

Berichte des Lehrstuhls Füge- und Schweißtechnik  
der BTU Cottbus

Band 3

**Vesselin Michailov, Nikolay Doynov, Ralf Ossenbrink**

**Sensibilitätsanalyse der thermomechanischen  
FE-Schweißsimulation**

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.

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 978-3-8440-1016-9

ISSN 1867-4887

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

Eine signifikante Verkürzung der Entwicklungszeiten ist eine der Voraussetzungen für die erfolgreiche Markteinführung von neuen Produkten. Der Einsatz der numerischen FE-Simulation ist in dieser Hinsicht heutzutage unabdingbar. Insbesondere hat die Simulation des Schweißprozesses noch einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Aussagekraft zu leisten. Das liegt in erster Linie in der Komplexität der zugrunde liegenden physikalischen und mathematischen Modelle und an den zum größten Teil fehlenden Werkstoffkennwerten, aber auch an fehlender Systematik im Umgang mit den auf dem Markt vorhandenen Softwaresystemen.

Die vorliegende Arbeit versucht, durch systematische Sensibilitätsanalyse der schweißtechnischen thermomechanischen FE-Simulation, die Aussagekraft der Simulation zu verbessern. In diesen Untersuchungen, durchgeführt mit den in Deutschland vorwiegend eingesetzten Softwarepaketen SYSWELD<sup>®</sup> und ANSYS<sup>®</sup>, werden für die thermomechanische Simulation relevante Fehlerquellen, -ketten und deren Fortpflanzung analysiert und ihr Einfluss auf das Simulationsergebnis verifiziert.

Die relevanten Untersuchungsgrößen und deren Toleranzen werden zunächst durch eine umfassende Literaturrecherche sowie aus eigenen Daten identifiziert und systematisiert. Unter anderem werden die fehlenden und unzureichenden Werkstoffkennwerte sowie die durch Gefüge- und Werkstoffmodelle bedingten Parameterfehler erfasst. Es wird sowohl in dem gesamten Temperaturbereich als auch in ausgewählten diskreten Temperaturintervallen das Streuband der Werkstoffkennwerte betrachtet. Es werden auch charakteristische und für die Industrie bedeutende Untersuchungsbereiche mit den entsprechenden Toleranzen für die gemessenen Eigenspannungen und Verzüge festgelegt und erfasst. Anschließend wird der Fehlerquelleneinfluss auf die Simulationsergebnisse analysiert. Diese Simulationsuntersuchungen erfassen Diskretisierungsfehler (Raum und Zeit), Modellierungsfehler (Wärmequellentyp, Gefüge- und Verfestigungsmodelle) sowie Fehler bedingt durch mangelhafte Daten und Parameter. Die Analyse erlaubt eine Aussage über mögliche Streuungen der berechneten Temperaturen, Eigenspannungen und Verzüge, bezogen auf die verwendeten Modelle und deren Parameter bzw. Datensätze in den praxisrelevanten Toleranzen. Die gewonnenen Kenntnisse ermöglichen eine deutliche Reduzierung des Aufwandes und Steigerung der Aussagekraft der thermomechanischen FE-Schweißsimulation.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Methodischer Ansatz</b> .....	<b>11</b>
<b>3. Zusammenstellung der Ausgangsdaten</b> .....	<b>15</b>
3.1. Werkstoffdaten .....	15
3.1.1. Wärmeleitzahl .....	15
3.1.2. Enthalpie .....	18
3.1.3. Elastizitätsmodul .....	20
3.1.4. Querkontraktionszahl .....	22
3.1.5. Wärmedehnung und Wärmeausdehnungskoeffizient .....	22
3.1.6. Streckgrenze .....	25
3.1.7. Umwandlungstemperaturbereiche .....	29
3.2. Messdaten und Untersuchungsbereiche.....	36
3.2.1. Zusammenstellung von Messdaten .....	36
3.2.2. Festlegung der Untersuchungsbereiche .....	37
3.3. Verifizierung .....	39
<b>4. Untersuchung des Einflusses numerischer Parameter</b> .....	<b>43</b>
4.1. Durchführung der Simulationen .....	43
4.1.1. Erstellung der Modelle .....	43
4.1.2. Variationsgrenzen der untersuchten Größen .....	48
4.2. Statistische Auswertung der Ergebnisse.....	49
4.2.1. Vergleichskriterien.....	49
4.2.2. Ergebnisse und Auswertung .....	49
4.3. Fehleranalyse - Erstellung von Kennlinien.....	54
4.4. Verifizierung der Kennlinien .....	61
<b>5. Untersuchung des Einflusses der Wärmequellenmodelle und -parameter</b> .....	<b>63</b>
5.1. Transiente Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen Wärmequellen .....	63
5.2. Statistische Auswertung der Ergebnisse.....	64
5.2.1. Analyse des Einflusses vom Wärmequellenmodell.....	68
5.2.2. Analyse des Einflusses der Wärmequellenparameter.....	78

