

Kombinierte Thermo-Optische Simulation für Optische Systeme

Alexander Gatej*, Ulrich Thombansen**, Peter Loosen****

*Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme, RWTH Aachen University

**Lehrstuhl für Lasertechnik, RWTH Aachen University

***Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen

<mailto:alexander.gatej@ilt.fraunhofer.de>

Zunehmend brillantere Strahlquellen führen verstärkt zur Problematik hoher lokaler Absorption und damit zu großen Temperaturgradienten in optischen Elementen. Die Modellierung thermischer Linsenwirkung über eine Kopplung von FEM und Raytracing mittels numerischer Approximationsverfahren soll die Analyse und Kompensation thermischer Aberrationen ermöglichen.

1 Einführung

Seit einigen Jahren etablieren sich zunehmend hochbrillante Strahlquellen mit Leistungen im kW Bereich und steigern das Potenzial zahlreicher Anwendungen in der Lasermaterialbearbeitung, wie das Schneiden und Schweißen [1]. Die Nutzung neuartiger Quellen wird derzeit durch Defizite in der Leistungsfähigkeit optischer Systeme beschränkt, da sich durch höhere Energiekonzentrationen auf kleineren optischen Flächen kritische Temperaturverteilungen ausbilden. Die charakterisierenden großen Temperaturgradienten führen sowohl bei transmittierenden als auch bei reflektierenden optischen Systemen zu einer signifikanten Verschlechterung der Abbildungsqualität [2]. Während die thermische Linsenwirkung bei der Auslegung von Resonatoren bereits seit vielen Jahren untersucht und berücksichtigt wird, war dies bisher für durch vergleichsweise geringe Absorptionsgrade charakterisierte resonatorexterne optische Systeme nicht im selben Maße erforderlich.

Derzeitige kommerziell erhältliche Raytracing-Software bietet nur eingeschränkt die Möglichkeit, inhomogene thermische und mechanische Einflüsse bei der Optikauslegung und Optimierung zu berücksichtigen. Eine Kompensation dieser Effekte erscheint nur möglich, wenn eine konsistente Beschreibung auf Basis gekoppelter Simulationen erreicht wird.

2 Design und Simulation thermischer Effekte

Die realisierte Simulationskette erweitert ein bestehendes Raytracing-Modell um die Möglichkeit, inhomogene Änderungen des Brechungsindex auf Basis thermischer FEM Simulationen zu berücksichtigen. Dabei wird das System zunächst unter Vernachlässigung der Thermik ausgelegt und die Absorptionsverteilung im Medium über Detektoren lokal aufgelöst simuliert. Diese Verteilung dient der anschließenden thermischen Simulation als Randbedingung. Da die simulierte Temperatur an diskreten Punkten berechnet wird, während der Algorithmus zur Auswertung von GRIN-Profilen im Ray-

tracing nahezu kontinuierliche Werte für Temperatur und Gradienten benötigt, sind geeignete Approximationsverfahren notwendig, welche ein physikalisch korrektes und numerisch stabiles Ergebnis liefern.

3 Verifikation am Beispiel eines Laserkristalls

Als erster Anwendungsfall wird ein quaderförmiger Laserkristall betrachtet. Dieses bekannte und verstandene Beispiel bietet die Möglichkeit zur Verifikation der Funktionsweise dieser Simulationskette durch einen Vergleich mit analytischen Abschätzungen für die Brennweite eines optischen Elements unter thermischer Belastung [3]. Die dabei genutzte Kristallgeometrie bietet zudem den Vorteil, dass ein regelmäßiges FEM-Gitter verwendet und damit eine kubische Splineinterpolationen zur Approximation genutzt werden kann.

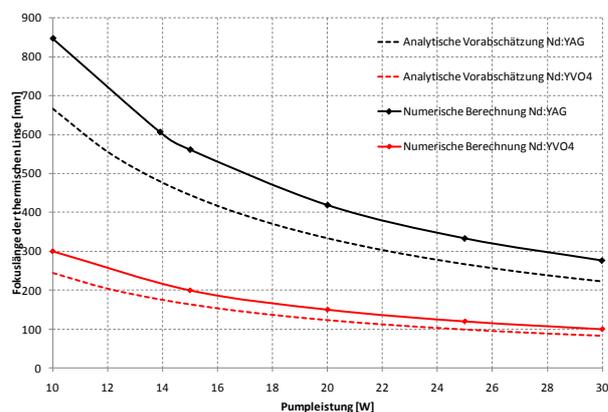


Abb. 1 Vergleich zwischen Analytik und Numerik

Abb. 1 zeigt die analytische und numerische Auswertung der Fokallänge zweier Materialien. Bei einem tendenziell ähnlichen Kurvenverlauf zeigt sich, dass die numerische Lösung größere Fokusabstände und damit längere Brennweiten errechnet. Diese Abweichung könnte sich durch die vereinfachenden Annahmen des analytischen Modells erklären lassen, Wärmeleitung nur in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung zu erlauben.

Eine Wärmeabfuhr in Strahlpropagationsrichtung bleibt unberücksichtigt, so dass mit steigender Absorption ein zunehmender Fehler auftritt. Auf Basis dieser Berechnungen konnte durch geeignete Regelungstechnik eine Einheit zur Stabilisierung der Fokusslage ausgelegt und realisiert werden [4].

