

Marangoni-Effekt beim Laserstrahltiefschweißen von Stahl

von Dr.-Ing. Thomas Fuhrich
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Göde

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2005

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2005

ISBN 3-8316-0493-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhalt

Kurzfassung	5
Inhalt	7
Symbolverzeichnis	11
Extended Abstract	15
1 Einleitung	19
1.1 Bedeutung des Laserstrahlschweißens in der Fertigung	19
1.2 Anforderungen an den Laserstrahlschweißprozess	21
2 Stand der Technik	24
2.1 Stand der Lasertechnik	24
2.2 Physik des Laserstrahliefschweißens	26
2.2.1 Energieeinkopplung und Wärmeleitung	27
2.2.2 Beschleunigungskräfte für die Schmelze im Schmelzbad	30
2.2.2.1 Kapillarumströmung infolge von Ablationskräften in der Dampfkapillare	30
2.2.2.2 Gradient der Oberflächenspannung als Strömungsan- trieb	32
2.2.2.3 Strömungsantrieb durch Dampfreibung in der Kapillare	35
2.2.2.4 Auftriebskräfte als Strömungsursache	36
2.2.2.5 Strömungsantrieb durch Scherspannungen an der Schmelzbadoberfläche infolge Schutzgasströmung . .	38
2.2.3 Kapillarinstabilität	39
2.2.4 Metallurgie	41
3 Motivation und Struktur der Arbeit	43
3.1 Einleitung	43
3.2 Experimentelle Beobachtungen beim Lichtbogen-/ Wärmeleitungs- schweißen	45
3.3 Struktur der Arbeit	47

4	Numerisches Modell	49
4.1	Einleitung	49
4.2	Gleichungssystem, Diskretisierung und numerisches Lösungsverfahren .	49
4.3	Randbedingungen	53
4.4	Vorteile und Einschränkungen numerischer Simulationen	53
4.5	Modellierung der Oberflächenspannung	54
5	Ergebnisse der Simulation	56
5.1	Einleitung	56
5.2	Schweißgeschwindigkeit $v = 2$ m/min	57
5.2.1	Schmelzströmung bei $v = 2$ m/min und neutralem $\partial\sigma/\partial T$. . .	57
5.2.2	Schmelzströmung bei $v = 2$ m/min und negativem $\partial\sigma/\partial T$. . .	62
5.2.3	Schmelzströmung bei $v = 2$ m/min und positivem $\partial\sigma/\partial T$. . .	68
5.2.4	Schmelzströmung bei $v = 2$ m/min und positiv-negativem $\partial\sigma/\partial T$	75
5.2.5	Diskussion und Vergleich der Simulationsergebnisse	80
5.3	Schweißgeschwindigkeit $v = 6$ m/min	88
5.3.1	Simulationsergebnisse für unterschiedliche Verläufe von $\partial\sigma/\partial T$	88
5.3.2	Vergleich der Simulationsergebnisse bei $v = 6$ m/min	96
5.4	Schweißgeschwindigkeit $v = 15$ m/min	100
5.4.1	Simulationsergebnisse für verschiedene Verläufe von $\partial\sigma/\partial T$.	100
5.4.2	Vergleich der Simulationsergebnisse bei $v = 15$ m/min	111
5.5	Vergleich der Beschleunigungskräfte im Schmelzbad	114
6	Mögliche phänomenologische Konsequenzen	119
6.1	Schmelzbadgeometrie und Heißrissanfälligkeit	119
6.2	Instationäre Effekte	121
6.3	Beeinflussung der Schmelzbadströmung durch Zusatzwerkstoff	123
6.3.1	Schweißen mit Zusatzdraht	124
6.3.2	Schweißen mit Pulver als Zusatzwerkstoff	125
6.3.3	Schweißen mit Plattierung als Zusatzwerkstoff	126
6.4	Beeinflussung der Schmelzbadströmung durch Vorwärmen	127
6.5	Einfluss von Schweißgas	127
6.6	Beeinflussung der Gasblasenbewegung durch den Marangoni-Effekt . .	128
7	Zusammenfassung und Ausblick	132
Anhang		
A	Werkstoffkennwerte und Kapillargeometrie	136

