

© 2005 Carl Hanser Verlag, München www.kunststoffe.de/Kunststoffe-Archiv Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Vertriebskanälen



Sauber, material-schonend und kosten-effizient verschweißt mit dem Laserstrahl (Leckagesensor, Hersteller: Bosch)

Laserschweißen in der Computersimulation

Prozessführung optimiert. Ein Computermodell zur Berechnung der Schweißtemperatur, des Temperaturprofils und der Aufschmelztiefe beim Laserschweißen von Thermoplasten wurde entwickelt und experimentell überprüft. Es wird gezeigt, dass die Software bei gegebenen Werten für Material, Schweißnahtabmessungen und Vorschubgeschwindigkeit helfen kann, die Verfahrensparameter zu optimieren.

**SAM D. ROSTAMI
IAN A. JONES
CRAIG D. NORREY**

Das Laserschweißen von Thermoplasten gewinnt in der Automobilindustrie zunehmend an Popularität, weil es verfahrensspezifische Kosten- und Leistungsvorteile gegenüber traditionellen Kunststoff-Fügeverfahren bietet (Beispiel siehe Titelbild). Weil das Material nur örtlich eng begrenzt aufgeheizt wird, ist dessen thermische Beanspruchung gering, sind die erreichbaren Produktionsgeschwindigkeiten hoch, und die Schweißnähte sind kaum sichtbar. Außerdem erlaubt das Lasern Schweißanordnungen, die bisher nicht möglich waren. Um die Abläufe beim Laserschweißen besser verstehen zu lernen und als Hilfe bei der Optimierung der Prozessführung wurde ein Computermodell entwickelt, mit dem sich die Schweißtemperatur und Prozessparameter wie die erforderliche Laserleistung und die mögliche Schweißge-

schwindigkeit einschätzen lassen. Darüber hinaus trifft das Modell, das für amorphe und teilkristalline Thermoplaste gleichermaßen geeignet ist, auch Aussagen über die Aufschmelztiefe im Substrat (und damit zugleich auch in der aufgeschweißten Decklage, wie Versuche gezeigt haben).

Die Grundlagen des Laserschweißens

Beim Schweißen von Thermoplasten müssen die Polymerketten der beiden zu verbindenden Teile durch die Grenzfläche hindurch in die Gegenseite hinein diffun-

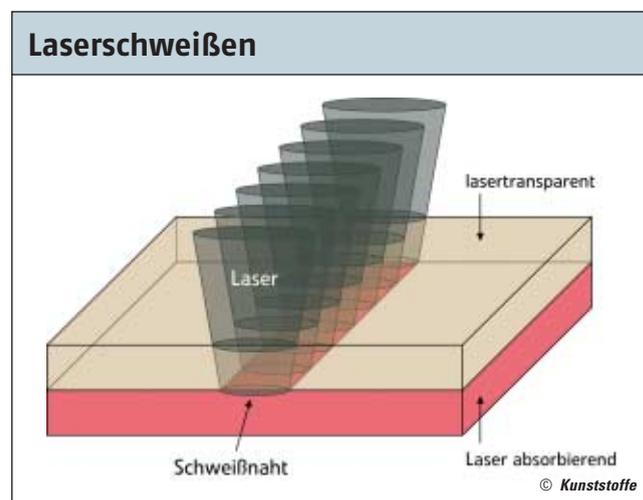
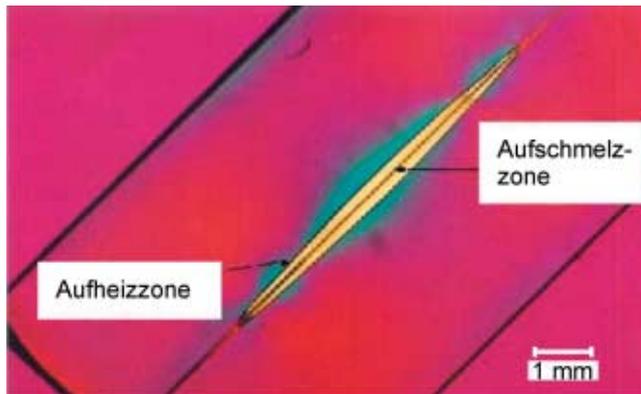


Bild 1. Schematische Darstellung des Aufbaus beim Laserschweißen

Bild 2. Schweißnaht in lasergeschweißtem PMMA unter polarisiertem Licht



dieren. Zu den Einflussparametern auf den Diffusionsvorgang gehören die Zeit, die Temperatur, der Druck, Kettenaufbau, -gestalt und -orientierung sowie die Kompatibilität der zu verschweißenden Polymere. Das Verfahren eignet sich grundsätzlich für eine Vielzahl von Thermoplasten, wobei auch Materialien mit unterschiedlichen Schmelztemperaturen verschweißt werden können, wenn sie auf molekularer Ebene kompatibel sind. Inkompatible Materialien erfordern zusätzliche Haftvermittler-Zwischenlagen, zum Beispiel aus bestimmten Copolymeren.

