



Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Füge- und  
Schweißtechnik



# Wilfried Reimann

## Entwicklung eines Laserstrahl- Lötverfahrens für schmelztauch- veredelte Karosseriebauteile

Forschungsberichte des Instituts für  
Füge- und Schweißtechnik

Band 47

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger

# **Entwicklung eines Laserstrahl-Lötverfahrens für schmelztauchveredelte Karosseriebauteile**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Wilfried Heinrich Reimann  
aus: Bielefeld

eingereicht am: 29.09.2017  
mündliche Prüfung am: 08.03.2018

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Klaus Dilger  
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt



Forschungsberichte des Instituts für Füge- und Schweißtechnik

Band 47

**Wilfried Heinrich Reimann**

**Entwicklung eines Laserstrahl-Lötverfahrens  
für schmelztauchveredelte Karosseriebauteile**

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6093-5

ISSN 1614-4783

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Kurzfassung

Das Laserstrahllöten wird im Karosseriebau als Füge­technologie für die Herstellung von Sichtverbindungen im Außenhautbereich eingesetzt. Die exponierte Position der Lötverbindungen bedingt hohe Anforderungen an die Anmutungsqualität. Aufgrund der höheren Korrosionsbeständigkeit und der geringeren Materialkosten für schmelztauchveredelte Stahlbleche wird eine Substitution der bisher üblichen elektrolytisch verzinkten Stahlbleche angestrebt. Allerdings beeinflussen die Eigenschaften der Zinkbeschichtung den Laserstrahl­lötprozess und begrenzen die erreichbare Anmutungsqualität.

Im Spannungsfeld dieser Anforderungen stellt die Steigerung der Prozessstabilität ein zentrales Ziel der Forschungen und Entwicklungen in diesem Gebiet dar, allerdings ist der Einfluss verschiedenartiger Zinkbeschichtungen auf die Entstehung von Unregelmäßigkeiten weitgehend unbekannt. Für die Identifizierung der Wirkmechanismen, die zur Entstehung von Prozessinstabilitäten führen, wird ein erweitertes Prozessbeobachtungssystem konzipiert und aufgebaut. Die Ergebnisse und die Erarbeitung von Kausalmodellen für die beobachteten Vorgänge zeigen, dass der Entstehung von Unregelmäßigkeiten verschiedene Mechanismen zugrunde liegen, die zum einen der Einstellung der Anlagen- und Systemtechnik, zum anderen den prozessinhärenten und werkstoffspezifischen Vorgängen zugeordnet werden können. Für das Laserstrahl­löten von schmelztauchveredeltem Stahlblech mit Zinkbeschichtung wird die Entstehung von Spritzern als Folge einer Zinkanreicherung und -verdampfung im Randbereich des Schmelzbades als ein wesentlicher Wirkmechanismus identifiziert, der die erreichbare Qualität für diese Werkstoffgruppe begrenzt.

Aufbauend auf den erarbeiteten Zusammenhängen erfolgt eine zielgerichtete Anpassung der Anlagentechnik zur Steigerung der Prozessstabilität. Anhand von Laborversuchen an vorbehandelten Blechen wird eine Dreistrahl­anordnung entworfen, die im Randbereich der Löt­fuge eine räumliche Trennung der Zinkverdampfung vom Schmelzbad des Lötprozesses ermöglicht. In Zusammenarbeit mit Anlagenherstellern werden angepasste Systeme aufgebaut und in Betrieb genommen. Die unter Laborbedingungen erzielten Ergebnisse bestätigen die zuvor erarbeiteten Kausalzusammenhänge und die der Entwicklung zugrunde liegenden Schlussfolgerungen. Die Erprobung des Lötens mit Dreistrahl­technik an Realbauteilen

belegt, dass durch die anwendungsspezifisch gestaltete Intensitätsverteilung eine Steigerung der Prozessstabilität erreicht wird. Die Überführung der Prozesse in die Großserienproduktion bestätigt die Stabilität der für das Laserstrahllöten von schmelztauchveredelten Blechen mit Zinkbeschichtung entwickelten Technologie und leistet damit einen Beitrag zur Steigerung der Qualität und der Wirtschaftlichkeit im Karosseriebau.

## Abstract

Laser brazing of electro-galvanized steel is an established technology for the joining of visible parts of the body-in-white. The exposed position of the joints requires a high optical quality of the seam surfaces. Due to additional economical and technical requirements, the utilization of hot-dip galvanized steel instead of electro-galvanized steel is intended. Between the priorities of these requirements, the improvement of the process stability is a central aspiration of research and development activities. However, the causes and mechanisms of the formation of irregularities and the influence of different types of zinc coatings are barely known. In order to identify the causes of process instabilities during laser brazing, a multi channel process observation system is conceptualized and utilized. The results indicate that irregularities are caused by different formation mechanisms. On the one hand instabilities originate from the adjustment of the brazing setup. On the other hand irregularities are caused by process induced instabilities, which are specific to the type of zinc coating. The formation of spatter is a typical phenomenon for the laser brazing of hot-dip galvanized steel and restricts the processing range. The results of the process examination show that the spatter formation is mainly caused by a zinc dissolution and the subsequent evaporation of the zinc rich alloy at the seam edges. Based on the results, a three-beam brazing method is developed in order to increase process stability and seam quality. The adjusted laser intensity distribution effects a spatial separation of the zinc evaporation and the subsequent wetting of the molten filler metal. During brazing trials under laboratory conditions, the formation of spatter is no longer observed, thus the conclusions drawn from the causal description of formation mechanisms are approved. The transfer of the technology to the serial production confirms the improved process stability and contributes to a higher economic efficiency and quality in car body manufacturing.



# Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Volkswagen AG in Bereich der Technologieplanung und -entwicklung in Wolfsburg in Zusammenarbeit mit dem Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig. Bei der Anfertigung dieser Arbeit wurde mir die Unterstützung zahlreicher Personen zuteil, bei denen ich mich herzlich bedanken möchte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, der durch die hervorragende Betreuung und durch wertvolle Anregungen zum Erfolg des Vorhabens beitrug. Weiterhin gebührt mein Dank Herrn Fabian Teichmann, Herrn David Blass, und Frau Dr. Helge Pries für die organisatorische und fachliche Unterstützung. Für die Übernahme des Koreferates danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kollegen in der Fachgruppe Lasertechnik gilt mein Dank für die Vermittlung der für eine Technologieentwicklung unabdingbaren Praxiserfahrung und für die offene fachliche Diskussion von Ergebnissen und Lösungsansätzen. Weiterhin danke ich den Fachgruppen- und Abteilungsleitern, die mir die Möglichkeit zur Tätigkeit als Doktorand eröffneten und mich durch das mir entgegengebrachte Vertrauen zur Durchführung der vielfältigen Arbeiten befähigten. Mein besonderer Dank gilt dem Betreuer meiner Arbeit. Sowohl die Diskussion fachlicher Detailfragen als auch der überfachliche Austausch während der zahlreichen gemeinsamen Dienstreisen hat wesentlich zum Gelingen beigetragen. Des Weiteren danke ich den Kollegen der Technologieentwicklung bei der Audi AG für den offenen Erfahrungsaustausch und für die Erweiterung der Prozesssimulation im Hinblick auf das Laserstrahllöten mit Dreistrahltechnik.

Für die Bereitschaft zur erstmaligen technischen Umsetzung des Trifokal-Lötens und für die umfangreiche Unterstützung bei der Untersuchung des Prozesses danke ich Herrn Mamerow und Herrn Dr. Szcherbakov bei der IPG Laser GmbH. Weiterhin gilt mein Dank Andreas Gusenko, Simon Pfriem, Mark Lützeler und Herrn Maximilian Berens für die Untersuchung des Lötens mit Dreistrahltechnik im Rahmen studentischer Abschlussarbeiten. Gleichermaßen bedanke ich mich bei Herrn Dr. Luft bei der Laserline GmbH für die Bereitschaft zur anwendungsspezifischen Weiterentwicklung des Laserstrahllöten mit Strahlformungstechnik.



# Erklärung

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen Aktiengesellschaft zugelassen. Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.



# Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>   | <b>III</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>   | <b>VII</b> |
| <b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>                                 | <b>IX</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>   |
| <b>2 Stand von Wissenschaft und Technik</b>                              | <b>3</b>   |
| 2.1 Löten – Grundlagen und Begrifflichkeiten . . . . .                   | 4          |
| 2.2 Laserstrahllöten im Karosseriebau . . . . .                          | 13         |
| 2.3 Qualitätsbewertung von Laserstrahl­lötverbindungen . . . . .         | 15         |
| 2.4 Einflussgrößen für das Laserstrahl­löten im Karosseriebau . . . . .  | 18         |
| 2.4.1 Bisherige Prozessanalysen für das Laserstrahl­löten . . . . .      | 20         |
| 2.4.2 Betriebsmittelentwicklungen . . . . .                              | 25         |
| 2.5 Forschungsbedarf und Zielsetzung . . . . .                           | 30         |
| 2.6 Vorgehensweise und Methodik . . . . .                                | 31         |
| <b>3 Untersuchung des Laserstrahl­lötens für den Karosseriebau</b>       | <b>35</b>  |
| 3.1 Charakterisierung der Versuchswerkstoffe . . . . .                   | 35         |
| 3.1.1 Elektrolytisch verzinktes Stahl­feinblech . . . . .                | 36         |
| 3.1.2 Schmelztaucheredeltes Stahl­feinblech . . . . .                    | 38         |
| 3.1.3 Lotwerkstoffe für das Laserstrahl­löten im Karosseriebau . . . . . | 42         |
| 3.2 Bewertung der Löt­naht­Qualität . . . . .                            | 45         |
| 3.3 Versuchsdurchführung und Anlagentechnik . . . . .                    | 48         |
| <b>4 Ergebnisse der Prozessbeobachtung</b>                               | <b>55</b>  |
| 4.1 Analyse des Laserstrahl­Lötprozesses . . . . .                       | 55         |
| 4.2 Konstruktions- und fertigungsbedingte Einflüsse . . . . .            | 57         |
| 4.2.1 Bauteilgeometrie und Draht­durchmesser . . . . .                   | 57         |
| 4.2.2 Einstellung der Optik und der Roboterbahn . . . . .                | 62         |
| 4.2.3 Schwankungen der Draht­vorschubgeschwindigkeit . . . . .           | 68         |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.3      | Einfluss verschiedenartiger Zinkbeschichtungen . . . . .          | 72         |
| 4.3.1    | Laserstrahllöten elektrolytisch verzinkter Bleche . . . . .       | 75         |
| 4.3.2    | Laserstrahllöten feuerverzinkter Bleche . . . . .                 | 77         |
| 4.3.3    | Laserstrahllöten Zink-Magnesium-beschichteter Bleche . . . . .    | 81         |
| 4.3.4    | Laserstrahllöten Zink-Eisen-beschichteter Bleche . . . . .        | 83         |
| <b>5</b> | <b>Konzeption eines erweiterten Kausalmodells</b>                 | <b>85</b>  |
| 5.1      | Entstehung von Unregelmäßigkeiten beim Laserstrahllöten . . . . . | 85         |
| 5.1.1    | Spritzer . . . . .  | 85         |
| 5.1.2    | Nahtschuppung . . . . .   | 89         |
| 5.1.3    | Nahtüberlauf . . . . .  | 91         |
| 5.1.4    | Schmelzbadauswürfe, Löcher und Poren . . . . .                    | 93         |
| 5.1.5    | Grundwerkstoff-Aufschmelzungen . . . . .                          | 95         |
| 5.1.6    | Zusammenfassung . . . . .   | 96         |
| 5.2      | Diskussion der Ergebnisse . . . . .                               | 98         |
| 5.3      | Laserinduzierte Verdampfung verschiedenartiger Zinkbeschichtungen | 101        |
| 5.4      | Lötversuche mit vorbehandelten Versuchsteilen . . . . .           | 106        |
| 5.4.1    | Laserstrahllöten phosphatierter feuerverzinkter Bleche . . . . .  | 106        |
| 5.4.2    | Laserstrahllöten von entzinktem Blech . . . . .                   | 107        |
| 5.4.3    | Laserstrahllöten nach Laserablation der Zinkschicht . . . . .     | 109        |
| 5.5      | Möglichkeiten zur Steigerung der Prozessstabilität . . . . .      | 111        |
| <b>6</b> | <b>Laserstrahllöten mit angepasster Systemtechnik</b>             | <b>115</b> |
| 6.1      | Laserstrahllöten mit Trifokal-Technik . . . . .                   | 116        |
| 6.2      | Laserstrahllöten mit Strahlformungstechnik . . . . .              | 123        |
| 6.3      | Entstehung von Unregelmäßigkeiten . . . . .                       | 126        |
| 6.4      | Festigkeit, Lackhaftung und Korrosion . . . . .                   | 128        |
| 6.5      | Verifikation im Serienprozess . . . . .                           | 130        |
| 6.6      | Einordnung der Ergebnisse . . . . .                               | 131        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                               | <b>135</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                       | <b>139</b> |
| <b>A</b> | <b>Messergebnisse der erweiterten Prozessanalyse</b>              | <b>153</b> |
| <b>B</b> | <b>Ergebnisse der Prozessthermografie</b>                         | <b>157</b> |