B Schmelzbadantriebskräfte und Beschleunigungen	139
C Simulationsergebnisse	142
C.1 Schweißgeschwindigkeit $v = 6$ m/min	142
C.1.1 Schmelzströmung bei neutralem $\partial\sigma/\partial T$ und $v = 6$ m/min	142
C.1.2 Schmelzströmung bei negativem $\partial\sigma/\partial T$ und $v = 6$ m/min	144
C.1.3 Schmelzströmung bei positivem $\partial\sigma/\partial T$ und $v = 6$ m/min	145
C.1.4 Schmelzströmung bei pos.-neg. $\partial\sigma/\partial T$ und $v = 6$ m/min	146
C.2 Schweißgeschwindigkeit $v = 15$ m/min	147
C.2.1 Schmelzströmung bei neutralem $\partial\sigma/\partial T$ und $v = 15$ m/min . . .	147
C.2.2 Schmelzströmung bei negativem $\partial\sigma/\partial T$ und $v = 15$ m/min . . .	148
C.2.3 Schmelzströmung bei positivem $\partial\sigma/\partial T$ und $v = 15$ m/min . . .	149
C.2.4 Schmelzströmung bei pos.-neg. $\partial\sigma/\partial T$ und $v = 15$ m/min . . .	149
Literatur- und Quellenverzeichnis	150
Index	155
Danksagung	159

1 Einleitung

1.1 Bedeutung des Laserstrahlschweißens in der Fertigung

Das Laserstrahlschweißen ist ein noch relativ junges Fügeverfahren, dessen Bedeutung in der Fertigungstechnik ständig zunimmt [1] und sich bislang vor allem in der Großserienfertigung durchgesetzt hat. In diesem Zusammenhang besonders hervorzuheben ist die Automobilindustrie, wo eine hohe Produktivität bei guter Qualität gefordert ist - hierzu gehören z.B. schlanke Schweißnähte mit hoher Festigkeit. Der vergleichsweise geringe Wärmeeintrag in das Werkstück infolge hoher Schweißgeschwindigkeit beim Laserstrahlschweißen erweist sich insbesondere bei langen Nähten, wie zum Beispiel den Dachnähten bei PKW, als besonders günstig, da hierdurch der Bauteilverzug in tolerierbaren Grenzen bleibt. Darüber hinaus muss die Nahtoberraupe bei Sichtnähten eine sehr gute Qualität aufweisen. Daher ist es hilfreich, wenn man die Antriebsmechanismen der Schmelze im Schmelzbad kennt und deren Zusammenspiel versteht, um möglichst schnell zu guten Ergebnissen zu gelangen.

Das Laserstrahlschweißen wird immer häufiger auch in Kleinserien verwendet, wenn aufgrund komplexer Geometrien, enger Lagetoleranzen, geringer Bauteilabmessungen und schlechter Zugänglichkeit der Fügestelle kein anderes Fügeverfahren in Frage kommt. Hierbei treten die Kosten zugunsten der Flexibilität in den Hintergrund. Gerade in Bezug auf die Lagetoleranzen sollte möglichst wenig Wärme in die Fügeteile abfließen, was eine genaue Kenntnis der Schmelzbadströmung und deren gezielte Beeinflussung erfordert.

Auch im Flugzeugbau, wo man traditionell dem Schweißen von Bauteilen aus Festigkeitsgründen sehr kritisch gegenübersteht, setzt sich das Laserstrahlschweißen Schritt für Schritt gegenüber den Nietverbindungen durch (z.Zt. Airbus A318, A319/A321 [2] und A380 [3]). Der Antrieb dazu kommt aus dem ständigen Bestreben, das Gewicht der Flugzeuge – und somit die Betriebskosten – weiter zu reduzieren sowie die Herstellungskosten zu senken. Die Gewichtseinsparung erfolgt im Bereich der Außenhaut, indem man die Versteifungsbleche (Stringer), die bisher auf die Innenseite der Außenhaut in Form von z.B. L-Profilen genietet wurden, per Laserstrahl direkt anschweißt [4]. Die für den Nietvorgang erforderliche Lasche kann somit eingespart werden (vgl. Abb. 1.1).

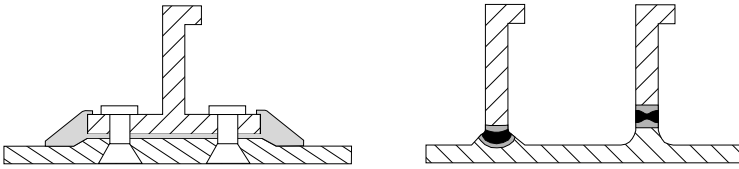


Bild 1.1: Leichtbauweise bei Versteifungsblechen (Stringer) auf der Innenseite der Rumpfaußenhaut vom Airbus 318 als Laserschweißkonstruktion (rechts – 2 Varianten) gegenüber der traditionellen Nietkonstruktion (links).

