
REFLEKTORBASIERTE LASER-LICHTMODULE ALS ZUSATZFERNLICHT FÜR DIE FAHRZEUGBELEUCHTUNG

Lachmayer, R.¹, **Wolf, A.**¹, Danov, R.¹, Kloppenburg, G.¹.

¹) Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität
Hannover, Deutschland
wolf@ipeg.uni-hannover.de

ABSTRACT

Helle, weiße LEDs kommen zunehmend in Neuentwicklungen von Fahrzeugscheinwerfern als Ersatz für klassische Xenon- und Halogen-Lichtquellen zum Einsatz. Einen nächsten Schritt in dieser Entwicklung stellen Lichtquellen auf Basis von Laserdioden in Verbindung mit „Remote Phosphor“ (laseraktiviertem Leuchtstoff) zur Frequenzkonversion dar. Dieser Ansatz bietet insbesondere im Hinblick auf Leuchtdichte, Effizienz und Designflexibilität ein hohes Potenzial. In Verbindung mit Laserdioden können kleinere strahlformende Elemente zum Einsatz kommen, so dass neue Konzepte für adaptive Scheinwerfersysteme möglich werden.

Zur Verbesserung der Fahrbahnausleuchtung wird das klassische Fernlicht in vielen Scheinwerfersystemen durch ein zusätzliches Lichtmodul ergänzt. Diese Funktion wird mit einer laserbasierten Lichtquelle platzsparend umgesetzt.

Aufbauend auf Voruntersuchungen werden verschiedene Designvarianten präsentiert. Der Fokus wird hierbei auf die Umsetzung reflektorbasierter Lichtmodule gelegt, welche sowohl mit Hilfe konventioneller als auch generativer Fertigungsverfahren hergestellt werden. Die Konstruktion mit einem fernaktivierten Leuchtstoff ermöglicht dabei durch die Trennung von Lichterzeugung und Frequenzkonversion ein verbessertes Thermomanagement der Systeme. Die einzelnen Prototypen werden hinsichtlich ihrer lichttechnischen Parameter untersucht und verglichen. Der Einsatz im Fahrzeug wird durch Integration eines geeigneten Systems gezeigt und untersucht.

Schlagwörter: Laserdioden, Remote Phosphor, Zusatzfernlicht, Konzeptstudien



1 MOTIVATION

Im Zuge der Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektrofahrzeuge gewinnt auch die Effizienzsteigerung der dort eingesetzten elektrischen Verbraucher an immer größerer Bedeutung. In der Fahrzeuglichttechnik wird dies unter anderem durch den Einsatz energieeffizienter LEDs umgesetzt. Mit dem i8 bietet BMW nun als erster Fahrzeughersteller ein auf Laserdioden basiertes Lichtsystem in einem Serienfahrzeug an [1]. Auch andere Hersteller haben Scheinwerfer mit Lasern als Lichtquelle angekündigt oder bereits präsentiert [2], [3]. Ähnlich dem Funktionsprinzip der meisten weißen LEDs [4] wird hier eine blaue Laserdiode (450 nm) in Kombination mit einem Leuchtstoff eingesetzt. Die gerichtete Abstrahlung von Laserdioden ermöglicht es, Lichterzeugung und Farbkonversion zu trennen und damit optimierte Kühlkonzepte einzusetzen [5]. Durch die sehr kleine Lichtemissionsfläche der Dioden lassen sich auf dem Leuchtstoff hohe Energiedichten erzeugen, so dass die optischen Elemente, welche die Lichtverteilung bestimmen, besonders klein ausfallen können. Gleichzeitig ist dadurch die Möglichkeit für neuartige Designs für Scheinwerfer und Reflektoren gegeben. Als erster Anwendungsfall sollen im Folgenden Konzepte für ein statisches Zusatzfernlicht untersucht und bewertet werden. Bei der Verwendung eines Bi-Xenon-Scheinwerfers mit Halogen-Zusatzfernlicht lässt sich bei einem als Beispiel vermessenen Serienscheinwerfer eine Vergrößerung der Sichtweite um etwa 17 % feststellen. Hier soll durch den Einsatz von Halbleiterdioden eine weitere Steigerung von Leuchtweite oder Effizienz erreicht werden. Außerdem wird die Eignung von Rapid Prototyping-Bauteilen als optische Komponenten anhand einer in das Zusatzfernlicht integrierten Kollimationslinse analysiert.

