

Entwicklung einer laserunterstützten Umformvorrichtung zur
Kompensation thermischer Größeneffekte beim
Halbwarmmikromassivumformen metallischer Werkstücke

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Mahdi Terzi

aus Hamburg

Hamburg 2012

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Klassen

Tag der mündlichen Prüfung:

26. Juni 2012

Gedruckt mit Unterstützung der
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg

Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und
Fertigungstechnik

Band 24

Mahdi Terzi

**Entwicklung einer laserunterstützten
Umformvorrichtung zur Kompensation
thermischer Größeneffekte beim Halbwarmmikro-
massivumformen metallischer Werkstücke**

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.

Zugl.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2012

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 978-3-8440-1231-6

ISSN 1861-5260

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT) des Instituts für Konstruktions- und Fertigungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU).

Das dieser Arbeit zugrundeliegende Forschungsprojekt wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Modellierung von Größeneinflüssen bei Fertigungsprozessen“ (SPP 1138) maßgeblich finanziert.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg danke ich im besonderen Maße für das mir entgegengebrachte Vertrauen. Seine hervorragende wissenschaftliche Betreuung und stete Diskussionsbereitschaft sowie seine Unterstützung über das Fachliche hinaus haben die Erstellung und die Tiefe dieser Arbeit erst ermöglicht.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Klassen danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens im Rahmen meines Promotionsverfahrens.

Für die teilweise jahrelang andauernde gute Zusammenarbeit danke ich allen Kollegen am LaFT, dem brasilianischen Stipendiaten, den Mitarbeitern aus Nachbarinstituten sowie den Mitwirkenden des SPP 1138.

Darüber hinaus danke ich allen Studenten der HSU und der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, die durch ihre Studien- und Diplomarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, sowie dem griechischen Studenten der Praktikanten-Austauschorganisation „International Association for the Exchange of Students for Technical Experience“, der mich durch seine Arbeit unterstützt hat.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden, die mich während dieser Zeit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt hierbei meiner Mutter.

Mahdi Terzi

Hamburg im Juni 2012

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen und Abkürzungen	II
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Erkenntnisse	3
2.1 Massivumformung	3
2.2 Halbwarmumformung	4
2.3 Mikroumformung.....	9
2.4 Größeneffekte.....	14
2.5 Umformung mit transparenten Werkzeugen	28
2.6 Laseranwendung bei Umformprozessen	30
2.7 Temperaturmessverfahren	31
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	35
4 Theoretische Betrachtung thermischer Größeneffekte und Kompensationsmöglichkeiten	39
4.1 Analytisches Grundmodell thermischer Größeneffekte	39
4.1.1 Modellbildung.....	40
4.1.2 Folgerungen	47
4.2 Numerische Untersuchungen thermischer Größeneffekte.....	73
4.2.1 Modellbildung.....	74
4.2.2 Ergebnisse.....	76
4.3 Analytisches Modell zur Kompensation thermischer Größeneffekte	81
4.3.1 Modellbildung	82
4.3.2 Folgerungen	85
4.4 Numerische Untersuchungen zur Kompensation thermischer Größeneffekte	92
4.4.1 Modellbildung.....	93
4.4.2 Ergebnisse.....	98
4.4.3 Sensitivitätsanalyse	107
5 Präzisionshalbwarmmikromassivumformvorrichtung	119
5.1 Prinzipienauswahl	119
5.2 Prinzip.....	120
5.3 Werkzeugwerkstoff	121
5.4 Versuchstechnik	122
5.5 Probenherstellung.....	129
6 Experimentelle und simulatorische Untersuchungen	135
6.1 Temperatur bei Laserstrahlerwärmung ohne Umformung	136
6.2 Einfluss der Laserleistung bei skalierten Umformungen.....	142
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	159
8 Literaturverzeichnis	161

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	[-]	Konstante
a	[W/m ³]	Parameter
A	[-]	Absorptionsgrad
A	[m ²]	Oberfläche
A_F	[m ²]	kontaktlose Fläche
A_K	[m ²]	Kontaktfläche
$A_K(\varphi)$	[m ²]	umformgradabhängige Kontaktfläche
A_O	[m ²]	Oberfläche
A_S	[m ²]	vom Laser bestrahlte Stirnfläche
b	[-]	Konstante
b	[W/m ³]	Parameter
c_p	[J/(kg K)]	spezifische Wärmekapazität
C_S	[W/(m ² K ⁴)]	Boltzmann-Konstante
C_1	[-]	empirisch ermittelte Materialkonstante
C_2	[-]	empirisch ermittelte Materialkonstante
C_3	[-]	empirisch ermittelte Materialkonstante
d	[m]	Durchmesser
d	[-]	Variable
E	[Nm]	Energie
E_{WS}	[-]	Emissionsgrad Werkstück
E_{WZ}	[-]	Emissionsgrad Werkzeug
F	[N]	Kraft
F	[N]	Umformkraft
$F_{Adhäsion}$	[N]	Adhäsionskraft
$F_{Gewicht}$	[N]	Gewichtskraft
F_i	[N]	Kraft des Ursprungsmodells
\bar{F}_i	[N]	Kraft des skalierten Modells
F_{max}	[N]	maximale Kraft
$F_{Reibung}$	[N]	Reibkraft
h	[m]	Höhe
h	[m]	Werkstückhöhe
k_f	[N/mm ²]	Fließspannung
k_{fm}	[N/m ²]	Mittlere Fließspannung (zeitlicher Mittelwert).

