

Light Engineering für die Praxis

Philipp Thumann

Laserbasierte Kleblächenvorbereitung für CFK Strukturbauteile

Herausgegeben von Claus Emmelmann

 Springer Vieweg

Light Engineering für die Praxis

Reihe herausgegeben von

Claus Emmelmann, Hamburg, Deutschland

Technologie- und Wissenstransfer für die photonische Industrie ist der Inhalt dieser Buchreihe. Der Herausgeber leitet das Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik an der Technischen Universität Hamburg sowie die Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT. Die Inhalte eröffnen den Lesern in der Forschung und in Unternehmen die Möglichkeit, innovative Produkte und Prozesse zu erkennen und so ihre Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig zu stärken. Die Kenntnisse dienen der Weiterbildung von Ingenieuren und Multiplikatoren für die Produktentwicklung sowie die Produktions- und Lasertechnik, sie beinhalten die Entwicklung lasergestützter Produktionstechnologien und der Qualitätssicherung von Laserprozessen und Anlagen sowie Anleitungen für Beratungs- und Ausbildungsdienstleistungen für die Industrie.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13397>

Philipp Thumann

Laserbasierte Klebfächenvorbereitung für CFK Strukturbauteile

Philipp Thumann
Institut für Laser- und
Anlagensystemtechnik (iLAS)
Technische Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland

ISSN 2522-8447

ISSN 2522-8455 (electronic)

Light Engineering für die Praxis

ISBN 978-3-662-62240-7

ISBN 978-3-662-62241-4 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-62241-4>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Speicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Zusammenfassung

Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff ist einer der zentralen Konstruktionswerkstoffe moderner Verkehrsflugzeuge. Neben der Herstellung stellt dabei die Reparatur von CFK Bauteilen eine zentrale Herausforderung dar und bildet ein Schlüsselement für einen wirtschaftlichen Betrieb. Eine rein adhäsive Reparatur von CFK Strukturbauteilen wäre dabei der vorteilhafteste Ansatz, welcher jedoch aufgrund von Zulassungsvorschriften bis heute nicht eingesetzt werden kann. Um den Weg für die Zulassung des Prozesses zu ebnen, wurde in der vorliegenden Arbeit ein Prozess zur laserbasierten Klebflächenvorbereitung entwickelt, welcher die Herstellung von reproduzierbaren Klebverbindungen ermöglicht.

Für die Entwicklung des Laserprozesses wurde ein dualer Ansatz aus empirischer und virtueller Prozessentwicklung gewählt. Im Rahmen der empirischen Prozessentwicklung wurden thermische Prozessmodelle zur Beschreibung der Prozesstemperaturentwicklung durch Thermographiemessungen und Regressionsanalysen hergeleitet, statistisch überprüft und validiert. Mit Hilfe dieser Prozessmodelle konnten Parameterkombinationen entwickelt werden, die eine homogene Prozesstemperatur und damit eine homogene Klebflächenvorbereitung erlauben. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen wurden hinsichtlich ihrer optischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine Faserfreilegung zur Klebflächenvorbereitung ohne Schädigung möglich ist und eine Verbesserung der mechanischen Festigkeit der Klebverbindung von ca. 2% bis 8% erzielbar ist, wobei ein vornehmlich kohäsives Versagen und so ein definierter Versagensmechanismus erreicht wird.

Im Rahmen der virtuellen Prozessentwicklung wurde mittels eines transienten, dreidimensionalen Finite-Elemente-Modells der entwickelte Prozess auf komplexe, anwendungsrelevante Geometrien übertragen. Durch die Kombination der transienten FEM Berechnung, einer Formulierung der Temperaturentwicklung als Nullstellenproblem und Ansätzen zur Komplexitätsreduzierung konnte eine effiziente Methodik zur Steuerung von Laserprozessen entwickelt und durch Thermographiemessungen validiert werden. Durch den Einsatz dieser Methodik ist eine Kontrolle der Prozesstemperatur für beliebig gekrümmte Arbeitsbereiche möglich.