Damit der Laserstrahl (meist Nd:YAG- oder Diodenlaser mit Wellenlängen im Bereich 800 bis 1100 nm) die Schweißregion erreichen kann, muss die über der Schweißzone liegende Schicht aus einem lasertransparenten Material sein (das also Laserstrahlen einer bestimmten Wellenlänge durchlässt). Die darunter angeordnete Schicht muss aus einem Laser absorbierenden Kunststoff sein, der die Energie des auftreffenden Laserstrahls an seiner Oberfläche (der Grenzfläche zwischen den zu verschweißenden Einzelteilen) in Wärme umsetzt (Bild 1). Dabei fo-

kussiert der Laserstrahl die Hitze exakt auf den erwünschten, eng begrenzten Schweißnahtbereich, ohne das durchdrungene Material und dessen Oberfläche zu verändern und ohne das umgebende Material zu schädigen.

Um eine Laser absorbierende Wirkung zu erreichen, bieten sich vor allem zwei Verfahren an:

- die Zugabe von Laser absorbierenden Additiven zu einem an sich lasertransparenten Kunststoff und
- die Positionierung eines Laser absorbierenden Materials im Bereich der Schweißnaht.

Als Absorber eignet sich Ruß oder es können, wenn Ruß unerwünscht ist, auch andere Laser absorbierende Additive eingesetzt werden. The Welding Institute (TWI), Great Abington bei Cambridge/Großbritannien, hat in Zusammenarbeit mit der Gentex Corporation, USA, ein Verfahren entwickelt [1 bis 7], mit dem sich sowohl lasertransparente als auch semi-lasertransparente, nicht schwarz eingefärbte Polymere verschweißen lassen, so dass jetzt eine breite Auswahl an Farbkombinationen möglich ist. ▶

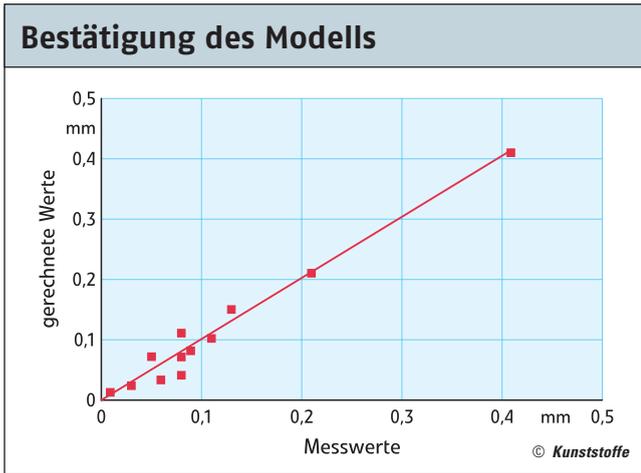


Bild 3. Vergleich gemessener und gerechneter Schweißnahttiefen am Beispiel von PMMA [7]

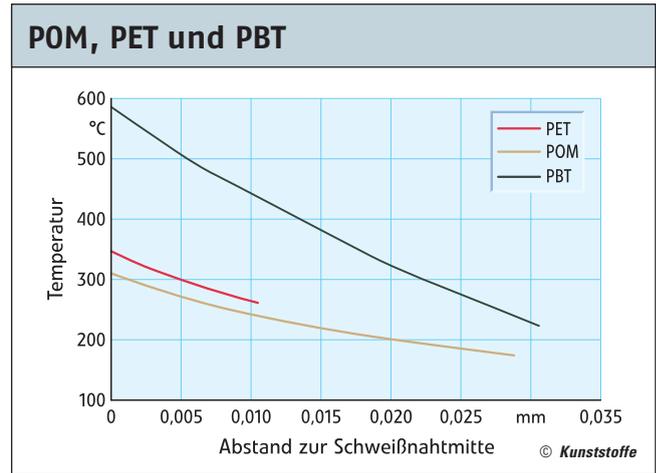


Bild 4. Berechnete Schweißtemperatur und Aufschmelztiefe für das Laserschweißen von Polyacetal und thermoplastischen Polyestern

