Weierstraß-Institut
für Angewandte Analysis und Stochastik

im Forschungsverbund Berlin e.V.

Preprint ISSN 0946 – 8633

Simulationsbasierte Regelung der Laserhärtung von Stahl

Holger Alder[1], Dietmar Hömberg[2], Wolf Weiss[2]

submitted: 21st December 2005

[1] Photon Laser Engineering GmbH
Staakener Str. 23
13581 Berlin
Germany
E-Mail: h.alder@photonag.com

[2] Weierstraß-Institut
für Angewandte Analysis
und Stochastik
Mohrenstr. 39
10117 Berlin
Germany
E-Mail: hoemberg@wias-berlin.de
weiss@wias-berlin.de

No. 1085
Berlin 2006

2000 *Mathematics Subject Classification.* 80A20, 93A30.

Key words and phrases. Heat treatment control phase transitions.

Edited by
Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik (WIAS)
Mohrenstraße 39
10117 Berlin
Germany

Fax: + 49 30 2044975
E-Mail: preprint@wias-berlin.de
World Wide Web: http://www.wias-berlin.de/

Bei der Oberflächenhärtung mit Hilfe von Laserstrahlen ist eine konstante Einhärtetiefe erwünscht, wobei gleichzeitig Anschmelzungen vermieden werden sollen. Um Anschmelzungen zu verhindern, kann die Temperatur im Auftreffpunkt des Lasers gemessen werden und die Laserleistung entsprechend geregelt werden. Eine konstante Temperatur führt bei geometrisch komplizierten Bauteilen jedoch nicht zu einer konstanten Einhärtetiefe. In dieser Arbeit wird ein Verfahren aufgezeigt, wobei durch numerische Simulationen eine nichtkonstante Oberflächentemperatur berechnet wird, die eine konstante Einhärtetiefe liefert. Die berechnete Oberflächentemperatur kann als Solltemperatur im realen Prozess benutzt werden.

1. Einführung

Bei Werkstücken einfacher Geometrie mit genügend großem Volumen unterhalb der Härtespur ist die maschinenseitige Regelung mit konstanten Oberflächentemperaturen hinreichend, um Anschmelzungen zu vermeiden und konstante Härtetiefen zu gewährleisten. Bei komplizierten Werkstückgeometrien mit variierender Dicke ist das in der Regel nicht ausreichend. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, wie mit Hilfe von Computersimulationen eine – i.A. nichtkonstante – Oberflächentemperatur berechnet werden kann, die als Solltemperatur für die maschinenseitige Regelung verwendet, auch in diesen Fällen zu einer konstanten Einhärtetiefe führt.

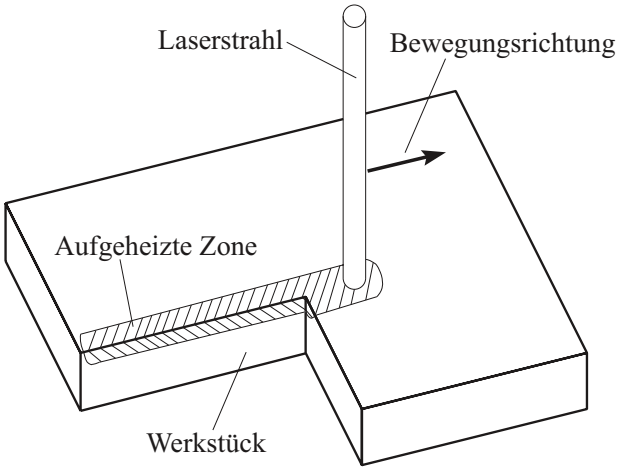


Bild 1. Skizze der Laser- Oberflächenhärtung

Bild 1 zeigt den Prozess der Laser- Oberflächenhärtung. Ein Laserstrahl bewegt sich entlang der Oberfläche eines Werkstücks. Die absorbierte Energie führt zu einer Aufheizung der Randschicht, woraufhin sich die Hochtemperaturphase Austenit bildet. Hinter dem Laserstrahl fließt die eingebrachte Energie relativ schnell in das Werkstück ab. Durch diese *Selbstabschreckung* transformiert sich der Austenit in die gewünschte harte Martensit -Phase. Je nach Stahlsorte können auch noch die weniger harten Phasen Ferrit, Perlit und Bainit entstehen [1]. Die typischen Einhärtetiefen liegen etwa zwischen 0.3 und 1.0 mm.