2 LASERBASIERTE ZUSATZFERNLICHTMODULE – KONZEPTE UND AUSWERTUNG

2.1 UMSETZUNGSKONZEPTE

Für die Umsetzung einer weißen Lichtquelle, aufbauend auf dem Konzept des Remote Phosphor, ergeben sich diverse Möglichkeiten. Für den hier verfolgten Ansatz mit einem Reflektor sind unterschiedliche Arten der Leuchtstoffanregung denkbar. Die Konzepte sind in Abbildung 1 dargestellt und lassen sich zunächst nach der Art einteilen, wie der Leuchtstoff angestrahlt wird. Bei den mit Rückprojektion bezeichneten Varianten wird ein Leuchtstoff im Brennpunkt des Reflektors so angeregt, dass seine mit einem Lambertstrahler vergleichbare Abstrahlung vollständig den Reflektor trifft. Auf diese Weise wird das gesamte erzeugte Licht über die Funktionsflächen umgelenkt. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, die Dioden so anzuordnen, dass bei einer Beschädigung der Phosphorschicht der komplette Laserstrahl zurück zur Diode reflektiert wird. Auf diese Weise kann der Austritt gefährlicher Laserstrahlung aus dem Reflektor verhindert werden. Möglich ist sowohl die Konstruktion eines klassischen Reflektorsystems als auch die eines Projektionssystems, welches zusätzlich eine Linse nutzt.

Die mit Frontprojektion bezeichneten Systeme basieren auf dem gleichen Prinzip mit der Ausnahme, dass der Phosphor von vorne angestrahlt wird. Der Vorteil der Frontprojektion gegenüber der Rückprojektion ist unter anderem die einfachere Platzierung des Leuchtstoffs. Da die Flächen hinter dem Phosphor nicht genutzt werden, kann der Reflektor so gefertigt

werden, dass sich der Leuchtstoff an dessen hinterem Ende befindet. Außerdem werden hier die wesentlich größeren vorderen Reflektorflächen zur Erzeugung der Lichtverteilung verwendet, während bei der Rückprojektion eine sehr kleine Fläche nahe des Leuchtstoffs dafür verantwortlich ist. Auf diese Weise kann bei gleicher Abbildungsleistung ein verglichen mit der Frontprojektion kleineres optisches System genutzt werden. Von Nachteil ist, dass bei Frontprojektionssystemen ein Teil des Lichts direkt aus dem Modul austritt ohne vorher eine reflektierende Fläche getroffen zu haben. Für die Lasersicherheit müssen außerdem zusätzliche Vorkehrungen getroffen werden. Beispielsweise lässt sich ein Absorber auf der gegenüberliegenden Seite des Reflektors platzieren, welcher das Laserlicht im Falle eines Versagens der Phosphorschicht absorbiert.

Mit der dritten dargestellten Form des Modulaufbaus kann das Laserlicht an einer beliebigen anderen Stelle im Fahrzeug erzeugt werden. Über einen Lichtwellenleiter wird es in das Zusatzfernlichtmodul geleitet und in weißes Licht gewandelt. Die erste dieser Varianten verwendet eine Optik am Faserausgang um das Licht auf der Leuchtstoffschicht gebündelt auftreffen zu lassen während die zweite ein mit Leuchtstoff beschichtetes Faserende vorsieht, aus dem dann direkt umgewandeltes Licht austritt. Die Verringerung des Systemwirkungsgrades durch die Faserkopplung muss in beiden Fällen berücksichtigt werden.

Mit Ausnahme der letztgenannten Lichtleitervariante ist für alle Konzepte ein reflektiver Einsatz der Leuchtstoffschicht vorgesehen. Das bedeutet, dass das Substrat auf einer reflektierenden Oberfläche aufgebracht ist. Derart aufgebaute Systeme können einen wesentlich größeren Teil des umgewandelten Lichts nutzen als es bei der Verwendung eines transmissiven Aufbaus der Fall ist. Bei Letzterem wird das umgewandelte Licht in alle Richtungen abgestrahlt, unter anderem auch zurück zur Diode, so dass nur ein Teil des Lichts genutzt werden kann.