Auf diese Weise konnte der Stand der Wissenschaft um verschiedene, neuartige methodische Ansätze zur Beschreibung und Steuerung von Laserprozessen erweitert werden. Darüber hinaus wurde die Eignung des entwickelten Prozesses zur Klebflächenvorbereitung für die Reparatur von CFK Strukturbauteilen nachgewiesen. Abschließende Untersuchungen zur Industrialisierung konnten zudem zeigen, dass mit dem entwickelten Laserprozess und der ausgewählten Systemtechnik ein wirtschaftlicher Reparaturprozess ermöglicht wird, der in allen drei Dimensionen Zeit, Kosten und Qualität einen Vorteil gegenüber dem konventionellen Ansatz darstellt.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Dr.-Ing. Claus Emmelmann, der die Arbeit als Doktorvater begleitet hat. Ich danke Herrn Prof. Emmelmann für die Chance, an diesem Thema forschen zu dürfen und für die stete Unterstützung. Darüber hinaus danke ich meinem Zweitgutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bodo Fiedler sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.

Weiterhin möchte ich all den Kollegen danken, mit denen ich über die Jahre zusammenarbeiten durfte. Die gegenseitige Unterstützung bei der Arbeit hat ganz wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Ganz besonders danke ich dabei Herrn Dr.-Ing. Marten Canisius, Herrn Dr.-Ing Max Oberlander, Herrn Mauritz Möller und Herrn Friedrich Proes sowie meinem studentischen Mitarbeiter und späteren Kollegen Herrn Alexander Bauch.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Familie und vor allem meiner Frau Anne für den Rückhalt über die Jahre und die Unterstützung auch in den intensivsten Phasen dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe	5
2.2	Klebtechnik	8
2.3	Strukturelle Kleb Reparaturen in der Luftfahrt	10
3	Stand von Wissenschaft und Technik	13
3.1	Nicht-laserbasierte Verfahren	13
3.1.1	Mechanische Verfahren	13
3.1.2	Chemische Verfahren	14
3.1.3	<i>Peel-Ply</i> Verfahren	15
3.1.4	Plasma Verfahren	16
3.2	Laserbasierte Verfahren	18
3.2.1	UV Laser	19
3.2.2	IR-A Laser	20
3.2.3	IR-C Laser	23
4	Forschungsbedarf und Entwicklungsstrategie	27
4.1	Ableitung des Forschungsbedarfs	27
4.2	Ziel der Arbeit	28
4.3	Entwicklungsstrategie	30
4.3.1	Methodisches Vorgehen	30
4.3.2	Material und Anlagentechnik	31
5	Empirische Prozessentwicklung	35
5.1	Entwicklung eines Modells zur Homogenisierung der Prozesstemperatur	35
5.1.1	Methodisches Vorgehen	37
5.1.2	Homogenisierung der Prozesstemperatur in Scanrichtung	40
5.1.3	Homogenisierung der Prozesstemperatur quer zur Scanrichtung	44
5.1.4	Validierung der Prozessmodelle	48
5.2	Versuchsplanung	49
5.2.1	Herleitung des Versuchsplans	51
5.2.2	Optische Analyse	52
5.2.3	Chemische Analyse	53
5.2.4	Mechanische Prüfung	54
5.3	Ergebnisse und Diskussion	55
5.3.1	Optische Analyse	56
5.3.2	Chemische Analyse	61
5.3.3	Mechanische Prüfung	63

5.3.4	Diskussion	65
6	Thermische Simulation des Aktivierungsprozesses	69
6.1	Modellbildung	69
6.1.1	Messung der Stoffwerte	70
6.1.2	Modellierung der Laserstrahlquelle	71
6.1.3	Optisches Modell der Absorption an der Oberfläche	73
6.1.4	Herleitung des analytischen Gesamtmodells	74
6.1.5	Numerische Simulation und Analyse des Gesamtmodells	75
6.1.6	Kalibrierung des Simulationsmodells	80
6.2	Simulation von Überlappungsbereichen	82
6.2.1	Ziel und Vorgehensweise	84
6.2.2	Ergebnisse und Validierung	87
6.2.3	Diskussion	89
6.3	Simulation von Randbereichen	90
6.3.1	Ziel und Vorgehensweise	92
6.3.2	Ergebnisse und Validierung	97
6.3.3	Diskussion	99
7	Übertragung des Aktivierungsprozesses in die industrielle Anwendung	101
7.1	3D Bearbeitung	101
7.2	Kostenanalyse	103
7.2.1	Herleitung des Maschinenstundensatzes	103
7.2.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	105
7.3	Prozesskettenintegration	109
8	Zusammenfassung	113
9	Ausblick	117
	Literaturverzeichnis	121