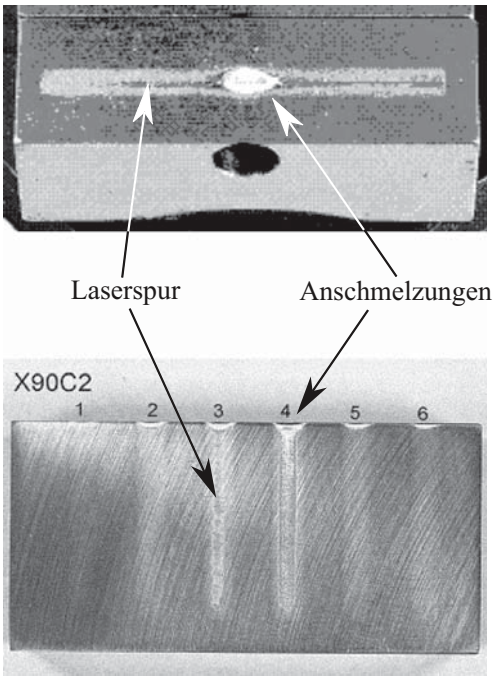


Bild. 2. Anschmelzungen beim Laserhärten.

Bild 2 zeigt Resultate des Laserhärtens und gleichzeitig die Notwendigkeit einer Temperaturkontrolle. Im unteren Teil des Bildes ist ein Stahlblock zu sehen, bei welchem mit dem Laser sechs Härtebahnen erzeugt wurden. Der Laser bewegte sich dabei mit konstanter Geschwindigkeit und je Härtebahn mit unterschiedlicher, jedoch konstanter Leistung. An der oberen Kante des Werkstücks kam es bei einigen Härtebahnen zur Anschmelzung. Um dies zu vermeiden, muss der Energieeintrag dort vermindert werden. Ähnliches kann auch auftreten, wenn sich die Materialstärke unterhalb der Härtebahn vermindert. Im oberen Teil von Bild 2 erkennt man eine Anschmelzung bzw. ein Aufplatzen der Oberfläche über einer zylindrischen Bohrung senkrecht zur Härtebahn. Auch hier ist es nötig, die Laserleistung oberhalb des Loches zu reduzieren.

Neben der Geometrie hat auch der Absorptionskoeffizient κ der Oberfläche einen wichtigen Einfluss. Dieser bestimmt die vom Laser in das Werkstück eingebrachte Energie. Der Absorptionskoeffizient kann sich örtlich ändern und auch von der Temperatur abhängig sein. Wenn sich κ jedoch ändert, führt eine konstante Laserleistung, selbst bei geometrisch unproblematischen Werkstücken, nicht zu einer konstanten Einhärtetiefe.

2. Prozesskontrolle beim Laserhärten

Moderne Anlagen zur Laserhärtung verfügen über die Möglichkeit der Prozesskontrolle. Das ist schematisch in Bild 3 gezeigt.

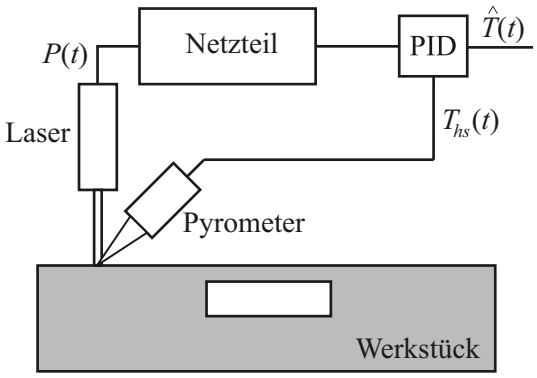


Bild 3. Prinzipskizze der Prozesskontrolle beim Laserhärten

Die Temperatur T_{hs} im heißen Fleck (Hot spot) des Laserstrahls auf der Oberfläche des Werkstücks wird mit Hilfe eines Pyrometers gemessen. Ein PID Regler regelt die

Leistung P des Lasers so, dass die gewünschte Solltemperatur $\hat{T}$ möglichst genau eingehalten wird. Liegt die Solltemperatur unter der Schmelztemperatur können die unerwünschten Anschmelzeffekte aus Bild 2 vermieden werden. Auch das Problem mit einem veränderlichen Absorptionskoeffizienten ist damit behoben.