Die nachfolgend vorgestellten Prototypen werden gemäß dem Prinzip der Frontprojektion aufgebaut. Dieses Konzept vereint einen guten Wirkungsgrad mit einem einfachen Aufbau, da nur wenige strahlformende und –lenkende Teile zum Einsatz kommen und der Leuchtstoff direkt an der Rückseite des Reflektor montiert werden kann. Zudem ist eine Wirkungsgradsteigerung über die Integration einer weiteren Linse möglich, was in Abschnitt 2.2 diskutiert wird.

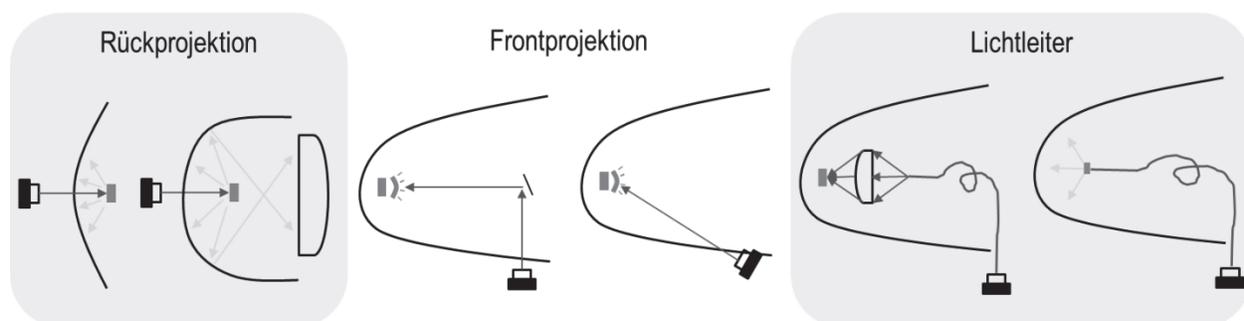


Abbildung 1 - Reflektorbasierte Konzepte für die Anwendung von Remote Phosphor

2.2 REALISIERTE KONZEPTE

Die beiden Designvarianten A und B basieren auf [6], [7], in denen jeweils eine Laserdiode Osram PL-TB450B [8] zum Einsatz gekommen ist. Um sowohl die Lebensdauer als auch die Lichtleistung zu erhöhen, werden für die nachfolgenden Konzepte jeweils vier Dioden eingesetzt. Hierbei kann die Leistung jeder einzelnen Diode reduziert werden, was deren Lebensdauer erhöht [9] und die Anforderungen an das Kühlsystem verringert.

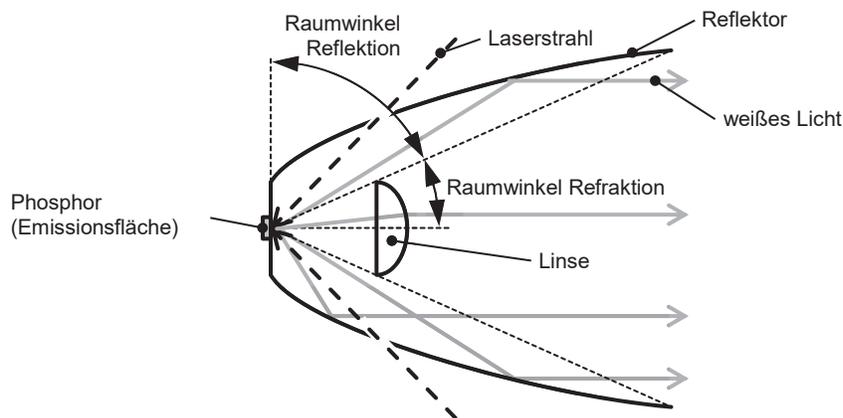


Abbildung 2 - Optisches Konzept der Laserscheinwerfer nach [7]

Das optische Konzept beider Varianten ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Laserstrahl wird jeweils von vorne auf die Leuchtstoffschicht im Brennpunkt des Reflektors gerichtet (Frontprojektion). Alle Lichtstrahlen, welche den Leuchtstoff innerhalb des Raumwinkels Reflektion verlassen, treffen auf einen Aluminium-Reflektor. Dieser erzeugt die horizontal ausgedehnte und vertikal begrenzte Lichtverteilung des Zusatzfernlichts und besteht aus mehreren Paraboloid-Segmenten. Um eine möglichst konzentrierte Lichtverteilung im Hotspot zu ermöglichen, ist zusätzlich eine Linse in den Reflektor eingesetzt. Diese wird so platziert und ausgelegt, dass alle Lichtstrahlen abgelenkt werden, die den Reflektor direkt verlassen würden ohne eine der Wandflächen zu treffen. Dadurch wird der Wirkungsgrad des Systems merklich erhöht.