Polymer		Polyethylen-terephthalat (PET)	Polybutylen-terephthalat (PBT)	Polyoxymethylen (POM)	Polyamid 6 (PA6)	Polyamid 66 (PA66)	Teilaromatisches Polyamid (PPA)
Typ		Rynite natur	Crastin S600	Delrin natur	Zytel 7300	Zytel E101L	Zytel HTN natur
Temperaturleitzahl	$\times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}$	1,43	0,73	1,69	1,8	0,72	0,72
spezifische Wärmeleitfähigkeit	$\text{J}/\text{m s K}$	0,218	0,2	0,36	0,23	0,23	0,23
Schmelztemperatur	$^{\circ}\text{C}$	265	225	178	220	262	305
IR-Durchlässigkeit (2 mm dicke Decklage bei 940 nm)	%	98	21	30	49	70	49
IR-Absorption (Unterlage bei 940 nm)	%	100					
Laserleistung (Quelle)	W	30	134	133	30	30	30
Laserleistung (Schweißnaht)	W	29,4	30	40	14,8	21	14,7
Schweißgeschwindigkeit	mm/min	6000					
Laserstrahlradius	mm	2,5	1,5	2,5	1,5	1,5	1,5

Tabelle 1. Untersuchte Thermoplaste, thermo-physikalische Eigenschaften und typische Schweißparameter

Rechenmodell experimentell überprüft

Als Aufschmelztiefe (Melt Depth) ist der Bereich definiert, in dem die erreichte Temperatur über der Schmelztemperatur des Polymers liegt. Sie unterscheidet sich von der Interdiffusionszone (Interfacial Zone), deren Größe von der Art des Polymers abhängt.

Es ist schwierig die Temperatur in der Grenzschicht, in der das Material aufschmilzt, während des Schweißens zu erfassen. Leichter ist es, die Aufschmelztiefe nach dem Fügen mit mikroskopischen Methoden an Hand von Mikrotomschnitten zu vermessen. Am Beispiel einer geschweißten PMMA-Probe, deren Schnittebene parallel zur Richtung des Laserstrahls verläuft, zeigt dazu Bild 2 die unter polarisiertem Licht aufgenommene, thermisch beeinflusste Zone.

Das Modell zur Simulation der Schweißtemperatur und Aufschmelztiefe basiert auf der in [8 bis 10] beschriebenen Theorie (Erläuterung der detaillierten Berechnungen unter E-Mail-Adresse craig.norrey@dupont.com abfragbar). Notwendige Größen zur Berechnung der Schweißtemperatur und des Wärmeprofiles im Substrat sind die in Tabelle 1 gelisteten Parameter. Der Vergleich gemessener und mit dem Computermodell errechneter Werte (Bild 3) bestätigt die Gültigkeit des Modells und gibt damit auch

ein Gefühl für die Genauigkeit der Schweißtemperatur, die mit Hilfe einer modifizierten Theorie [10] berechnet wird.

Werkstoffauswahl für die Versuche

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden an technischen Kunststoffen von DuPont durchgeführt, die als Decklage teiltransparent für Diodenlaserlicht mit 940 nm Wellenlänge sind und die als Substrate mit Ruß Laser absorbierend eingestellt waren. Tabelle 1 enthält einige zugehörige thermo-physikalische Eigenschaften sowie den prozentualen Anteil an IR-Licht, das eine 2 mm dicke Decklage durchlässt, die eingestellte Laserleistung sowie die gewählte Schweißgeschwindigkeit. Außerdem ist das Ergebnis der Berechnung der reduzierten Laserleistung angegeben, die jeweils an der Schweißnaht verfügbar ist und die sich aus der Absorption und Reflexion des Laserstrahls im Bereich der Decklage ergibt.

Laserschweißbarkeit nachgewiesen

Für die in Tabelle 1 gelisteten Daten und Schweißparameter zeigt Bild 4 die für den Rynite PET Standardtyp (Schmelztemperatur = 265 °C, hohe Laser-Durchlässigkeit der Decklage) berechnete Schweißtemperatur (die erste Temperatur auf der y-Achse, hier 348 °C) und die Aufschmelztiefe (der letzte x-Wert, hier 0,011 mm). Dabei wirkt der Laserstrahl mit seinem Radius von 2,5 mm bei einem Vorschub von 6000 mm/min über einen Zeitraum von 50 ms auf jeden Punkt in der Schweißnahtmitte ein.