Andererseits führt eine konstante Oberflächentemperatur, bei geometrisch komplizierten Teilen, im Allgemeinen nicht zu einer konstanten Einhärtetiefe! Aus diesem Grund ist eine Methode entwickelt worden, welche auf Basis eines mathematischen Modells für die Phasenfraktionen und die Temperaturverteilung eine zeitabhängige Solltemperatur liefert, welche dann zu einer konstanten Einhärtetiefe führt.

3. Ein mathematisches Modell für die Prozesssimulation

Die grundlegende Basis für unser Modell ist die Annahme, dass die notwendige Information zur Beschreibung der Entwicklung der Phasenfraktionen in den Zeit – Temperatur –Umwandlungs- (ZTU) Diagrammen enthalten ist. Das Modell besteht aus fünf gewöhnlichen Differentialgleichungen für die fünf Phasenfraktionen Austenit a, Ferrit f, Perlit p, Bainit b und Martensit m. Einzelheiten zum Modell finden sich in [2]. Für die jeweilige Stahlsorte werden die für das Modell notwendigen Materialfunktionen mit dem entsprechenden isothermen ZTU Diagramm und dem ZTU Diagramm für kontinuierliche Abkühlung bestimmt. In Zusammenarbeit mit Materialwissenschaftlern sind die Materialfunktionen für eine Reihe wichtiger Stähle bestimmt worden und in [2] dokumentiert.

Für einen gegebenen Temperaturverlauf ist eine Lösung des Gleichungssystems für den Stahl Ck45 in Bild 4 dargestellt. Man erkennt, wie beim Aufheizen etwa ab 700C der Austenit entsteht und dieser sich beim Abkühlen fast vollständig in Martensit und in etwas Bainit umwandelt.