2.2.1 Designvariante A

Die Konstruktion von Variante A ist so ausgeführt, dass die Laserdioden jeweils außen am vorderen Reflektorrand angeordnet sind und von dort direkt nach innen auf die Phosphorschicht strahlen (siehe Abbildung 3). Da sich fertigungsbedingt sowohl bei den Dioden selbst als auch bei den Halterungen und Reflektorteilen Abweichungen ergeben können, die zu einer unerwünschten Veränderung der Lichtverteilung führen, muss jede der vier Laserdioden und separat justiert werden. Jede der Dioden besitzt ein eigenes Peltier-Element einschließlich Kühlkörper, das sich bei Justage mitbewegt.

Der Reflektor besteht aus 9 Paraboloid-Segmenten, welche die horizontal breite Lichtverteilung erzeugen. Die Linse in der Mitte des Reflektors ist als Kollimator ausgeführt und erhöht die

Beleuchtungsstärke im Hotspot. Als Leuchtstoff kommt ein Pulver zum Einsatz, welches thermisch und mechanisch an einen Kupferträger angebunden wird. Bedingt durch die radial montierten Dioden inklusive Kühlsystem benötigt das hier gezeigte System für die Integration in einen Scheinwerfer relativ viel Bauraum. Zudem hat sich das Kühlsystem als zu ineffektiv erwiesen. Durch den begrenzten Bauraum im Scheinwerfer ist eine Verbesserung dieses Ansatzes kaum möglich.

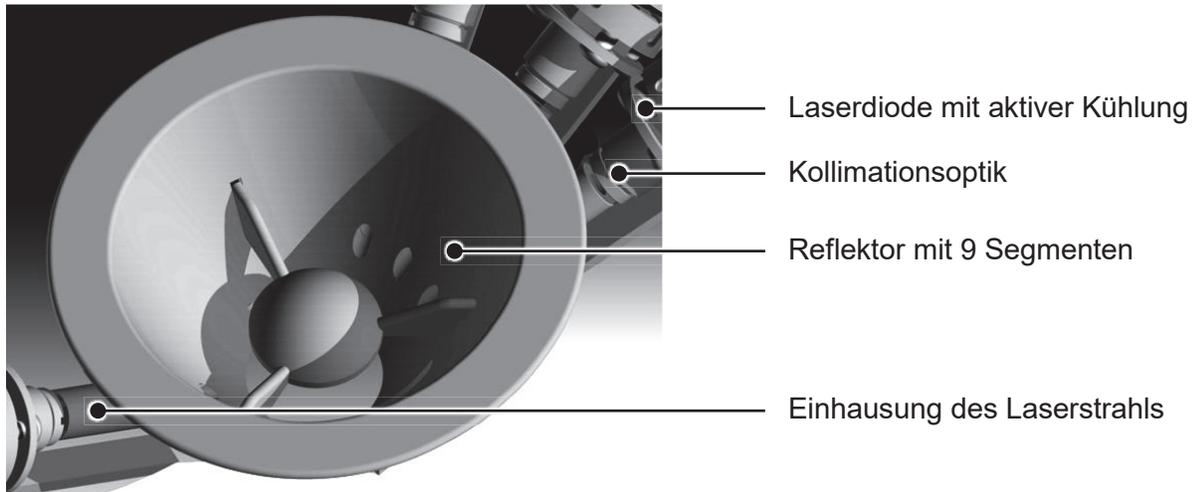


Abbildung 3 - CAD-Modell der Designvariante A mit zusätzlicher Linse nach [7]

2.2.2 Designvariante B

Als Optimierung der Nachteile von Variante A werden alle vier Laserdioden in einem Block zusammengefasst, in welchem sie der Fertigungstoleranz entsprechend, ohne eine Justage vorzunehmen, montiert werden können (Abbildung 4). Gegenüber der vorangegangenen Version A wird der benötigte Bauraum deutlich verringert und das System auf eine zentrale Kühlvorrichtung, realisiert mit Lüfter und Kühlkörper, reduziert. Die Fokussierung des Laserlichts erfolgt wie bei den vorangegangenen Varianten über eine Kollimationsoptik je Diode, die Einstellung der Strahlrichtung über vier Planspiegel, welche radial um den Reflektor angeordnet sind.