Deutlich andere Werte ergeben sich für das PBT Crastin S600, bei dem die Decklage 79 % der Laserenergie absorbiert (ebenfalls Bild 4). Um die verbleibende Laserenergie auf eine kleinere Fläche zu fokussieren, ist hier ein geringerer Laserstrahl-Durchmesser von 1,5 mm erforderlich, so dass der Laserstrahl bei gleichem Vorschub nur noch 30 ms auf jeden Punkt der Schweißnahtmitte einwirkt. Trotz der gegenüber PET deutlich niedrigeren Schmelztemperatur von 225 °C ist deshalb

eine hohe Laserleistung von 134 W erforderlich, um ein gutes Schweißergebnis zu erreichen. Die dann erzeugte Aufschmelztiefe liegt rechnerisch bei rund 0,03 mm. Um den gleichen Effekt mit einem größeren Laserstrahldurchmesser zu erzielen, müsste entweder eine noch viel höhere Laserenergie eingebracht oder die Vorschubgeschwindigkeit deutlich verringert werden.

Für POM (ebenfalls Bild 4) werden unter den in Tabelle 1 genannten Laser-Bedingungen (133 W Laser-Ausgangsleistung, 2,5 mm Strahlradius) eine Schweißtemperatur von 311 °C und eine Aufschmelztiefe von rund 0,03 mm errechnet. Die entsprechenden Werte für PA 6 (Zytel 7300, 1,5 mm Laserstrahlradius) zeigt Bild 5. Für PA 66 (Zytel E101L), das vergleichsweise viel Laserenergie durchlässt, werden eine entsprechend höhere Schweißtemperatur und eine größere Aufschmelztiefe erreicht (ebenfalls Bild 5).

Das Hochleistungspolyamid Zytel HTN hat eine ebenso niedrige Durchlässigkeit für Laserstrahlen wie das PA 6, aber eine deutlich höhere Schmelztemperatur. Dadurch sinken

gegenüber PA 66 sowohl die Schweißtemperatur als auch die Aufschmelztiefe (Bild 6). Letztere erreicht nur noch einen Wert von 4,38 µm. Das heißt, dass bei den für die Berechnung zu Grunde gelegten Parametern eine zu schwache Schweißung resultieren würde. Um diese Effekte auszugleichen, muss die Laserleistung bei gleich bleibendem (geringem) Laserstrahlradius von 1,5 mm erhöht bzw. die Vorschubgeschwindigkeit verringert werden.

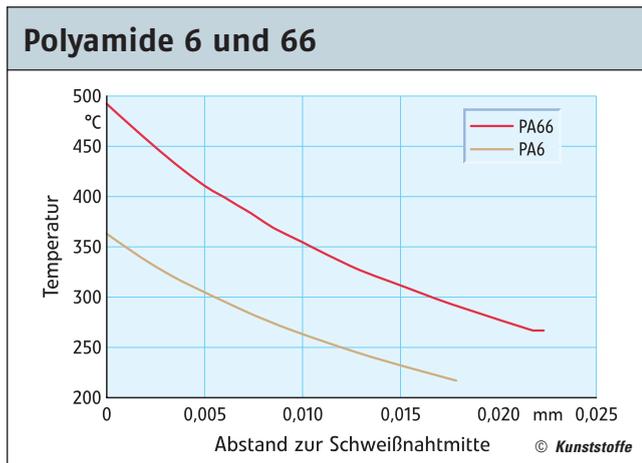


Bild 5. Berechnete Schweißtemperatur und Aufschmelztiefe für das Laserschweißen von PA6 und PA66