5.3. Fehleranalyse .....	96
<b>6. Untersuchung des Einflusses der Werkstoffmodelle und -daten .....</b>	<b>99</b>
6.1. Durchführung transienter Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen Werkstoffmodellen und -daten .....	99
6.2. Simulationsergebnisse und Statistische Auswertung.....	101
6.2.1. Simulationen mit unterschiedlichen Werkstoffmodellen .....	102
6.2.2. Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen Werkstoffdatensätzen .....	106
6.2.3. Untersuchung des Einflusses der Umwandlungstemperaturen.....	115
6.2.4. Simulationsberechnungen mit Variation der Verfestigungsart .....	125
6.3. Fehleranalyse .....	128
<b>7. Fazit.....</b>	<b>130</b>
<b>Literaturquellen .....</b>	<b>133</b>

## Liste der Zeichen und Abkürzungen

$A$	- Querschnittsfläche
$a$	- Temperaturleitzahl
$A_{C1}, A_{C3}, A_{r1}, A_{r3}$	- Umwandlungstemperaturen
$\alpha$	- Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha, \gamma$	- Phasenbezeichnung
$\alpha_{th}$ (ALPX)	- Wärmeausdehnungskoeffizienten
$B_s$	- Bainitstarttemperatur
$B_s$	- Schweißnahtbreite
$b$	- Parameter des Koistinen-Marburger-Modells
$c$	- Wärmekapazität
$e$	- Bezeichnung der normalverteilten elliptischen Wärmequelle
$E$ (EX)	- Elastizitätsmodul
EA	- Elementanzahl (Vernetzungsdichte)
EKL	- Elementkantenlänge
$\varepsilon_{pl,x}$ (EpX)	- plastische Dehnung in Längsrichtung
$\varepsilon_{pl,y}$ (EpY)	- plastische Dehnung in Querrichtung
$F$	- Kraft
$f_{r,max}$	- Maximalwert der relativen Fehler
$F_s$	- Ferritstarttemperatur
GU	- Gefügeumwandlung
H	- Elementtyp mit quadratischer Formfunktion "Hyperelement"
$h$ (ENTH)	- volumenspezifische Enthalpie
int	- Integralwert
$I_y$	- Flächenträgheitsmoment
$k$	- Bezeichnung der normalverteilten kugelförmigen Wärmequelle
(k)	- Bezeichnung des kinematischen Werkstoffmodells
$K_0$	- Besselfunktion zweiter Art nullter Ordnung
KA	- Knotenanzahl (Vernetzungsdichte)
L	- Länge, Stablänge
lin.	- konzentrierte Wärmequelle (Linienquelle)
Lq	- Schmelze
LS	- Laserstrahlschweißen
$\lambda$ (KX)	- Wärmeleitfähigkeit
M1, M2, M3	- Bezeichnung des Werkstoffmodells
Mat.1 ... Mat.8 (m1 ... m8)	- Bezeichnung des Werkstoffdatensatzes
$M_s$ (Ms), $M_f$ (Mf)	- Martensitstart- bzw. Martensitendtemperatur
$\nu$	- Querkontraktionszahl
PQ	- konzentrierte Wärmequelle (Punktquelle)

$q$	- effektive Wärmeleistung
$R$	- Radius, Stabradius, Radiusvektor
$r_0$	- Verteilungsparameter des Wärmequellenmodells in Blechebene
$r_z$	- Verteilungsparameter des Wärmequellenmodells in Blechtiefe
$\rho$	- Dichte
$S$	- Elementtyp mit linearer Elementformfunktion "Simplexelement"
$s$	- Plattendicke
SBL	- Schmelzbadlänge
SW	- Schrittweite (in mm)
$\sigma_F$ (SIGMA)	- Dehngrenze
$\sigma_x$ (SX)	- Längseigenspannungen
$\sigma_y$ (SY)	- Quereigenspannungen
$\sigma_Y$	- Standardabweichung der Simulationsgröße (Y)
$t_{8/5}$	- Abkühlzeit zwischen 800 und 500 °C
$T_m$	- Einbrandtiefe
$T_{max}$ (Tmax)	- Maximaltemperatur
$T_s$	- Schmelzbadisotherme (angenommen 1500 °C-Isotherme)
UP	- Unterpulverschweißen
$u_x$	- Längsverschiebung
$u_{x,sum}$ (UX)	- Längsverzug, entspricht der summierten Längsverschiebung
$u_y$ (UY)	- Querverzug, entspricht der Querverschiebung
UZ	- Durchbiegung
$u_z$	- vertikale Verschiebung – quer zur Blechebene
$v_s$	- Schweiß- bzw. Vorschubgeschwindigkeit
WEZ	- Wärmeeinflusszone
WQ	- Wärmequelle
(Winkel)	- Winkelverzug, Differenz der vertikalen Verschiebung in der Mitte und am Rand der Verbindung
$X$	- Variationsparameter (Modellparameter)
$X_0$	- Sollwert des Variationsparameters
$\Delta X$	- Änderung des Variationsparameters
$Y$	- Wert der simulierten Größe (Kriterium)
$Y_{a,b}$	- analytisch ermittelte Größe
$Y_m$	- Mittelwert der Messdaten
$Y_n$	- numerisch ermittelte Größe
$\Delta Y$	- Abweichung der simulierten Größe
ZSW	- Zeitschrittweite
ZTA	- Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Schaubild
S-ZTU	- Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild