

# Beitrag zur vereinfachten Eigenspannungsberechnung von Mehrlagenschweißverbindungen

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Jakob Klassen  
geboren in: Saran

eingereicht am: 04.10.2017  
mündliche Prüfung am: 15.02.2018

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Markus Böhl  
Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Klaus Dilger,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann

2018

Forschungsberichte des Instituts für Füge- und Schweißtechnik

Band 46

**Jakob Klassen**

**Beitrag zur vereinfachten Eigenspannungs-  
berechnung von Mehrlagenschweißverbindungen**

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 978-3-8440-5895-6

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)

## **Vorwort und Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Danken möchte ich insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger für die Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit sowie für die Übernahme des Referates. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jean Pierre Bergmann bedanke ich mich ausdrücklich für die Übernahme des Koreferates. Weiter bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Böhl für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Thomas Nitschke-Pagel für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit und die stete Bereitschaft zu konstruktiven Gesprächen. Für die angenehme Zusammenarbeit sowie die Hilfestellung und Unterstützung bei technischen und inhaltlichen Fragestellungen danke ich auch meinen Arbeitskollegen Ann-Christin Hesse, Jonas Hensel, Nico Hempel, Paul Diekhoff sowie besonders Hamdollah Eslami und Michael Gillner.

Teile der Arbeit sind in studentischen Arbeiten sowie durch die Zuarbeit von wissenschaftlichen Hilfskräften entstanden. Besondere Erwähnung verdient hier Frau Sonja Lepper für die praktische Umsetzung meiner Ideen.

Meine Frau und meine Kinder waren stets die Quelle neuer Energie. Dafür und für die uneingeschränkte Unterstützung meiner Familie beim Erreichen meiner Ziele gilt mein besonderer Dank. Dieser Rückhalt ermöglichte mir erst die Vollendung der vorliegenden Arbeit.

Jakob Klassen

## Kurzfassung

Im Betrieb überlagern sich Eigenspannungen mit Lastspannungen und beeinflussen die Lebensdauer geschweißter Konstruktionen. Folglich ist die Kenntnis über den genauen Eigenspannungszustand bereits für die Auslegung von großem Interesse. Zerstörende Messverfahren der Eigenspannungsbestimmung sind insbesondere bei geringen Losgrößen nicht zielführend. Zerstörungsfreie Verfahren sind vorhanden und verbreitet, haben jedoch verfahrensspezifische Nachteile wie die begrenzte Auflösung. Eigenspannungsgradienten in Blechdickenrichtung lassen sich damit nicht bestimmen.

Eine Alternative ist die Virtualisierung der Konstruktion unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM). Die Anwendung der FEM ermöglicht prinzipiell Aussagen über Eigenspannungszustände an jeder Stelle des berechneten Modells, insbesondere an messtechnisch nicht zugänglichen Orten. Jedoch unterliegt die Eigenspannungsberechnung mit Hilfe der FEM gewissen Grenzen und Fehlerquellen, die der feinen Diskretisierung und der hochgradigen Nichtlinearität geschuldet sind. Bei der Berechnung von Mehrlagenschweißverbindungen steht man selbst bei hohen verfügbaren Rechenkapazitäten unabwendbar vor so hohen Rechenzeiten, dass ein praktischer Nutzen kaum noch erkennbar ist. Auf Anwenderseite wird diesem Problem oftmals mit radikalen Vereinfachungen der zu berechnenden Schweißaufgabe begegnet.

Vereinfachungsansätze wie die Vermeidung hoher Diskretisierungsgrade, die Reduktion der Schweißlagen sowie semitransiente Berechnungen führen zwar zu handhabbaren Rechenzeiten, können aber auch zu Ergebnisgenauigkeiten führen, deren Qualität hinterfragt werden muss. Im Fokus der Arbeit steht deshalb insbesondere die Frage welche Vereinfachungsstrategien bei der Schweißstruktursimulation anwendbar sind, wenn eine akzeptable Genauigkeit anwendungsnah erreicht werden soll. Hierzu wurden messtechnisch verifizierte Referenzmodelle erstellt. Anhand dieser Modelle wurden anschließend Ansätze steigenden Vereinfachungsgrades untersucht und deren Auswirkungen auf die Ergebnisqualität quantifiziert. Die numerisch un-

tersuchten Vereinfachungen umfassen eine geo-metrische Skalierung der Ausgangsmodelle sowie die Anwendung aufgebrachteter Temperaturzyklen und das Zusammenfassen einzelner Schweißraupen zu größeren Lagen.

Es konnte gezeigt werden, dass die häufig verwendeten Vereinfachungsansätze für die Berechnung von Eigenspannungen und Verzügen nur bedingt und teilweise gar nicht zulässig sind. Jedes Verfahren hat seine Grenzen und birgt Gefahren für den Anwender, wenn experimentell bestimmte Daten zur Validierung und Verifizierung nicht oder nur begrenzt zur Verfügung stehen. Das bedeutet, dass ein stark lokalisierter Abgleich von Experiment und Berechnung noch kein Beleg für die Richtigkeit der Rechenansätze sein muss, wenn auf eine verfeinerte experimentelle Bestimmung verzichtet wird.



---

## Inhalt

Inhalt.....	I
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis .....	IV
1 Einleitung .....	1
2 Kenntnisstand .....	5
2.1 Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen .....	5
2.1.1 Definition von Eigenspannungen.....	5
2.1.2 Entstehung von Schweiß eigenspannungen.....	6
2.1.3 Eigenspannungen in Mehrlagenschweißverbindungen .....	15
2.1.4 Definition und Entstehung von Schweißverzug .....	21
2.1.5 Schweißverzug in Mehrlagenschweißverbindungen.....	24
2.1.6 Wechselwirkung zwischen Eigenspannungen und Verzug .....	25
2.2 Bedeutung der Eigenspannungen .....	27
2.3 Messtechnische Eigenspannungsbestimmung .....	32
2.4 Schweißsimulation.....	34
2.4.1 Physikalische Schweißsimulation .....	35
2.4.2 Numerische Schweißsimulation .....	35
2.4.3 Berechnung von Mehrlagenschweißverbindungen .....	40
2.4.4 Validierung und Verifizierung der numerischen Schweißsimulation .....	48
3 Abgeleitete Fragestellung.....	49
3.1 Lösungsansatz .....	50
4 Versuchsdurchführung .....	53
4.1 Verwendete Werkstoffe .....	53
4.2 Schweißverfahren und –anlagen .....	55
4.3 Lagenaufbau und Ausführung .....	56



## Inhalt

---

4.3.1	DV-Probe .....	57
4.3.2	V-Probe.....	58
4.3.3	V-L-Probe.....	59
4.4	Temperaturmessungen.....	60
4.5	Optische Verformungsmessung.....	62
4.6	Eigenspannungsbestimmung .....	63
4.7	Finite Elemente Programm .....	65
5	Finite Elemente Analysen.....	67
5.1	Simulationsobjekte .....	67
5.1.1	Vereinfachte Ersatzmodelle.....	73
5.1.2	DV-Modell .....	74
5.1.3	DV-L-Modelle .....	75
5.1.4	V-Modelle .....	77
5.2	Physikalische und mathematische Modelle .....	82
6	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen .....	85
6.1	Temperaturmessung .....	85
6.2	Verzugsmessung.....	87
6.3	Eigenspannungsmessung .....	88
6.3.1	DV-Probe .....	89
6.3.2	V-Probe.....	92
6.3.3	V-L-Probe.....	97
7	Ergebnisse der FE-Analysen.....	101
7.1	H-Modell.....	101
7.2	U-Modelle .....	104
7.3	DV-Modell.....	109
7.4	V-k-Modelle .....	112
7.4.1	Modell Vk .....	112

---

7.4.2	Modell Vk-L1 .....	115
7.4.3	Modell Vk-L2 .....	116
7.4.4	Modell Vk-L3 .....	120
7.4.5	Modell Vk-TC .....	123
7.4.6	Modell Vk-TC-L .....	127
7.5	V-Modelle .....	130
7.5.1	V-Modell.....	130
7.5.2	V-TC-Modell.....	132
7.6	Validierung und Verifizierung der numerischen Berechnungen.....	135
8	Diskussion der Ergebnisse .....	157
8.1	Auswirkungen geometrisch abstrahierter Nahtformen .....	158
8.2	Auswirkungen eines geometrisch reduzierten Modells .....	166
8.3	Verwendung von Temperaturzyklen anstelle von wandernden Wärmequellen .....	171
8.4	Zusammenfassen einzelner Raupen .....	177
8.4.1	Experimentelles „Lumping“ .....	193
8.5	Kombination von Vereinfachungsansätzen .....	197
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	201
	Literaturverzeichnis.....	207
	Anhang .....	219