Prüfkörper	xi
A.4. ZfP Normen	xvii

Formelzeichen und Begriffsdefinitionen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	[-]	Amplitude
A_M	[μm]	Mittlerer Faserabstand
a	[mm^2/s]	Temperaturleitfähigkeit
c	[m/s]	Schallgeschwindigkeit im Ausbreitungsmedium
c_p	[J/gK]	Spezifische Wärme
d	[cm]	Ausbreitungsdicke
f	[Hz]	Frequenz
I	[-]	Intensität
I_0	[-]	Ausgangsintensität
$I_{x,y}$	[cm]	Blickfeld
$InSb$	[-]	Indiumantimonid
L	[cm]	Abstand Kamera zu Prüfobjekt
N	[mm]	Nahfeldlänge
p	[Pa]	Schallwechseldruck
p_0	[Pa]	Ausgangswert Schallwechseldruck
$S_{1...4}$	[-]	Messpunkte
T	[$^{\circ}\text{C}$]	Temperatur
x	[cm]	Ausbreitungsrichtung
Z	[-]	Ordnungszahl
α, β	[$^{\circ}$]	Öffnungswinkel Kamera
γ	[$^{\circ}$]	Divergenzwinkel
λ	[μm]	Wellenlänge
λ_T	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
μ	[-]	Schwächungskoeffizient
ρ	[g/cm^3]	Dichte
ϕ	[rad]	Phasenwert
ω	[Hz]	Modulationsfrequenz
$\varnothing$	[cm]	Durchmesser
$\perp$		senkrecht
$\parallel$		parallel

Abkürzung	Bedeutung
b.i.O.	bedingt in Ordnung
CCD	Charge-Coupled Device
CFK	Kohlenstoffaserverstärkter Kunststoffverbund
CT	Computertomografie
DFMAS	Design For Manufacture, Assembly and Service
EPS	Expandierte Polystyrol-Kugeln
EOP	End Of Production
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie
FOV	Field Of View
MFU	Maschinenfähigkeitsuntersuchung
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
OLT	Optische Lockin-Thermografie
PEP	Produktentstehungsprozess
PMMA	Polymethylmethacrylat
Prepreg	Pre-impregnated
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
QFD	Quality Function Deployment
QS	Qualitätssicherung
QM	Qualitätsmanagement
RCT	Röntgen-Computertomografie
RTM	Resin Transfer Moulding
SPC	Statistische Prozessregelung
SOP	Start of Production
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional