

Auslegungsmethodik für Kunststoffoptiken in Laseranwendungen

J. Hofmann*, T. Bonhoff*, J. Stollenwerk*, P. Loosen*

*Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme, RWTH Aachen University

<mailto:joerg.hofmann@tos.rwth-aachen.de>

Bei der Verwendung von Kunststoffoptiken in Laseranwendungen treten signifikante thermooptische Effekte bereits bei wenigen Watt Laserleistung auf, welche die Abbildungseigenschaften negativ beeinflussen. In diesem Beitrag wird eine Methodik zur gezielten Kompensation der auftretenden thermooptischen Effekte mittels einer betriebspunktgenauen Auslegung der Optik während des Designprozesses und eine dazugehörige Sensitivitätsanalyse vorgestellt.

1 Einführung

Aufgrund steigendem Kostendruck im Bereich der Lasermaterialbearbeitung gibt es zunehmend Bestrebungen, Glasoptiken durch Kunststoffoptiken zu ersetzen. So bieten Kunststoffoptiken neben erhöhten Designfreiheitsgraden und einer Gewichtsreduktion die Möglichkeit der kostengünstigen Herstellung mittels Spritzguss [1]. Allerdings treten aufgrund größerer Absorption bei Kunststoffoptiken im Vergleich zu Glas stärkere thermische Effekte auf. Hierdurch sind aktuell die Einsatzmöglichkeiten von Kunststoffoptiken auf geringe Laserleistungen (<1 W) beschränkt. Eine gezielte Kompensation der auftretenden thermooptischen Effekte ist mit einer betriebspunktgenauen Auslegung der Optik während des Designprozesses möglich. In diesem Beitrag wird zugehörig zu einem neuartigen Ansatz zur Optimierung der Form von Kunststoffoptiken eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Während der Optimierung findet eine Kopplung zwischen optischem Raytracing und Finite-Elemente-Methode (FEM)-Simulationen statt [2]. Eine Validierung des Ansatzes erfolgt am Beispiel einer kommerziell verfügbaren, plankonvexen Sammellinse aus PMMA.

2 Vorgehensweise

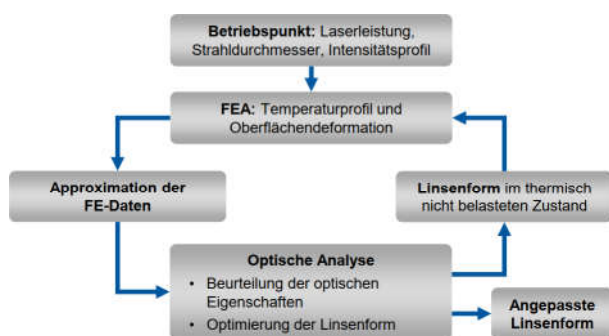


Abb. 1 Vorgehensweise der iterativen Optimierung der Linsenform für einen bestimmten Betriebspunkt [3].

Die Vorgehensweise zur betriebspunktgenauen Auslegung ist in **Abb. 1** dargestellt. Mithilfe der Kennzahlen des Betriebspunktes (Laserleistung, Strahldurchmesser, Intensitätsprofil) werden zu-

nächst das Temperaturprofil und die daraus resultierende Oberflächendeformation berechnet. Anschließend werden die Finite-Elemente (FE)-Daten approximiert, die Optik bezüglich ihrer optischen Eigenschaften analysiert und schließlich die Linsenform mittels Raytracing optimiert. Die optimierte Linsenform wird erneut an die Finite-Elemente-Analyse (FEA) übergeben, bis sich die Linsenform nach mehreren Iterationen nicht mehr verändert. Für eine detailliertere Beschreibung sei auf [3] verwiesen.

3 Validierung: PMMA-Asphäre

Mittels des oben beschriebenen Ansatzes wird eine asphärische Linse aus PMMA mit einer Brennweite von $f = 100$ mm hinsichtlich thermooptischer Effekte optimiert. Optimiert werden hierbei der Linsenradius der konvexen Fläche R_1 und die Asphärenkoeffizienten vierter und sechster Ordnung (α_4 und α_6). Als Strahlquelle wird ein Laser mit gaußförmigem Intensitätsprofil, einer Leistung von $P = 10$ W und einem Strahldurchmesser von $D = 5,5$ mm gewählt.

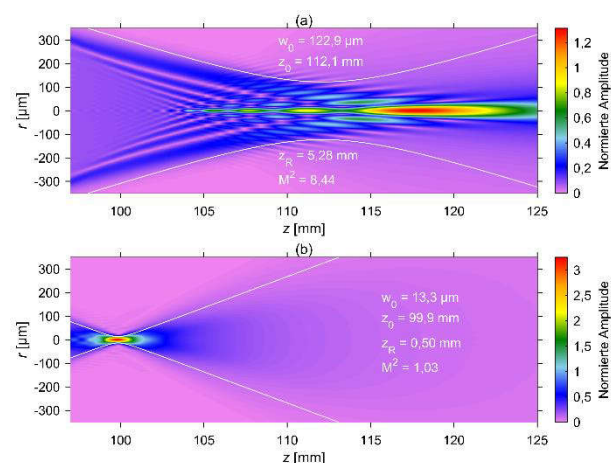


Abb. 2 Strahlkaustiken mit a) nicht optimierter und b) optimierter Linsenform. w_0 : Tailenradius, z_0 : Position der Strahltaile, z_R : Rayleighlänge, M^2 : Beugungsmaßzahl [3].

Die wellenoptisch simulierten Strahlkaustiken für die optimierte und die nicht optimierte Linsenform sind im Vergleich in **Abb. 2** dargestellt. In **Tab 1** sind die Parameter der originalen und der optimierten Linsenform gegenübergestellt.

Parameter	Original	Optimiert
R_1 [mm]	49,784	41,673
α_4 [mm ⁻⁴]	$4,278 \cdot 10^{-7}$	$-9,483 \cdot 10^{-5}$
α_6 [mm ⁻⁶]	$2,833 \cdot 10^{-11}$	$1,958 \cdot 10^{-6}$

Tab 1: Parameter der originalen und der optimierten Linsenform [3].

Während ohne Optimierung deutliche, durch thermische Aberrationen hervorgerufene Oszillationen in der Amplitude des elektrischen Feldes beobachtet werden können, sind die thermischen Aberrationen für den Fall der optimierten Geometrie korrigiert und der Strahl mit $M^2 = 1,03$ nahezu beugungsbegrenzt. Ohne Optimierung wird außerdem eine Verschiebung des Fokus um 12,1 mm bezüglich der Sollposition ($z_0 = 100,0$ mm) beobachtet. Der Taillenradius w_0 kann durch die Optimierung auf weniger als ein neuntel der Ausgangsgröße verkleinert werden.

In der Praxis ist zum Erhalt eines beugungsbegrenzten Strahls eine möglichst exakte Kenntnis der Materialparameter und des Betriebspunkts erforderlich. Um den Einfluss möglicher Abweichungen der realen Versuchs- und Materialparameter von den der Simulation zu Grunde liegenden Werten zu untersuchen wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (siehe **Abb. 3**). Die Versuchs- und Materialparameter werden um jeweils fünf Prozent vergrößert bzw. verkleinert.

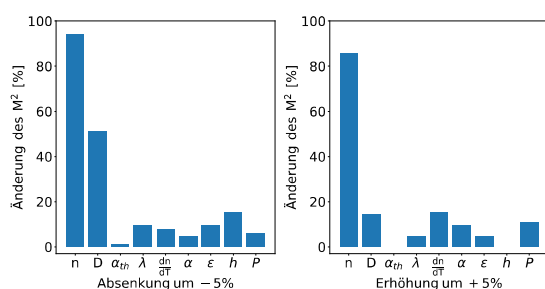


Abb. 3 Sensitivitätsanalyse. n : Brechungsindex, D : Strahldurchmesser, α_{th} : thermischer Ausdehnungskoeffizient, λ : Wärmeleitfähigkeit, dn/dT : thermooptischer Koeffizient, α : Absorptionskoeffizient, ϵ : Emissionsgrad, h : Wärmeübergangskoeffizient, P : Laserleistung.

Aus **Abb. 3** wird ersichtlich, dass Änderungen des Brechungsindex zu einer deutlichen Zunahme der Beugungsmaßzahl um bis zu circa 94% führen. Die Ursache hierfür ist, dass die Form der Asphäre nur bei dem für sie ausgelegten Brechungsindex eine beugungsbegrenzte Fokussierung ermöglicht. Neben einer Zunahme der Beugungsmaßzahl führt

die beschriebene Änderung des Brechungsindex außerdem zu einer Fokusverschiebung von bis zu 22,0 mm. Des Weiteren wird deutlich, dass die Optik auf eine Vergrößerung bzw. eine Verkleinerung desselben Parameters unterschiedlich sensitiv reagiert. So führt eine Verkleinerung des Strahlradius um 5% zu einer Erhöhung der Beugungsmaßzahl um 50,1%, während eine Vergrößerung zu einer Zunahme der Beugungsmaßzahl um lediglich 14,4% führt. Robust ist das System stattdessen gegen eine Variation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Eine Variation der Laserleistung ist in etwa analog zu einer Variation des Absorptionskoeffizienten. So führt eine Vergrößerung beider Größen jeweils zu mehr Energieeinbringung in das Linsenmaterial und somit zu einer ähnlichen Änderung der Beugungsmaßzahl.

Eine zusätzliche Variation der Umgebungstemperatur um $\pm 5\%$ hat bei der betrachteten Genauigkeit nahezu keine Auswirkungen auf die Beugungsmaßzahl.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden die kritischen Eingangsgrößen der Optimierung einer PMMA-Asphäre mittels einer Sensitivitätsanalyse identifiziert.

Zukünftig ist die Fertigung der optimierten Linsen-geometrie mittels Spritzgussverfahren in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) geplant. Um beim Spritzguss auftretende Effekte wie Verzug und Schwindung zu kompensieren, werden Prozesssimulationen durchgeführt und die dadurch gewonnenen Erkenntnisse bereits im Design berücksichtigt.

5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der AiF (Vorhaben Nr.: 20797 N) für die im Rahmen des Projekts „KOptLas“ erhaltene Unterstützung.

Literaturverzeichnis

- [1] Alexandre Atilo Romani De Pontes, „Silicone Elastomers - Clear as Glass“, *SAE International* (2012).
- [2] T. Bonhoff, L. Büsing, J. Stollenwerk und P. Loosen, „Modeling of optical aberrations due to thermal deformation using finite element analysis and ray-tracing“ in *Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI*: SPIE (2015), 96261V.
- [3] T. Bonhoff, „Multiphysikalische Simulation und Kompensation thermooptischer Effekte in Optiken für Laseranwendungen“. Dissertation, Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme, RWTH Aachen, 2019.