Der Scheinwerfer der Variante B besteht aus 25 Paraboloid-Segmenten, welche eine gegenüber Variante A nochmals breitere Lichtverteilung erzeugen. Die Linse wird unverändert übernommen. Der eingesetzte Leuchtstoff wurde speziell hierfür von der Firma Intematix zur Verfügung gestellt. Durch die Anbindung an einen Aluminiumträger ist die Wärmeabfuhr verbessert, was eine höhere Energiedichte des Laserstrahls auf dem Leuchtstoff ermöglicht.

Weitere Vorteile dieses Systems sind der einfachere Wechsel einzelner Komponenten sowie eine deutlich elegantere Kabelführung. Die erhöhte mechanische Stabilität des Aufbaus verringert die Gefahr der Dejustage von optischen Komponenten im Betrieb, was zu einer veränderten Lichtverteilung aber auch zum Austritt gefährlicher Laserstrahlung aus dem System führen kann.

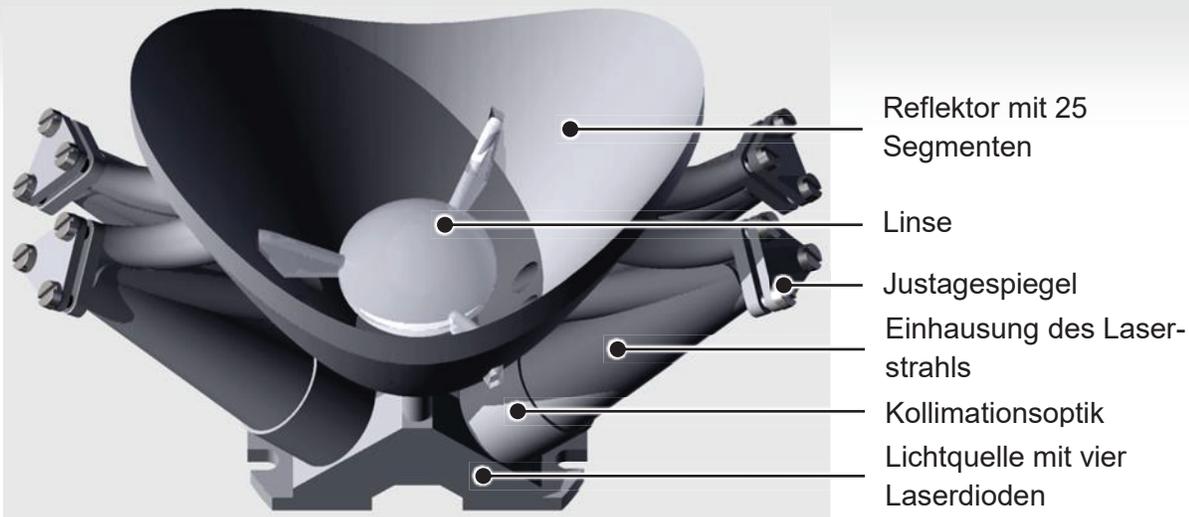


Abbildung 4 - CAD-Modell der Designvariante B (Kühlkörper nicht dargestellt)

2.3 LICHTVERTEILUNGEN UND AUSWERTUNG

Die Vermessungen der Lichtverteilungen werden mit einem Goniophotometer GO-H 1400 der Firma LMT durchgeführt. Für eine normgerechte fahrzeugtechnische Messung wird ein Messkopf in 25 m Entfernung von der Lichtquelle verwendet.

2.3.1 Auswertung Variante A

Der in Abbildung 3B dargestellte Reflektor wird sowohl mit als auch ohne die Linse in der Reflektormitte vermessen. Um die hier eingesetzte Leuchtstoffschicht nicht zu beschädigen werden die Dioden mit einem reduzierten Strom von 450 mA betrieben. Bei der Messung mit eingesetzter Linse werden maximale Beleuchtungsstärken von 83,75 lx erreicht, während die Messung ohne Linse ein Maximum von 73,71 lx ergibt. Deutlich erkennbar ist der Einfluss der Linse, die das ansonsten für die Lichtverteilung nicht genutzte Licht in Richtung des Hotspots ablenkt.