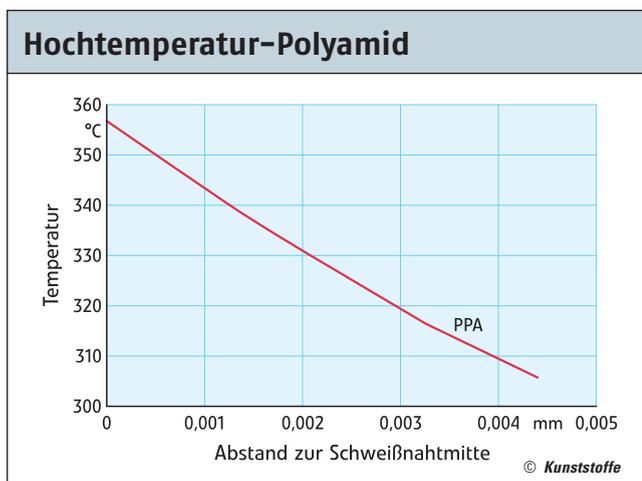


Bild 6. Berechnete Schweißtemperatur und Aufschmelztiefe für das Laserschweißen von Zytel HTN

Fazit

Die errechneten Ergebnisse für die Schmelztemperatur, das Temperaturprofil und die Aufschmelztiefe beim Laserschweißen von Thermoplasten zeigen, dass sich bei gegebenen Informationen über den Materialtyp, die Schweißnahtabmessungen und die Vorschubgeschwindigkeit Schlüsse darüber ziehen lassen, wie der Prozess geführt werden muss, um optimierte Schweißergebnisse zu erzielen. Damit sind die ►

Resultate dieser Studie auch geeignet, die generelle Eignung eines thermoplastischen Kunststoffes für das Laserschweißen einzuschätzen. ■

DANK

Die Autoren danken TWI Ltd und DuPont de Nemours International S.A. für die Erlaubnis, diese Ergebnisse zu veröffentlichen.

LITERATUR

1 Jones, I. A.; Wise, R. J: Welding Method. 1 Oct 1998, Patent WO 00/20157
 2 Jones, I. A.; Taylor, N. S.; Sallavanti, R.; Griffiths, J.: Use of Infrared Dyes for Transmission Laser Welding of Plastics. Proc. Antec 2000, May 7-11 2000, Orlando, Florida. Vol.1, S. 1166-1170

3 Jones, I. A.; Wise, R. J; Hilton, P. A.: The Clearweld Process for Laser Welding of Plastics und Fabrics. September 2001, TWI Members Report 730/2001
 4 Kagan, V.; Woosman, N.: Efficiency of Clearwelding Technology for Polyamides. Proc. Antec 2002, San Francisco, CA
 5 Woosman, N.; Burrell, M.: A Study of the Effect of Weld Parameters on Strengths of Clearwelded Thermoplastics. Icaleo, October 2003, Jacksonville, FL
 6 Woosman, N.; Sallavanti R.: Achievable Weld Strengths for Various Thermoplastics using the Clearweld Process. Proc. Antec 2003, Nashville, TN
 7 Rostami, S.; Jones, I. A: Process Guidance und Software for Clearweld. August 2003, TWI Members Report 772/2003.

i	Hersteller
<p>DuPont de Nemours International S.A. P.O.Box 50 CH-1218 Grand-Saconnex Schweiz Tel. +41 (0) 22/1 71 51 11 Fax +41 (0) 22/7 17 52 00 www.dupont.com</p>	

8 Kennish, Y. C.; Shercliff, H. R.; McGrath, G. C.: Heat flow model for laser welding of polymers. Antec 2002, San Francisco, California USA, Vol.1, S. 1132-1136
 9 Kennish, Y. C.: Development und Modelling of a New Laser Welding Process for Polymers. July 2003, Ph.D. Thesis, Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge, Großbritannien
 10 Shercliff, H. R.; Ashby, M. F.: The Prediction of Case Depth in Laser Transformation Hardening. Metallurgical Transaction A, 1991, Vol.22A, S. 2469

DIE AUTOREN

SAM D. ROSTAMI und IAN A. JONES sind Mitarbeiter von The Welding Institute (TWI) Ltd., Great Abington, Cambridge/Großbritannien.

CRAIG D. NORREY ist Design Consultant und Global Leader of Assembly Techniques, DuPont Engineering Polymers, Genf/Schweiz.

Kontakt: karl-wilhelm.kirberg@dupont.com

SUMMARY PLAST EUROPE

Laser Welding in Computer Simulation

OPTIMISED PROCESS CONTROL. A computer model for calculating the weld temperature, temperature profile and melting depth in the laser welding of thermoplastics was developed and subsequently checked by experiment. It is shown that the software can help to optimise the process parameters when specific data are available on the material, weld seam dimensions and rate of advance.

*NOTE: You can read the complete article by entering the document number **PE103415** on our website at www.kunststoffe.de/pe*