Weitere Vorteile einer Laserschweißverbindung gegenüber einer Nietverbindung sind

- große Anbindequerschnitte,
- Dichtigkeit der Schweißnaht, wodurch ein zusätzliches Abdichten entfällt.
- geringe Schallemission bei dynamischer Beanspruchung, da sich die verschweißten Bleche nicht gegeneinander bewegen können,
- hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit, und damit geringere Kosten durch hohe Produktivität,
- große Flexibilität im Hinblick auf schweißbare Bauteilgeometrien infolge guter Zugänglichkeit durch den Laserschweißkopf.

Folglich empfiehlt es sich, die erweiterten Möglichkeiten des Laserstrahlschweißens schon frühzeitig in die Konstruktion des Bauteils einfließen zu lassen, um alle Vorteile nutzen zu können [5], [6].

Konventionelle Schweißverfahren, von einigen Ausnahmen abgesehen [7], [8], [9], [10], [11], disqualifizierten sich bisher insbesondere im Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik durch

- Festigkeitsverlust durch eine große Wärmeeinflusszone,
- vergleichsweise schlechte Schweißbeignung von Aluminiumwerkstoffen,
- starken Bauteilverzug.

Trotz beachtlicher Fortschritte wird das Laserstrahlschweißen im Flugzeugbau zur Zeit hauptsächlich an vorwiegend statisch beanspruchten Teilen eingesetzt wie z.B. dem unteren Teil der Rumpfaußenhaut beim Airbus A318. Einige Probleme beim Laserstrahlschweißen, die den Einsatz dieses Fügeverfahren behindern, sind :

- Festigkeitsverlust in Schweißnaht und Wärmeeinflusszone (WEZ) durch Gefügeveränderung, was sich besonders bei dynamischen Belastungsfällen bemerkbar macht,

- Aufhärten der Schweißnaht und der WEZ,
- Rissanfälligkeit,
- Poren in der Naht, die die Festigkeit verringern,
- gelegentliche Probleme bei der Spaltüberbrückung durch schmales Schmelzbad,
- materialabhängige Prozessergebnisse und somit Anbindequerschnitte,
- schwankender Nahtquerschnitt durch Instationaritäten beim Schweißprozess (z.B. Spiking).

Viele dieser Probleme treten nur gelegentlich auf und können durch eine wirksame Online-Prozesskontrolle [12], [13] sicher erkannt und anschließend behoben werden. Zu den technisch-physikalischen Problemen kommt ein hoher Investitionsaufwand für eine Laserstrahlschweißanlage hinzu. Außerdem werden an die Prozessentwickler beim Laserstrahlschweißen noch höhere fachliche Anforderungen gestellt, als das bei den meisten konventionellen Fügeverfahren der Fall ist.

1.2 Anforderungen an den Laserstrahlschweißprozess

Für einen erfolgreichen Einsatz des Laserschweißprozesses innerhalb eines breiten Anwendungsspektrums muss die Schweißnahtgeometrie durch Parameterwahl des Prozesses einstellbar, vorausberechenbar und reproduzierbar sein. Wegen der im vorhergehenden Absatz genannten hohen Investitionskosten für Laser und Bearbeitungsstation spielt zudem die Prozesseffizienz selbst im Vergleich zu konkurrierenden Fügeverfahren eine größere Rolle.

Die wichtigsten Anforderungen an den Laserstrahlschweißprozess für den Konstrukteur sind die Festigkeit der Schweißverbindung und der Bauteilverzug infolge des Wärmeeintrags in das Bauteil. Der Bauteilverzug erfolgt durch thermische Ausdehnungs- sowie Schrumpfungseffekte beim Schweißen und in der Abkühlphase. Der Verzug wird in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt, so dass hier auf weiterführende Literatur verwiesen wird [14], [15], [16], [17], [18].

Die Festigkeit hängt vorrangig vom Anbindequerschnitt ab und kann durch verschiedene Nahtfehler und Einflüsse in der Umgebung der Schweißnaht beeinträchtigt werden. In Abbildung 1.2 sind einige typische Nahtfehler und Wärmeeinflüsse dargestellt, die die Festigkeit der Naht herabsetzen. Direkt an die Schweißnaht schließt sich die Wärmeeinflusszone (WEZ) an, in der durch den Wärmeeinfluss Gitterumwandlungen und Gefügeveränderungen im festen Zustand während des Schweißprozesses stattfinden. Damit