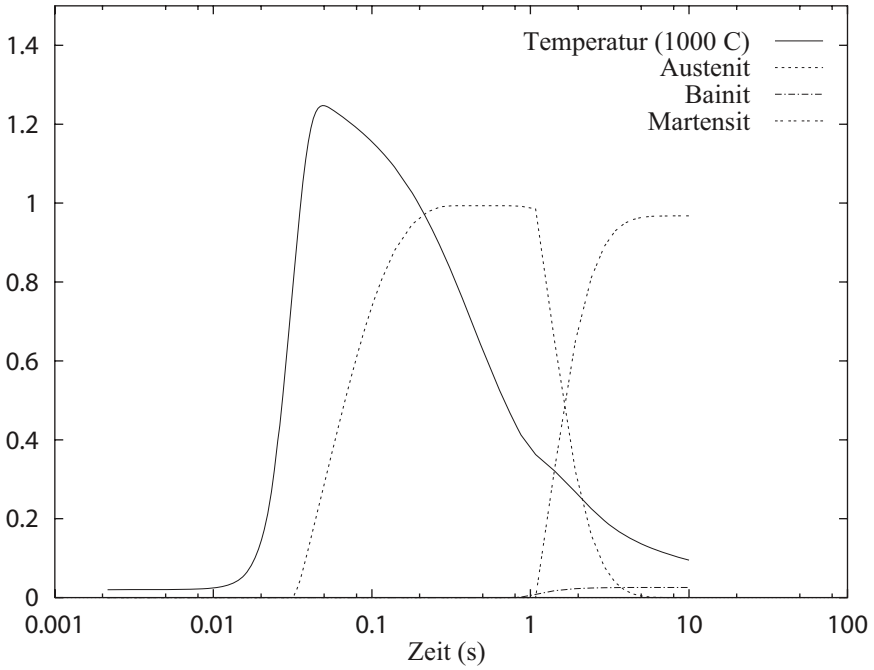
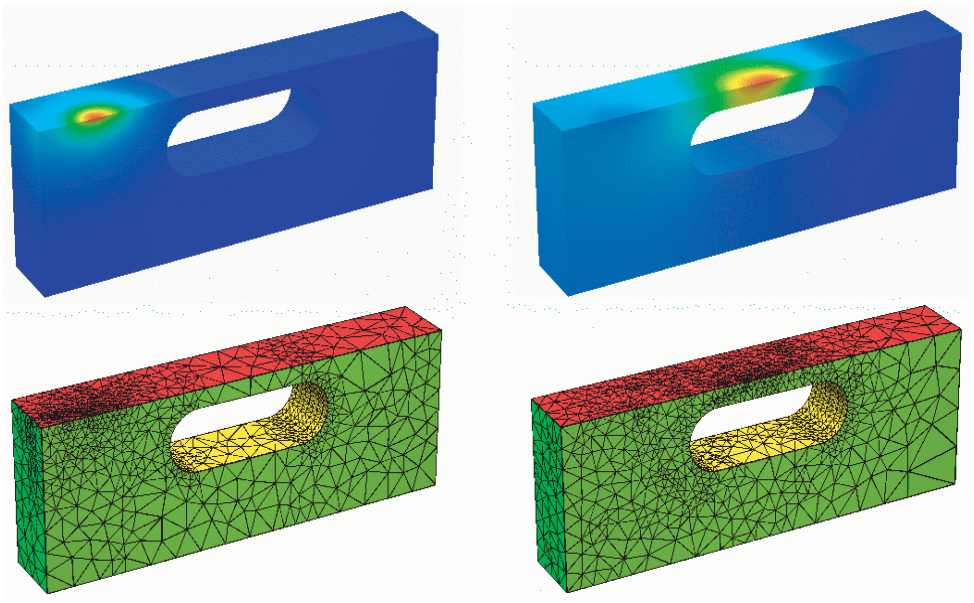


Bild 4. Zeitliche Entwicklung von Temperatur und Phasenanteilen an einem festen Punkt im Werkstück

Das Modell für die zeitliche Entwicklung der Phasenfraktionen koppelt über die Umwandlungswärmen mit der Wärmeleitungsgleichung. Somit steht zur Prozessbeschreibung ein vollständiges Gleichungssystem zur Verfügung [2]. Zur Lösung dieses Systems ist am WIAS in Berlin, basierend auf der finite Volumen toolbox pdelib [3], das Programm WIAS-SHarP entwickelt worden. Das zu härtende Werkstück wird durch ein Gitter abgebildet, auf welchem die Modellgleichungen gelöst werden. Die typischen Einhärtetiefen von 0,3 bis 1,0 mm sind im Vergleich mit der Bauteilgröße relativ klein. Deshalb ist es nützlich das Gitter dort zu verfeinern, wo der Laserstrahl auftritt, bzw. wo die Temperatur und die Phasenfraktionen große Gradienten aufweisen. Andererseits wird, an Orten wo die Temperatur wieder gesunken ist und die Gradienten klein geworden sind, das Gitter wieder vergröbert. Das Programm ist in der Lage mit Hilfe von Fehlerschätzern die Gitteradaption selbst vorzunehmen. Dadurch wird der Rechenaufwand verringert und Rechenzeit eingespart, ohne einen Genauigkeitsverlust zu erleiden. Bild 5 zeigt für ein zu härtendes Werkstück die berechnete Temperaturverteilung und das zugehörige adaptive Gitter zu zwei verschiedenen Zeitpunkten.



$t = 0.5\text{s}$ $t = 8.5\text{s}$

Bild 5. Temperaturverteilung und adaptives Gitter zu zwei Zeitpunkten

Für beide Zeiten sind oben die Temperaturfelder und unten die Gitter dargestellt. Das Werkstück ist dabei entlang der Härtebahn durchgeschnitten und deshalb nur zur Hälfte sichtbar. Im linken Bildteil befindet sich der Laserstrahl vor dem Langloch, im rechten Bildteil etwa in der Mitte oberhalb des Langlochs.