m	[kg]	Masse
m	[-]	empirisch ermittelte Materialkonstante
n	[-]	empirisch ermittelte Materialkonstante
n	[-]	Wertenummer
n	[-]	Wiederholungen
P_L	[W]	Laserleistung
$P_{Lges.max.CW}$	[W]	maximale Gesamtlaserleistung im CW-Betrieb
$P_{Lges.max.Puls}$	[W]	maximale Gesamtlaserleistung im Puls-Betrieb
$P_{Lmax.CW}$	[W]	maximale Laserleistung im CW-Betrieb
$P_{Lmax.Puls}$	[W]	maximale Laserleistung im Puls-Betrieb
P_{LWS}	[W]	vom Werkstück absorbierte Laserleistung
Q_{ab}	[J]	abgeführte Wärmemenge
\dot{Q}_{ab}	[W]	abgeführter Wärmestrom
$\dot{Q}_{ab}(\varphi)$	[W]	umformgradabhängiger, abgeführter Wärmestrom
$\dot{Q}_{ab}(\lambda)$	[W]	skalierungsabhängiger, abgeführter Wärmestrom
Q_D	[J]	durch Dissipation zugeführte Wärmemenge
\dot{Q}_D	[W]	durch Dissipation zugeführter Wärmestrom
$\dot{Q}_D(\lambda)$	[W]	skalierungsabhängiger, durch Dissipation hervorgerufener Wärmestrom
$\dot{Q}_{D(A)}$	[W]	durch Dissipation zugeführter Wärmestrom oberflächenabhängiger Effekte
$\dot{Q}_{D(A)-OE}$	[W]	durch Dissipation zugeführter, oberflächenenergieabhängiger Wärmestrom
$\dot{Q}_{D(A)-RSE}$	[W]	durch Dissipation zugeführter, randschichteffektabhängiger Wärmestroms
$\dot{Q}_{D(A)-OV}$	[W]	durch Dissipation zugeführter, oberflächenverfestigungsabhängiger Wärmestrom
Q_g	[J]	Wärmemenge
\dot{q}_K	[W/m ²]	Wärmestromdichte durch Konvektion
\dot{Q}_K	[W]	durch Konvektion hervorgerufener Wärmestrom
\dot{q}_R	[W/m ²]	durch Reibung hervorgerufene Wärmestromdichte
\dot{Q}_R	[W]	durch Reibung hervorgerufener Wärmestrom in ein Werkstück
$\dot{Q}_{R(A)}$	[W]	durch Reibung zugeführter Wärmestrom oberflächenabhängiger Effekte
$\dot{Q}_{R(A)-OE}$	[W]	durch Reibung zugeführter, oberflächenenergieabhängiger Wärmestrom

$\dot{Q}_{R(A)-OF}$	[W]	durch Reibung zugeführter, oberflächenverfestigungsabhängiger Wärmestrom
$\dot{Q}_{R(A)-RSE}$	[W]	durch Reibung zugeführter, randschichteffektabhängiger Wärmestrom
$\dot{Q}_R(\lambda)$	[W]	skalierungsabhängiger, durch Reibung hervorgerufener Wärmestrom in ein Werkstück
\dot{q}_S	[W/m ²]	Wärmestromdichte durch Strahlung
\dot{Q}_S	[W]	durch Wärmestrahlung hervorgerufener Wärmestrom
\dot{q}_U	[W/m ²]	Wärmestromdichte durch den Wärmeübergang bzw. Wärmedurchgang zwischen Werkstück und Werkzeug
\dot{Q}_U	[W]	durch Wärmeübergang bzw. Wärmedurchgang hervorgerufener Wärmestrom
$\dot{Q}_U(\varphi)$	[W]	umformgradabhängiger, durch Wärmeübergang bzw. Wärmedurchgang hervorgerufener Wärmestrom
\dot{q}_Z	[W/m ²]	zusätzlich zuzuführende Wärmestromdichte
\dot{Q}_Z	[W]	zusätzlich zuzuführender Wärmestrom
$\dot{q}_Z(\lambda)$	[W/m ²]	größenabhängige, zusätzlich zuzuführende Wärmestromdichte
$\dot{Q}_Z(\varphi)$	[W]	umformgradabhängiger, zusätzlich zuzuführender Wärmestrom
$\dot{Q}_Z(\lambda)$	[W]	skalierungsabhängiger, zusätzlich zuzuführender Wärmestrom
Q_{zu}	[J]	zugeführte Wärmemenge
\dot{Q}_{zu}	[W]	zugeführter Wärmestrom
R	[-]	Reflexionsgrad
R_a	[mm]	arithmetischer Mittenrauwert
$R_{p\ 0,2}$	[N/m ²]	Streckgrenze
R_m	[N/m ²]	Zugfestigkeit
R_z	[mm]	Oberflächenrauheit
s	[-]	Stauchverhältniss
t	[s]	Umformzeit
t	[s]	Zeit
T	[-]	Transmissionsgrad
T	[°C]	Temperatur
t_i	[s]	Zeit des Ursprungsmodells
\bar{t}_i	[s]	Zeit des skalierten Modells
T_i	[°C]	Temperatur des Ursprungsmodells
\bar{T}_i	[°C]	Temperatur des skalierten Modells
T_m	[°C]	Schmelztemperatur
T_0	[°C]	Anfangstemperatur

