

Daniel Szczepanski

# Ursachenforschung und Möglichkeiten zur Reduzierung des Grataufwurfs beim Laserabtragschneiden für Anwendungen im Fahrzeugbau

---

# **AutoUni – Schriftenreihe**

Band 106

**Herausgegeben von/Edited by**  
Volkswagen Aktiengesellschaft  
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen, fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

**Herausgegeben von/Edited by**

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

---

Daniel Szczepanski

Ursachenforschung  
und Möglichkeiten  
zur Reduzierung des  
Grataufwurfs beim  
Laserabtragschneiden  
für Anwendungen im  
Fahrzeugbau

 Springer

Daniel Szczepanski  
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2016

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe  
ISBN 978-3-658-19564-9                      ISBN 978-3-658-19565-6 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-19565-6>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

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 Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature  
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH  
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

## Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Technologieplanung und –entwicklung der Volkswagen AG Wolfsburg. Aus diesem Grund möchte ich mich zunächst bei meinen Abteilungsleitern, Herrn Prof. Ferkel und Herrn Dr. Goede, und meinen Unterabteilungsleitern, Herrn Dr. Jäckel und Herrn Borowetz, bedanken, die mir diesen Weg zur Promotion ermöglicht haben.

Insbesondere gilt aber mein Dank Herrn Thorge Hammer, der mich über den gesamten Zeitraum hinweg tatkräftig unterstützt, zu kritischen Hinterfragungen angeregt und durch zahlreiche Diskussionen mir diese Arbeit ermöglicht hat.

Zu Dank verpflichtet bin ich auch gegenüber Frau Prof. Martinek und Herrn Prof. Jüttner, die die Betreuung seitens der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg übernommen haben und mich immer wieder auf den richtigen Weg gelenkt haben. Für die geleistete Unterstützung und Zusammenarbeit danke ich recht herzlich.

Auch Herrn Dr. Pieschel und meinen Gutachtern Herrn Prof. Otto und Herrn Prof. Wessling danke ich für die Unterstützung und Bereitschaft diese Promotion zu begleiten.

Ferner möchte ich jenen Kollegen der Volkswagen AG danken, die mich stetig unterstützt und motiviert haben, vor allem Herrn Kegel, Herrn Schmidt und Herrn Wiethop bin ich zu besonderem Dank verpflichtet. Für die zahlreichen Anregungen und Diskussionen, die tatkräftige Unterstützung und allzeit gute Zusammenarbeit möchte ich mich auch bei Herrn Hartwig, Herrn Ebert, Herrn Drechsel, Herrn Prof. Steiger und Frau Marquardt recht herzlich und größtmöglich bedanken.

Ein herzlicher Dank gilt auch meinen Eltern, die mir all dies ermöglicht haben und mich stets moralisch unterstützt haben sowie meinem Bruder Michael, meiner Freundin Antje und allen meinen Freunden und Verwandten, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Daniel Szczepanski

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XV
Liste der verwendeten Formelzeichen .....	XVII
Liste der verwendeten Abkürzungen .....	XIX
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	2
<b>2 Allgemeine Verfahrensgrundlagen.....</b>	<b>3</b>
2.1 Einordnung der Lasertrennverfahren .....	4
2.2 Übersicht über industrierelevante Laserschneidverfahren.....	4
2.2.1 Laserstrahlschmelzschnneiden .....	5
2.2.2 Laserstrahlsublimierschnneiden .....	5
2.2.3 Laserstrahlbrennschnneiden .....	6
2.3 Nutzung der Remote-Technik für Laserprozesse .....	6
2.3.1 Systembeschreibung und Differenzierung .....	7
2.3.2 Einsatz der Remote-Technik bei Lasertrennprozessen .....	8
2.3.3 Remote-Technik beim Schmelzdruckschnneiden .....	8
2.3.4 Ablauf des Laserstrahlabtragverfahrens.....	9
2.4 Parameterbetrachtung beim Abtragschnneiden .....	12
2.4.1 Laserleistung .....	12
2.4.2 Fokusdurchmesser.....	12
2.4.3 Intensität .....	13
2.4.4 Schneidgeschwindigkeit.....	15
2.4.5 Einstechvorgang .....	15

---

2.4.6	Fokuslage.....	15
2.4.7	Fokussiereigenschaften .....	16
2.4.8	Pulsbetrieb .....	16
<b>3</b>	<b>Lasergeführte Abtragsprozesse – Stand der Entwicklung .....</b>	<b>19</b>
3.1	Laserstrahlabtragschneiden.....	19
3.2	Laserstrahlstrukturieren .....	21
3.3	Laserstrahlbohren.....	22
<b>4</b>	<b>Konkretisierung der Aufgabenstellung.....</b>	<b>25</b>
4.1	Dynamik des Prozesses Laserabtragschneiden.....	25
4.2	Theorien zur Gratentstehung.....	25
4.2.1	Gratentstehung durch Schmelzspritzer .....	25
4.2.2	Gratentstehung durch Einflüsse des Laserfokus .....	26
4.2.3	Gratentstehung durch die Werkstückdicke .....	27
<b>5</b>	<b>Versuchsdurchführung.....</b>	<b>29</b>
5.1	Technische Ausstattung .....	29
5.1.1	Laser und-anlage .....	29
5.1.2	Scanneroptik.....	30
5.1.3	High-Power Strahlvermessungsgerät .....	31
5.1.4	Infrarotthermografie .....	36
5.2	Kriterien zur Beurteilung des entstehenden Grates .....	36
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>39</b>
6.1	Grundlagenuntersuchungen zur Schneidbarkeit .....	39
6.1.1	Schneidbarkeit von verzinkten Karosseriewerkstoffen.....	39
6.1.2	Untersuchung des Einflusses von Zinküberzügen .....	44
6.1.3	Untersuchung von Elektroblechen .....	44
6.2	Parameteruntersuchungen zum Grataufwurf .....	47
6.2.1	Einfluss der Überfahrgeschwindigkeit .....	47

---

6.2.2 Einfluss der Intensität bei gleichen Fokusburchmessern .....	49
6.2.3 Einfluss der Blechdicke.....	52
6.2.4 Einfluss der Fokuslage auf den Grataufwurf bei Elektroblechen .	54
6.2.5 Diskussion der Ergebnisse .....	56
6.3 Gratentstehung durch Fokusverschiebungen .....	57
6.3.1 Einfluss der Scannerspiegel .....	58
6.3.2 Einfluss der Schutzgläser .....	62
6.3.3 Einfluss des Kollimators auf Fokusverschiebungen .....	68
6.3.4 Einfluss der Objektive auf Fokusverschiebungen.....	72
6.3.5 Diskussion der Ergebnisse .....	79
6.3.6 Simulative Berechnung durch Fokusshift entstehender Verluste .....	81
6.4 Simulative Berechnungen zur Steigerung der Prozesseffektivität.....	87
6.5 Untersuchungen zur Gratvermeidung und -entfernung .....	91
6.6 Wirtschaftliche Betrachtung des Abtragschneidverfahrens.....	93
6.6.1 Taktzeitermittlung definierter Geometrien beim Abtragschneiden .....	93
6.6.2 Vergleichende Betrachtung mit Hilfe des Schmelzdruckschneidens RFC .....	94
<b>7 Zusammenfassung.....</b>	<b>99</b>
Literaturverzeichnis.....	103

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Fokussierung des Laserstrahls nach Objektiv .....	4
Abbildung 2.2: Schematische Darstellung Laserstrahlschmelzschnitten [11].....	5
Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau eines Scannersystems [18] .....	7
Abbildung 2.4: Prinzip des Schmelzdruckschneidens an der Schnittkante [29] .....	9
Abbildung 2.5: Sequenzielles Abtragen bei 3 kW und $f = 230$ mm an M270-35A .....	10
Abbildung 2.6: Sequenzielles Abtragen bei 5 kW und $f = 230$ mm an M270-35A .....	10
Abbildung 2.7: Schematische Darstellung des Abtragschneidens [35].....	10
Abbildung 2.8: Simulation des Temperaturfelds und der Werkstoffabtragung beim Laserabtragschneiden [36].....	11
Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau des Faserlasers [38] .....	13
Abbildung 2.10: Prinzip der Doppelkernfaser [38] .....	14
Abbildung 2.11: Beispiele für verschiedene Fokuslagen .....	16
Abbildung 2.12: Laser im Dauerstrichbetrieb [8].....	16
Abbildung 2.13: Laser im gepulsten Betrieb [8] .....	17
Abbildung 3.1: Strukturierungsprozess mit Parametern des Abtragschneidens.....	21
Abbildung 3.2: Verfahrensarten des Laserstrahlbohrens [84] .....	23
Abbildung 4.1: Vergleich Gauß-Profil (oben) und Tophat-Profil (unten) .....	26
Abbildung 5.1: Aufbau der verwendeten Laseranlage .....	29
Abbildung 5.2: Funktionsprinzip Scanneroptik.....	31
Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des Strahlvermessungsgerätes [95].....	31
Abbildung 5.4: Prinzipdarstellung des Strahlvermessungsgerätes [95] .....	32
Abbildung 5.5: Standardaufbau mit Strahlvermessungsgerät .....	33
Abbildung 5.6: Variationen der Messaufbauten .....	34
Abbildung 5.7: Thermografische Analyse des verwendeten Versuchsaufbaus mit Prisma .....	35
Abbildung 5.8: Grataufwurf am M270-35A in 0,35 mm Dicke .....	37
Abbildung 5.9: Verringerung der Ummagnetisierungsverluste durch Lamellierung...	37
Abbildung 6.1: Abtragsverhalten von Karosserieblechen mit $f = 230$ mm.....	39
Abbildung 6.2: Schliffproben unterschiedlich verzinkter Stähle .....	41
Abbildung 6.3: Vergleich der mittleren Abtragtiefen aus der Profilmessung .....	42