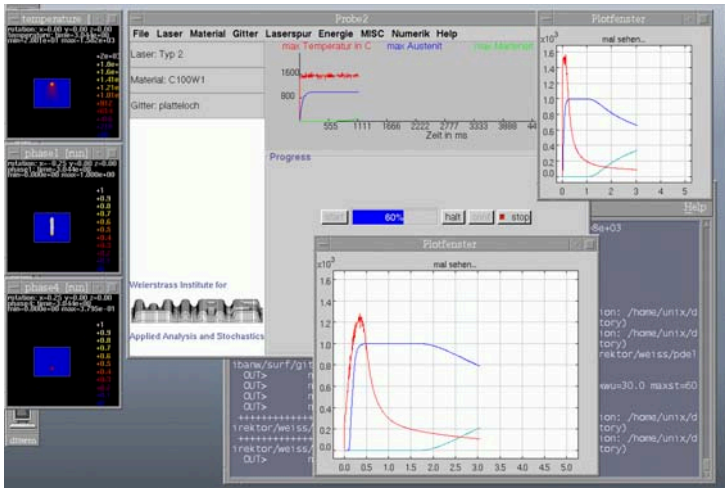


Bild 6. Programm WIAS-SHarP, Screenshot

Bild 6 zeigt einen Screenshot der Benutzeroberfläche WIAS-SharP. Diese ermöglicht die einfache Eingabe bzw. Auswahl aller notwendigen Prozessparameter, wie z.B. den Weg und die Geschwindigkeit des Lasers, die maximale Leistung und das

Strahlungsprofil. Zwei typische Strahlungsprofile sieht man in Bild 7, einen Gaslaser mit Gauß- Profil (links) und einen Halbleiterlaser mit Rechteck- ähnlichem Profil (rechts).

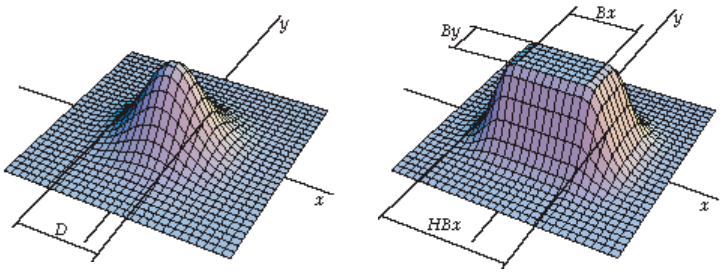


Bild 7. Typische Laserstrahlungsprofile

4. PID Regelung der Temperatur

Beim Oberflächenhärten wird ein zwiefältiges Ziel verfolgt: die Verhinderung von Anschmelzungen und eine konstante Einhärtetiefe.

Zunächst wird die Notwendigkeit der Temperaturregelung mit einer Simulationsrechnung veranschaulicht. In Bild 8 ist ein Werkstück dargestellt, welches mit konstanter Laserleistung bestrahlt wurde. Dabei wurde angenommen, dass der Absorptionskoeffizient konstant ist. Das Langloch hat einen Abstand von 2 mm von der Oberfläche und liegt senkrecht zur Härtebahn bzw. Laserspur. Der Laser wird 5 mm vom linken Ende eingeschaltet und bewegt sich dann mit einer Geschwindigkeit von 0,25 cm/s nach rechts bis über das Werkstückende hinaus. Hier lassen sich drei interessante Probleme studieren: die Entwicklung der Einhärteschicht beim Anfahren, der Einfluss der Geometrie durch das Langloch und der Fall, wenn der Laser über die Werkstückkante fährt. Die Laserleistung wurde so gewählt, dass zumindest in einem Teil der Härtebahn, etwa von 3,5 bis 4,5 cm, die Einhärtetiefe konstant 1 mm beträgt. Zu Beginn des Härtprozesses ist diese Leistung jedoch zu gering um einen raschen Temperaturanstieg zu gewährleisten, weshalb sich das Einhärteprofil vom Startpunkt 0,5 cm an nur sehr langsam ausbildet. Oberhalb des Langlochs jedoch ist diese Leistung nun viel zu groß und die Schmelztemperatur wird deutlich überschritten. Diese hohe Temperatur führt auch dazu, dass das Einhärteprofil sehr tief reicht und das Langloch auf der gesamten Länge berührt. Einen ähnlichen Effekt kann man am rechten Ende des Werkstücks beobachten, auch dort kommt es zur Anschmelzungen und zu hohen Einhärtetiefen.