4 Untersuchung koaxialer Prozessbeobachtung

Obwohl dieser Ansatz erste belastbare Ergebnisse liefert, ist die Beschränkung auf äquidistante FEM-Gitter für den Einsatz in optischen Systemen unzureichend. In vielen Fällen mit praktischer Relevanz treten asymmetrische Temperaturverteilungen in den Vordergrund, die sich in geometrisch komplexen Bauteilen ausbilden. Als Anwendungsbeispiel [2] dient eine transmittierende Zink-Selenid Optik zum Laserstrahlschneiden (vgl. Abb. 2). Seitens der FEM-Simulation entsteht daraus die Notwendigkeit, die thermo-mechanischen Randbedingungen durch eine geometrie- und temperaturangepasste Vernetzung der Bauteile abzubilden. Die Verwendung eines so ermittelten FEM-Temperaturprofils für das Raytracing wird in einem ersten Schritt durch eine analytische Ersatzmodellierung ermöglicht. Ein manuell an die simulierte Temperaturverteilung angefüttetes analytisches Modell erlaubt die Ermittlung des lokalen Brechungsindex, der für das Raytracing benötigt wird. Dieser Ansatz ermöglicht die Simulation der Abbildungsleistung des erwärmten Systems und steht im Einklang mit der experimentell ermittelten Verschiebung der Fokusslage je nach Strahlparametern von bis zu 19 mm.

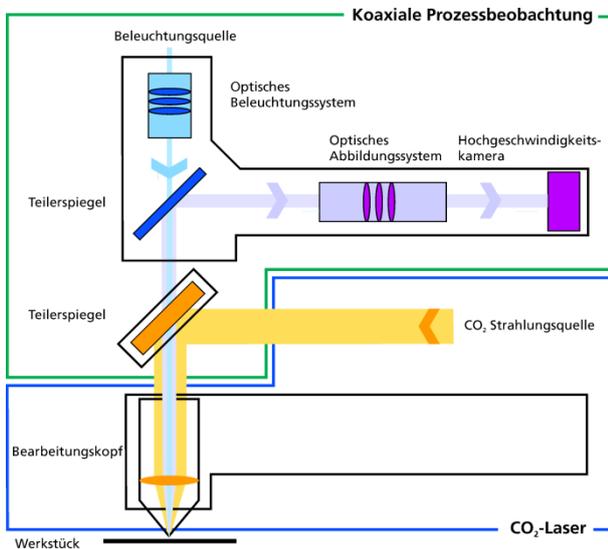


Abb. 2 Kopplung von Abbildungs- und Bearbeitungsstrahlung

Ist die De-Fokussierung des in Abb. 2 gezeigten Systems durch Justage korrigiert, verbleiben Aberrationen, die sich vor allem auf die Prozessbeobachtung negativ auswirken. Der Vergleich der Bilder in Abb. 3 zeigt diese Auswirkung anhand der

Simulation des abbildenden optischen Systems am Beispiel einer Schneidfuge.

Die Verringerung der Kantenschärfe erschwert die Extraktion qualitätsrelevanter Merkmale aus den Messsignalen und kann so zu teilweise fehlerhaften Prozessdiagnosen führen.

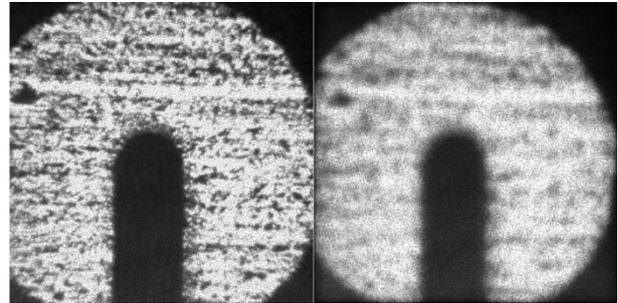


Abb. 3 Simulation der Prozessbeobachtung einer Schneidfuge mit kalter (links) und erwärmter Bearbeitungslinse (rechts)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Notwendigkeit zur Kopplung thermischer und optischer Simulation steigt zunehmend in vielen Bereichen der Lasermaterialbearbeitung mit brillanten Laserquellen, um thermische Effekte in der Designauslegung berücksichtigen und kompensieren zu können. Besonderer Forschungsbedarf besteht insbesondere in der Approximation der 3D-FEM-Ausgangsdaten zur Einhaltung einer mindestens C¹-stetigen Beschreibung im Raytracing.

Die bisher umgesetzte Splineinterpolation für regelmäßige 3D-FEM-Netze sowie die anschließende Erweiterung durch manuelle Funktionsfits bestätigen die Validität der konzipierten Vorgehensweise. Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich mit einer Verallgemeinerung der Approximationsansätze. Insbesondere ist eine automatisierte, mehrfach stetig differenzierbare Approximation von Datenpunkten auf unregelmäßigen Gittern notwendig, um die Simulationskette für unterschiedliche Lastfälle gleichermaßen effektiv und effizient nutzen zu können.

6 Referenzen

- [1] D. Petring et al., "The relevance of brightness for high power laser cutting and welding," *Proc. of ICALEO*, Temecula, CA, USA: 2008.
- [2] C. Brecher, Hrsg., „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer,“ Springer, 2011.
- [3] W. Koechner, „Solid-State Laser Engineering,“ Springer, 2006.
- [4] O. Pütsch et al., "Echtzeitfähige Laserstrahlregelung zur Kompensation thermischer Effekte," *DGaO Proceedings*, Ilmenau: 2011.