Abbildung 6.4: EDX-Analyse an Probe H220 Z100 MB.....	42
Abbildung 6.5: Zink-Eisen-Legierungsschicht eines DX52 Z140 .....	43
Abbildung 6.6: Abtragsverhalten der Elektrobleche bei $f = 230$ mm .....	44
Abbildung 6.7: Abtragsverhalten der Elektrobleche bei $f = 500$ mm .....	45
Abbildung 6.8: Lackabbrand von Elektroblechen am Beispiel des NO30 bei 8 m/s ...	46
Abbildung 6.9: Verdampfungs- und Schmelzrate im Vergleich .....	47
Abbildung 6.10: Vergleich unterschiedlicher Geschwindigkeiten auf die Gratausbildung.....	48
Abbildung 6.11: Vergleich unterschiedlicher Geschwindigkeiten auf die Gratausbildung am M270-35A .....	48
Abbildung 6.12: Grathöhen bei steigenden Verfahrensgeschwindigkeiten.....	49
Abbildung 6.13: Vergleich des Grataufwurfs bei unterschiedlicher Laserleistung.....	50
Abbildung 6.14: Einfluss der Intensität auf den Grataufwurf .....	50
Abbildung 6.15: Grataufwurf bei veränderten Intensitätsbedingungen .....	51
Abbildung 6.16: Ausbildung der Schnittfuge bei unterschiedlicher Laserleistung.....	51
Abbildung 6.17: Einfluss der Blechdicke auf die Ausbildung der Schnittkante .....	53
Abbildung 6.18: Grataufwurf in Abhängigkeit der Blechdicke .....	53
Abbildung 6.19: Abtragschneiden mit einer Überfahrt .....	54
Abbildung 6.20: Ergebnisse zur Schwankungsbreite bei Defokussierung.....	55
Abbildung 6.21: Verändertes Intensitätsprofil nach Kaustikveränderung .....	55
Abbildung 6.22: Wechselwirkungen beim Abtragschneiden .....	56
Abbildung 6.23: Schematische Darstellung der Fokusverschiebung .....	57
Abbildung 6.24: Geometrie und Abmessungen der verwendeten Scannerspiegel.....	58
Abbildung 6.25: Temperaturanstieg der Scannerspiegel in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer.....	58
Abbildung 6.26: Optimales Strahlprofil im Fokus, links 3D, rechts 2D .....	59
Abbildung 6.27: Strahlprofil unterhalb des optimalen $d_{fok}$ , links 3D, rechts 2D.....	59
Abbildung 6.28: Einflüsse des Scanners mit $f$ -theta-230-Optik auf die Strahleigenschaften.....	60
Abbildung 6.29: Einflüsse des Scanners mit Festoptik auf die Strahleigenschaften....	61
Abbildung 6.30: Temperaturentwicklung der Schutzgläser bei $P = 300$ W .....	62
Abbildung 6.31: Weglängenänderung der Schutzgläser in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer .....	64
Abbildung 6.32: Simulation der Schutzglasverformung und -erwärmung.....	65