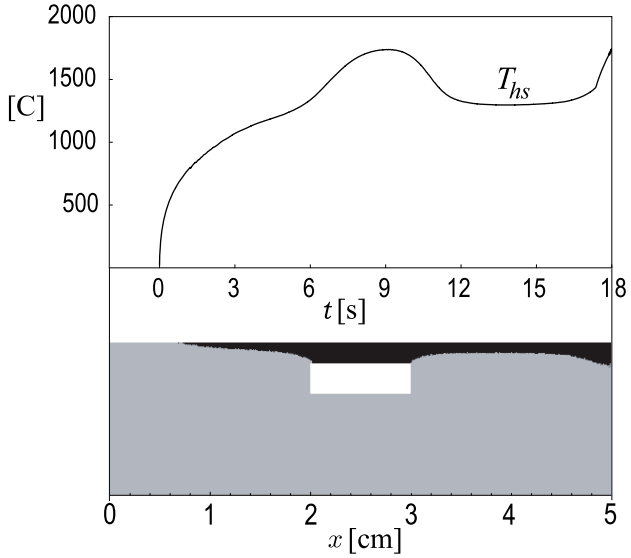


Bild 8. Simulation einer Regelung mit konstanter Laserleistung, Oberflächentemperatur (oben) und Einhärteprofil (unten)

Eine konstante Oberflächentemperatur wird als erste Maßnahme zur Verbesserung des Härteprozesses angesehen. Wie in Abschnitt 2 beschrieben, lässt sich mit der in Bild 3 dargestellten Prozesskontrolle die Temperatur der Oberfläche maschinenseitig regeln. Dabei wird versucht, die Abweichung $e(t) = T_{hs}(t) - \hat{T}(t)$ zwischen der Temperatur $T_{hs}(t)$ im Laserfokus und der gewünschten Solltemperatur $\hat{T}(t)$ möglichst gering zu halten. Eine Möglichkeit dazu bietet der Proportional-Integral-Differential Regler, kurz PID Regler. Die Leistung *P* des Lasers wird dabei durch

$$P(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{\tau_I}\int_0^t e(s)ds + \tau_D \dot{e}(t)\right)$$

bestimmt. Die drei Parameter K_p, τ_I und τ_D können durch die so genannte Sprungantwort eines geometrisch einfachen Körpers, auf eine stufenförmige Erhöhung der Leistung, bestimmt werden [4].

Bild 9 zeigt die Ergebnisse eines simulierten Härteprozesses, bei welchem die Temperatur im Fokus $T_{hs}(t)$ mit Hilfe eines PID Reglers konstant gehalten wurde. Anschmelzungen treten nicht mehr auf und auch das Einhärteprofil zeigt einige Verbesserungen. Die Einhärtetiefe nimmt zu Beginn der Härtebahn relativ schnell die

gewünschten 1 mm an, und am rechten Ende des Werkstücks wird dieser Wert nur geringfügig überschritten.

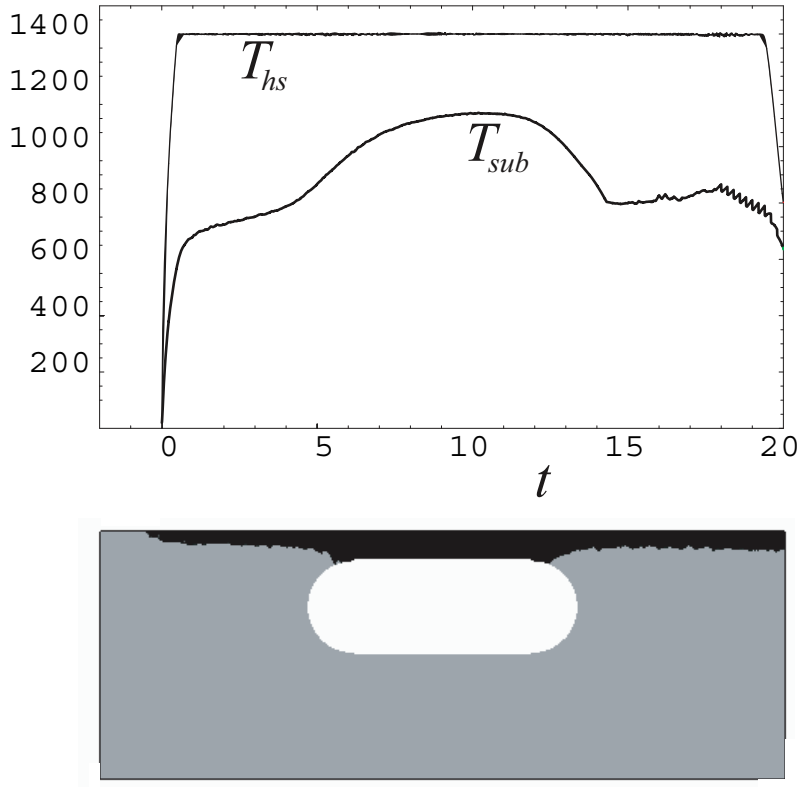


Bild 9. Simulation einer Regelung mit konstanter Fokustemperatur

Das resultierende Einhärteprofil ist trotzdem nicht befriedigend, da der Bereich der Phasenumwandlungen das Langloch praktisch auf seiner ganzen Länge berührt. Die vom Laser oberhalb des Langlochs eingebrachte Energie kann auf Grund der geringen Materialmenge nicht schnell genug abfließen. Dies führt zu einer Temperaturerhöhung in tieferen Schichten. Im oberen Teil von Bild 9 ist die Temperatur im Fokus des Lasers T_{hs} und die Temperatur T_{sub} in 1mm Tiefe unter der Oberfläche als Funktion des Laserfokus aufgetragen. Obwohl die Fokustemperatur konstant ist, schwankt T_{sub} sehr stark. Zusammenfassend kann man feststellen, dass durch die Einhaltung einer konstanten Oberflächetemperatur zwar Anschmelzungen vermieden werden, eine konstante Einhärtetiefe wird damit jedoch im Allgemeinen nicht erreicht.

5. Optimale Strategie zur Erhaltung einer konstanten Einhärtetiefe

Die Temperaturverläufe in Bild. 9 legen nahe, die Temperatur T_{sub} konstant zu halten, um eine Verbesserung des Einhärteprofils zu erhalten [5,6]. Dies ist in der Simulation tatsächlich möglich, da ja das Temperaturfeld im ganzen Werkstück berechnet wird und somit auch 1mm unter der Oberfläche bekannt ist. In Bild 10 ist das Ergebnis einer solchen Rechnung zu sehen.

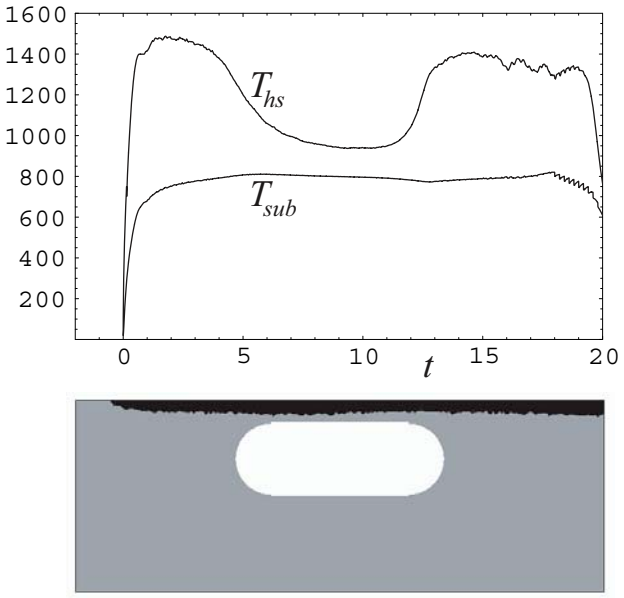


Bild 10. Rechnung mit geregelter Temperatur T_{sub}.