Abbildungsverzeichnis

1.1	Materialzusammensetzung der Boeing 787	1
1.2	Schematische Darstellung einer geschäfteten Reparaturstelle	2
2.1	Ideale Graphitstruktur einer Kohlenstofffaser	6
2.2	REM Aufnahme einer Kohlenstofffaser a) vor und b) nach der Oberflächenbehandlung	8
2.3	Aufbau einer Klebung	8
2.4	Versuchsaufbau, Probengeometrie und Verformung beim Zugscherversuch nach DIN EN 1465	9
2.5	Klassifikation von geklebten Faserverbundverbindungen	11
3.1	Risswachstum verklebter Proben in Abhängigkeit verschiedener Oberflächenvorbehandlungen	15
3.2	Scherfestigkeit und Konzentration der O=C-O Gruppe als Funktion der Plasmaüberfahrten	16
3.3	REM-Aufnahme der Mitte der bearbeiteten Fläche nach 50 Laserpulsen (Laserintensität $70,0 \text{ GW cm}^{-2}$, Fokusebene 3 mm über der Werkstückoberfläche)	17
3.4	Absorptionsspektrum eines Epoxidharzes	18
3.5	REM Aufnahmen der laserbehandelten Oberfläche mit niedriger Intensität (links), erhöhter Intensität (mitte) und hoher Intensität (rechts)	20
3.6	Ergebnisse des Zugscherversuchs verschiedener Oberflächenbehandlungen	20
3.7	Einfluss der Bearbeitungsrichtung auf die Oberflächenqualität	21
3.8	Schematische Darstellung der Scanstrategien	22
3.9	Versagensspannung in % der Festigkeit des Ausgangslaminats, dargestellt für verschiedene Laseraktivierungen, eine Standardreparatur und ein Laminat ohne Reparatur	22
3.10	REM Aufnahmen von unbehandeltem (a) und laservorbehandeltem (b-d) CFK	23
3.11	Ergebnisse des Zugscherversuchs für verschieden vorbehandelte Proben	24
3.12	Effekt der Oberflächenbearbeitung auf die Scherfestigkeit der Klebung	25
4.1	Methodik zur Prozessentwicklung	31
4.2	Anlagentechnik für die Laseraktivierung	32
4.3	Strahlkaustik des verwendeten Faserlasers	33
5.1	Berechnete Wärmeakkumulation durch nacheinander folgende Pulse	36
5.2	Belichtungsmuster der Aktivierung	38
5.3	Entwicklung der Wärmewelle für verschiedene Zeiten während der Abkühlphase	39

5.4	Streudiagramm der wahren Werte gegen geschätzte Werte des Prozessmodells in Scanrichtung	42
5.5	Streudiagramm der Residuen gegen geschätzte Werte des Prozessmodells in Scanrichtung	43
5.6	Histogramm der standardisierten Residuen des Prozessmodells in Scanrichtung	43
5.7	Streudiagramm der wahren Werte gegen geschätzte Werte des Prozessmodells quer zur Scanrichtung	46
5.8	Streudiagramm der Residuen gegen geschätzte Werte des Prozessmodells quer zur Scanrichtung	46
5.9	Histogramm der standardisierten Residuen des Prozessmodells quer zur Scanrichtung	47
5.10	Validierungsmessungen mit einem Spurabstand von 25% (links), bzw. 50% (rechts) des Fokusdurchmessers	49
5.11	Systemmodell der laserbasierten Oberflächenaktivierung	50
5.12	Vorversuch zur Bestimmung der Prozessgrenzen für die Pulsenergie	51
5.13	Probengeometrie der optischen Analyse	53
5.14	Probengeometrie und Messpunkte der chemischen Analyse	55
5.15	Probengeometrie zur mechanischen Prüfung	56
5.16	Vergleich einer geschliffenen Referenzprobe (oben) mit einer laserbearbeiteten Probe (unten, LP1)	56
5.17	Vergleich des Bearbeitungsergebnisses mit der niedrigsten mittlere Leistung (links, LP3) und der höchsten mittleren Leistung (rechts, LP7)	57
5.18	Getrennte Betrachtung der Faktoren Pulswiederholffrequenz (oben, steigend v.l.n.r. mit LP8, LP1, LP9) und Pulsenergie (unten, steigend v.l.n.r mit LP4, LP1, LP5)	58
5.19	Vergleich des Bearbeitungsergebnisses mit der niedrigsten mittlere Leistung (oben, LP3) und der höchsten mittleren Leistung (unten, LP7) mittels LSM	59
5.20	Aufnahmen der Messpunkte 1, 2 und 3 (v.o.n.u) auf einer mit LP2 bearbeiteten Probe mittels REM und LSM	60
5.21	Auswertung XPS Ergebnisse	62
5.22	Zugfestigkeiten der untersuchten Klebflächenvorbereitungen	64
5.23	Bruchflächenanalyse einer Referenzprobe (oben) und einer mittels LP6 bearbeiteten Probe	65
5.24	Ionenschnittaufnahme einer mit LP4 bearbeiteten Probe	66
6.1	Schematische Darstellung eines Laser Flash Messgeräts	70
6.2	Scangeschwindigkeit lt. Homogenisierungsmodell für verschiedene mittlere Leistungen	73
6.3	Modell der Netzverfeinerungsstudie	77
6.4	Entwicklung der Temperatur für verschiedene Rechengitter	78
6.5	Untersuchung der Zeitschrittweite	79
6.6	Modell zur Kalibrierung	81

6.7	Vergleich des gemessenen und simulierten Verlaufs der Zählrate mit dem ursprünglichen und angepassten Simulationsmodell	83
6.8	Betrachtung von Überlappungsbereichen	84
6.9	Prozessstrategie für Überlappungsbereiche	85
6.10	Untersuchung der Überlappung	85
6.11	Graphische Bestimmung der benötigten Pausenzeit	87
6.12	Simulationsergebnis der berechneten Pausenzeit	88
6.13	Validierungsmessung der Betrachtung von Überlappungsbereichen	88
6.14	Validierungsmessungen verschiedener Pausenzeiten	89
6.15	Untersuchung der Randbereiche der Kreisbelichtung mit LP4	91
6.16	Thermographiemessung am Anfang der Kreisbelichtung	92
6.17	Thermographiemessung am Ende der Kreisbelichtung	92
6.18	Partitionierung des Kreisendes	94
6.19	Berechnete Verzögerungszeiten $t_{d,i}$ zur Prozesstemperaturhomogenisierung des Kreisabschnitts	97
6.20	Thermographiemesswerte der klassische Bearbeitung der Beispielgeometrie mit natürlichen Sprungzeiten	98
6.21	Thermographiemesswerte der Bearbeitung der Beispielgeometrie mit angepassten Sprungzeiten	98
6.22	Besonderheit des Temperaturverlaufs in der letzten Sektion	100
7.1	Untersuchung der 3D Fähigkeit der Systemtechnik: Untersuchtes Laminat (links) und Bearbeitungsergebnis (rechts)	103
7.2	Genietete Rumpfreparatur	107
7.3	Prozesskette der Reparatur von CFK Strukturbauteilen	109
7.4	Mobile Reparaturlösungen zum automatisierten Schäften auf Basis eines Industrieroboters und einer Fünf-Achs-Maschine	110

Tabellenverzeichnis

4.1	Liste der Anlagenkomponenten	33
5.1	Einstellungen der Thermokamera (Prozessmodell in Scanrichtung)	41
5.2	<i>Variance Inflation Factors</i> des Prozessmodells in Scanrichtung	42
5.3	Einstellungen der Thermokamera (Prozessmodell quer zur Scanrichtung)	45
5.4	<i>Variance Inflation Factors</i> des Prozessmodells quer zur Scanrichtung	46
5.5	Einstellungen der Thermokamera (Validierung der Prozessmodelle)	48
5.6	Versuchsplan der empirischen Prozessentwicklung	52
5.7	Ergebnisse der XPS Messungen	61
6.1	Ermittelte Stoffwerte des untersuchten Materialsystems M21-T800S	71
6.2	Übersicht der Parameter der Netzverfeinerungsstudie	77
6.3	Einstellungen der Thermokamera	80
6.4	Parameter des angepassten Modells	82
6.5	Auswertung des Validierungsversuchs zu Überlappungsbereichen	89
7.1	Koeffizienten der Kalibrierungsfunktion des Fokussiersystems	102
7.2	Berechnung des Maschinenstundensatzes	104

Nomenklatur

Nach der gängigen Konvention werden Vektoren mit fett gedruckten Buchstaben und Konstanten sowie Variablen mit normalen Buchstaben bezeichnet. Indizes mit den Bezeichnungen x , y oder z geben die jeweilige Raumrichtung der entsprechenden Größe an.