Abbildung 6.33: Simulation der radialen Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Lasereinwirkzeit bei $P = 3 \text{ kW}$ und $t = 120 \text{ s}$ an Schutzglas 3 .....	66
Abbildung 6.34: Einfluss unterschiedl. Schutzgläser auf die Strahleigenschaften .....	67
Abbildung 6.35: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus .....	68
Abbildung 6.36: Durchmesser des kollimierten Strahles bei Einschaltdauer 30 s .....	68
Abbildung 6.37: Durchmesser des kollimierten Strahles bei Einschaltdauer 60 s .....	69
Abbildung 6.38: Strahlfokusverschiebungen in Abhängigkeit der Laserleistung bei $f = 500 \text{ mm}$ .....	69
Abbildung 6.39: Vergleich der Fokusverschiebung in Abhängigkeit des Verschmutzungsgrades des Kollimators .....	70
Abbildung 6.40: Vergleich der Strahlgüten in Abhängigkeit des Verschmutzungsgrades des Kollimators .....	71
Abbildung 6.41: Vergleich der Strahltaillen in Abhängigkeit des Verschmutzungsgrades des Kollimators .....	71
Abbildung 6.42: Einflüsse der Standardoptik ( $f = 500 \text{ mm}$ ) auf die Strahleigenschaften .....	72
Abbildung 6.43: Kaustikmessungen mit $P = 1 \text{ kW}$ und Standardoptik ( $f = 500 \text{ mm}$ ) .	73
Abbildung 6.44: Schematischer Schnitt durch die verwendete Sonderoptik .....	74
Abbildung 6.45: Fokus- und Strahltaillenveränderungen mit der Sonderoptik.....	74
Abbildung 6.46: Fokusverschiebung, Strahlqualitäts- und Strahltaillenveränderungen mit der $f$ -theta-Optik mit $f = 230 \text{ mm}$ ....	75
Abbildung 6.47: Auswirkungen der Defokussierung auf die Kaustik und den Fokusdurchmesser bei $P = 2,5 \text{ kW}$ und Optik ( $f = 230 \text{ mm}$ ) .....	76
Abbildung 6.48: Fokusverschiebung, Strahlqualitäts- und Strahltaillenveränderungen mit der Festoptik mit $f = 250 \text{ mm}$ .....	77
Abbildung 6.49: Fokusverschiebung, Strahlqualitäts- und Strahltaillenveränderungen mit der Festoptik mit $f = 500 \text{ mm}$ .....	78
Abbildung 6.50: Strahlprofil bei 300 W im Fokus +/- 1 mm .....	79
Abbildung 6.51: Physikalisches Modell der numerischen Simulation nach [105].....	82
Abbildung 6.52: Masseneffekte bei Defokussierung und $P = 2,5 \text{ kW}$ .....	82
Abbildung 6.53: Leistungseffekte bei Defokussierung und $P = 2,5 \text{ kW}$ .....	83
Abbildung 6.54: Simulationsdarstellung des Materialabtrags ohne Defokussierung mit $P = 5 \text{ kW}$ .....	84
Abbildung 6.55: Simulationsdarstellung des Materialabtrags bei Defokussierung mit $P = 5 \text{ kW}$ .....	85
Abbildung 6.56: Masseneffekte bei Defokussierung und $P = 5 \text{ kW}$ .....	86

---

Abbildung 6.57: Auswirkungen des Fokusedurchmessers auf die Abtragsmenge bei P = 5 kW .....	86
Abbildung 6.58: Auswirkungen der Laserstrahlleistung auf die Masseneffekte.....	87
Abbildung 6.59: Vergleich der Leistungseffekte beim Abtragschneiden mit $P_{\text{var}}$ .....	88
Abbildung 6.60: Vergleich der Massenverluste unterschiedlicher Mode-Formen.....	88
Abbildung 6.61: Simulativer Vergleich des Werkstoffabtrags für unterschiedliche Leistungen .....	89
Abbildung 6.62: Ausprägung der Schneidfront für unterschiedliche Mode-Formen...	90
Abbildung 6.63: Gratentfernung mittels Laserstrahlung .....	92
Abbildung 6.64: Wiedezulaufende Schnittfugen beim RFC [109] .....	95
Abbildung 6.65: Ermitteltes Parameterfeld zum RFC mit Faserlaser .....	95
Abbildung 6.66: Ermittelte Parameterfelder zum RFC mit Scheibenlaser.....	96