

Echtzeitfähige Laserstrahlregelung zur Kompensation thermischer Effekte

Oliver Pütsch*, Valentin Morasch*, Max Funck*, Peter Loosen***

*Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme TOS, RWTH Aachen University

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen

mailto:oliver.puetsch@tos.rwth-aachen.de

Der optische Pumpprozess führt bei Festkörperlaser zur Ausbildung der thermischen Linse (TL) innerhalb des laseraktiven Mediums und beeinflusst in Folge die Ausbreitungscharakteristik des Laserstrahls. Durch die Regelung der Strahlkaustik in Echtzeit kann der bei variierender Pumpleistung auftretende dynamische Störeinfluss kompensiert werden.

1 Einleitung

Im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ wurde am Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme ein Festkörperlaser in Slab-Geometrie für Beschriftungsaufgaben entwickelt (Abb. 1) [1][2]. Durch den planar-monolithischen Aufbau ist sein Design auf die Anwendung von vollautomatischen Montagetechniken hin optimiert (Design for Assembly) [3][4][5].



Abb. 1 Montageoptimierter Slab-Festkörperlaser

Der von der optisch induzierten Pumpleistung zwangsläufig abfallende Verlustanteil führt zur Erwärmung des Laserkristalls und zur Ausprägung eines spezifischen Brechungsindexprofils. Die in Folge auftretenden strahlformenden Eigenschaften des Kristalls lassen sich mit denen einer zylindrischen Linse annähern. Diese bewirken eine leistungsabhängige Verformung der Strahlkaustik und führen zu einer ungleichmäßigen Fokussierung während des Beschriftungsprozesses.

2 Lösungsansatz

Der Laserresonator wird sequentiell um ein zusätzliches optisches System erweitert. Durch Integration eines piezoelektrischen Linearpositionierers können die diesem System inhärenten Freiheitsgrade manipuliert und eine angepasste Strahlformung vorgenommen werden (Abb. 2). Die Einbindung des aktiven Elements in einen geschlossenen Regelkreis sowie die gleichzeitige Aufnahme der örtlichen Intensitätsverteilung durch einen CCD-Sensor ermöglicht eine autonome Regelung der Strahlkaustik in Echtzeit.

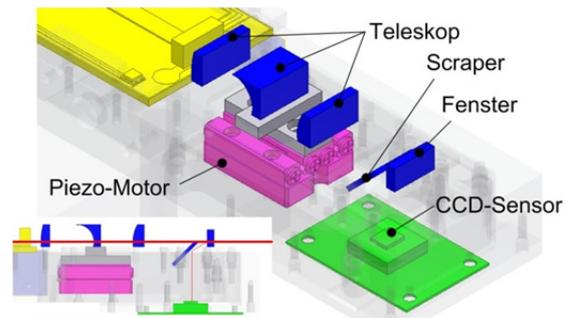


Abb. 2 Aktives System zur dynamischen Kompensation

3 Vorgehen

3.1 Thermo-optische Simulation

Die Auslegung der optischen Baugruppe basiert auf analytischen sowie numerischen Berechnungsmethoden zur thermo-optischen Simulation der thermischen Linsenwirkung. Die Finite-Elemente-Methode erlaubt die adäquate Berechnung der räumlichen Temperaturverteilung, welche im Anschluss zur Kalkulation des Brechungsindexprofils nach (1) für Nd:YAG sowie Nd:YVO₄ als Laserkristall herangezogen wird [6].

$$n(x, y, z) = n_0 + \Delta n(x, y, z)_T$$

$$\Delta n(x, y, z)_T = [T(x, y, z) - T_0] \left(\frac{dn}{dT} \right) \quad (1)$$

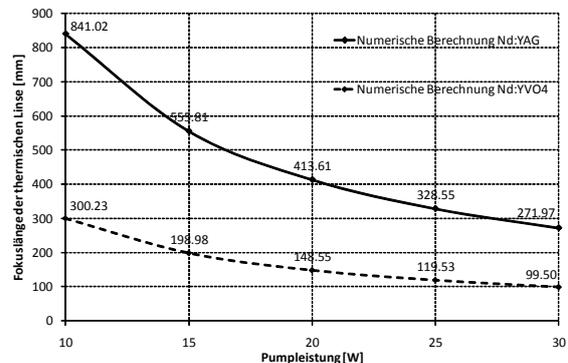


Abb. 3 Brennweite der thermischen Linse

Nach der Approximation der strahlformenden Eigenschaften mit denen einer zylindrischen Linse erfolgt die Berechnung der charakteristischen, leistungsabhängigen Brennweite mittels Ray-Tracing (Abb. 3). Im Anschluss können mit Hilfe der ABCD-Strahlpropagationsmatrizen (2) die Strahltaile w_0 auf dem Auskoppelspiegel als Indikator der thermisch induzierten Strahlverformung berechnet und das optische System ausgelegt werden (Abb. 4).