T_R	[°C]	Raumtemperatur
T_S	[°C]	Schmelztemperatur
$T_{S,Ob}, T_{S,Um}$	[K]	Temperaturen zweier strahlungsaustauschender Körper (Oberfläche und Umgebung)
T_W	[°C]	Werkstücktemperatur
T_x	[°C]	Kristallisationstemperatur
V	[m ³]	Volumen
$V(\lambda)$	[m ³]	skalierungsabhängiges Volumen
v_{rel}	[m/s]	Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück
v_w	[m/s]	Stauchgeschwindigkeit bzw. Werkszeuggeschwindigkeit
W_U	[J]	Umformarbeit
x, y, z	[m]	Ortskoordinate
x_i	[m]	Länge des Ursprungsmodells
\bar{x}_i	[m]	Länge des skalierten Modells
X	[-]	Variable
α	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient
α_K	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient bei Konvektion
α_{KWS}	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient aufgrund von Konvektion am Werkstück
α_{KWZ}	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient aufgrund von Konvektion am Werkzeug
α_S	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient bei Wärmestrahlung
$\alpha_{\bar{v}}$	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient bzw. Wärmedurchgangskoeffizient
χ	[-]	Kraftmaßstab
ε	[-]	Dehnung
$\varepsilon :$	[-]	Emissionsgrad
$\dot{\varepsilon}$	[s ⁻¹]	Dehnrage
$\dot{\varepsilon}_0$	[s ⁻¹]	Referenzdehnrage
φ	[-]	Umformgrad
$ \varphi _{\max}$	[-]	Betrag des maximalen Umformgrads
$\dot{\varphi}$	[1/s]	Umformgeschwindigkeit
$\dot{\varphi}_z$	[1/s]	axiale Umformgeschwindigkeit
η	[-]	Wirkungsgrad
η_{Lges}	[-]	Gesamtwirkungsgrad der Laserleistung
λ	[-]	Längenmaßstab
λ	[-]	Skalierungsfaktor
λ	[W/(m K)]	Wärmeleitfähigkeit

θ	[-]	Temperaturmaßstab
ϑ	[°C]	Temperatur als Funktion von Zeit und Ortskoordinaten
$\vartheta_{K,Um}$	[K]	Temperatur des umgebenden Mediums
ϑ_{Ob}	[°C]	Oberflächentemperatur (Werkstück)
ϑ_{Um}	[°C]	Oberflächentemperatur (Werkzeug)
ρ	[kg/m ³]	Dichte
τ	[-]	Zeitmaßstab
τ_R	[N/m ²]	Reibungsschubspannung
ΔOE	[Nm]	Oberflächenenergieänderung
ΔT	[°C]	Temperaturunterschied
$\Delta \vartheta$	[°C]	Temperaturänderung
Φ	[W/m ³]	Energiequelle, z.B. Umformwärme
\emptyset	[m]	Durchmesser
\emptyset_L	[m]	Laserstrahldurchmesser
\emptyset_{WS}	[m]	Werkstückdurchmesser

Abkürzungen

CW	continuous wave
D	Dissipation
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FF	Formfüllung
HW	halbe Werkstückhöhe
K	Konvektion
KMD	Kraftmessdose
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
NF	0,5 mm von der laserbestrahlten Stirnfläche
OE	Oberflächenenergie
OV	Oberflächenverfestigung
R	Reibung
REM	Rasterelektronenmikroskop
RSE	Randschichteffekt
RT	Raumtemperatur
S	Wärmestrahlung
UE	einzubringende Umformenergie
Ü	Wärmeübergang
WS	Werkstück
WÜK	Wärmeübergangskoeffizient
WZ	Werkzeug