Hierbei wurde die Temperatur T_{sub} in 1mm Tiefe unterhalb des Laserfokus mit Hilfe eines PID Reglers auf 795 C gehalten, was der Austenit Start Temperatur entspricht. Die Temperatur in 1mm Tiefe lässt sich auf Grund der Trägheit der Wärmeleitung nicht so gut regeln. Im Vergleich zu Bild 9 ist die Temperatur T_{sub} jedoch praktisch konstant. Entsprechend gut ist das Resultat bezüglich des Einhärteprofils, welches nun eine fast konstante Einhärtetiefe aufweist.

In der Praxis lässt sich die Temperatur T_{sub} nicht messen und somit auch nicht regeln. Die oben aufgeführte Rechnung für die Regelung von T_{sub} liefert jedoch auch den entsprechenden Verlauf der Fokustemperatur von T_{hs}, wie in Bild. 9 dargestellt. Dieser Temperaturverlauf kann in der Praxis als Solltemperatur für die Regelung der Fokustemperatur benutzt werden.

Zur Verifizierung dieses Ansatzes sind bei der Firma Photon Laser Engineering GmbH Experimente mit Hilfe der Laseroptik HR24 durchgeführt worden. Diese ermöglicht eine Randschichthärtung von Metallen bis max. 2 mm Tiefe und besitzt eine integrierte Temperaturregelung. Bild 11 zeigt das Schliffbild eines Werkstücks bei welchem die Fokustemperatur mit dem Temperaturverlauf T_{hs} aus Bild 9 als Solltemperatur geregelt wurde.

Bild 11. Schliffbild für optimale Fokustemperatur

Das Ergebnis für das Einhärteprofil korrespondiert gut mit der Rechnung aus Bild 10. Die Einhärtetiefe ist praktisch konstant.

Zur Vermeidung von Anschmelzungen und zur Realisierung von konstanten Einhärtetiefen bietet sich somit die folgende Vorgehensweise an:

- Simulation mit Regelung der Temperatur unter der Oberfläche für konstanten Sollwert
- Ausgabe der bei der Simulation berechneten nichtkonstanten Oberflächentemperatur
- Benutzung der berechneten Oberflächentemperatur als Sollwert für die reale Prozesssteuerung mit dem Pyrometer.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit einer konstanten Oberflächentemperatur lassen sich zwar Anschmelzungen vermeiden, jedoch bei komplizierten Geometrien keine konstanten Einhärtetiefen garantieren. Mit Hilfe numerischer Simulationen lassen sich jedoch, im Allgemeinen nicht konstante, Temperaturverläufe für den Laserfokus berechnen. Diese können im realen Prozess als Solltemperatur einer maschinenseitigen Regelung benutzt werden,

um eine optimale Einhärtetiefe zu erreichen. Das Verfahren bietet sich also insbesondere bei komplizierten Werkstückgeometrien an.

Für die Zukunft ist auch die Berechnung und Optimierung der im Prozess entstehenden thermischen Eigenspannungen geplant.

Literatur

1. *Fuhrmann, J.; Hömberg, D.:* Numerical simulation of surface heat treatments. Num. Meth. Heat & Fluid Flow 9 (1999), S. 705-724
2. *Buchwalder, A.; Hömberg, D.; Jurke, T.; Spies, H.-J.; Weiss, W.:* WIAS, Tech. Rep 3, 2002
3. *Fuhrmann, J.; Koprucki, T.; Langmach, H.:* pdelib: An open modular tool box for the numerical solution of partial differential equations. Design Patterns. In Proceedings of the 14th GAMM Seminar Kiel on Concepts of Numerical Software, January 23-25, 1998. Kiel, 2001
4. *Levine, W. S.:* The control handbook, CRC & IEEE Press, 1996
5. *Hömberg, D.; Weiss, W.:* PID Control of Laser Surface Hardening of Steel, WIAS Preprint 876 (2003)
6. *Hömberg, D.; Volkwein, S.; Weiss, W.:* Optimal control strategies for the surface hardening of steel, to appear in: J. Physique IV