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Auskoppler}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Pr op.2}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_{TL}} & 1 \end{bmatrix}}_{\text{thermische Linse}} \dots$$

$$\dots \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Pr op.1}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Einkoppler}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Pr op.1}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_{TL}} & 1 \end{bmatrix}}_{\text{thermische Linse}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Pr op.2}} \quad (2)$$

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} \sqrt{-\left(\frac{1(A-D)}{2C}\right)^2 - \frac{B}{C}}}$$

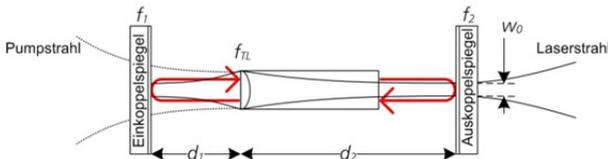


Abb. 4 Ausbildung der Strahlkaustik im Resonator

3.2 Regelung der Strahlkaustik in Echtzeit

Die Regelung der Laserstrahlkaustik erfolgt durch die deterministische Ausführung eines PID-Algorithmus zur Überwachung und Reaktion auf eine Regelabweichung. Sie ergibt sich durch die Abarbeitung bildverarbeitender Algorithmen zur Berechnung der Strahlgeometrie aus den erfassten Intensitätsmomenten sowie eines definierten Sollwerts. Die harten Echtzeitanforderungen der PID- und bildverarbeitenden Algorithmen werden durch die Verwendung eines Echtzeit-Betriebssystems erfüllt. Die Kontrolle und Manipulation der Prozessparameter wird über ein graphisches Benutzerinterface innerhalb einer zweiten, Interrupt-gesteuerten Betriebsumgebung ermöglicht. Die Virtualisierungstechnologien einer Hypervisorarchitektur erlauben dabei die simultane Ausführung beider Systeme auf einer gemeinsamen Hardwareplattform (Abb. 5).

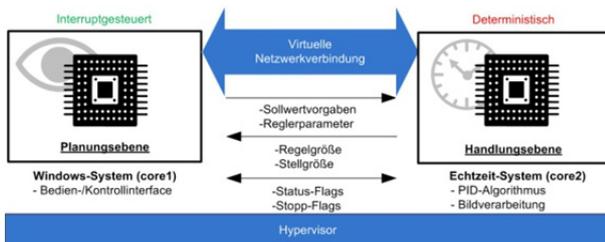


Abb. 5 Hypervisorarchitektur des Regelungssystems

4 Ergebnisse

Die thermo-optischen Simulationen führen zur konsistenten Beschreibung der Auswirkungen der leistungsabhängigen thermischen Linse und erlauben die Auslegung eines optischen Systems zur hochpräzisen Strahlformung. Die deterministische Ausführung der zeitkritischen regelungstechnischen und bildverarbeitenden Algorithmen ermöglicht eine gezielte Verschiebung des Linsenelements in Folge einer beobachteten Abweichung der Strahltaile. Der im unregelmäßigen Betrieb zu beobachtenden Zunahme der Strahltaile kann durch den Einsatz der Kompensationseinheit entgegengewirkt werden. Die Regelung erfolgt für den vorgegebenen Sollwert von $180 \mu\text{m}$ mit einer statischen Abweichung von max. $24 \mu\text{m}$ (Nd:YAG) bzw. $21 \mu\text{m}$ (Nd:YVO4) (Abb. 6). Der beim kontinuierlichen Betrieb des Lasers auftretende quasistationäre Störeinfluss der thermischen Linse kann erfolgreich kompensiert werden.

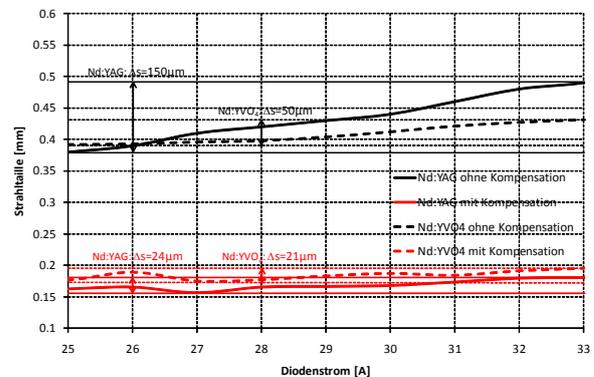


Abb. 6 Ergebnisse zur Kompensation der TL

Literatur

- [1] Schnitzler, C. *Slablaser hoher Brillanz für den Einsatz in der Mikro- und Makro-Materialbearbeitung*. RWTH Aachen : Dissertation, 2003.
- [2] Schmidt, G. *Diodengepumpte Festkörperlaser hoher Strahldichte*. RWTH Aachen : Dissertation, 2000.
- [3] M. Funck, J. Dolkemeyer, V. Morasch, P. Loosen. Design of a Miniaturized Solid State Laser for Automated Assembly. *SPIE Paper*. 2010, 7721.
- [4] R. Schmitt, A. Pavim, C. Brecher, N. Pyschny, P. Loosen, M. Funck, J. Dolkemeyer, V. Morasch. Flexibel automatisierte Montage von Festkörperlaser. *wt Werkstatttechnik online*. 2008, 11/12.
- [5] J. Dolkemeyer, M. Funck, V. Morasch. Flexible Automatisierung in der Produktion der Zukunft. *RWTH Themen*. 2010, 01.2010.
- [6] A. Gatej, U. Thombansen, P. Loosen. Kombinierte Thermo-Optische Simulation für Optische Systeme. *DGaO Proceedings, Ilmenau*. 2011.