2.3.2 Auswertung Variante B

Die Variante B wird bei einem Diodenstrom von 600 mA betrieben und entsprechend der obigen Versuchsbeschreibung auf einem Goniometer vermessen. Zum Vergleich wird hierbei sowohl eine HSC-gefräste PMMA-Linse eingesetzt als auch eine im Rapid Prototyping (RP) gefertigte.

Die Vermessung der Lichtverteilung mit PMMA-Linse ergibt einen Hotspot mit 114,2 lx, was gegenüber der Variante A eine Verbesserung um 30,6 lx bedeutet.

Die Rapid Prototyping-Linse wird auf einem Objet 30pro im Multi-Jet Modeling-Verfahren hergestellt. Hierbei wird das UV-aushärtende transparente Material VeroClear™ schichtweise über Druckköpfe ausgebracht und mittels UV-Licht ausgehärtet. Die vertikale Schichtstärke dabei beträgt 16 µm, die horizontale Auflösung nominell 600 dpi (6,56 µm). Bedingt durch die UV-Absorption des Materials ist auch die Transmission von blauem Licht eingeschränkt. Sie

beträgt für eine 29,1 mm starke Probe einschließlich Fresnel-Reflexion an den Grenzflächen bei 450 nm fast 60 %. Je nach Grad der UV-Bestrahlung lässt sich diese jedoch erhöhen. Das Material Veroclear™ weist eine Brechzahl $n_e = 1,533$ bei einer Abbe'schen Zahl v_e von 46,202 auf. Diese Werte liegen jeweils zwischen denen von PMMA und PC [10], [11].

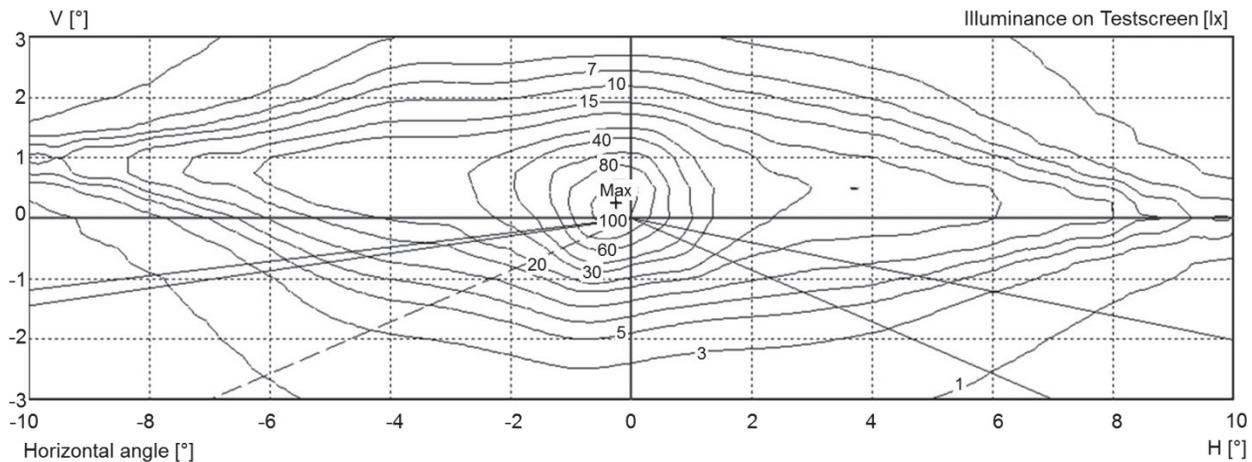


Abbildung 5 - Messergebnis der Lichtverteilung des Zusatzfernlichtmoduls in 25 m Entfernung mit PMMA-Linse, Maximum bei 114,2 lx

Die eingesetzte Linse verfügt über eine Planfläche, welche dem Leuchtstoff zugewandt ist, und eine asphärische auf der gegenüberliegenden Seite. Unpoliert weist die asphärische Fläche nahe deren Scheitel einen arithmetischen Mittenrauwert R_a in radialer Richtung von $1,14 \mu\text{m}$ auf. Bei der polierten Linse ergibt sich $R_a = 0,54 \mu\text{m}$, was bereits nahe des gewählten Messbereichs des eingesetzten konfokalen Mikroskops von $0,5 \mu\text{m}$ liegt. Aufgrund der Streuung der Rauheitswerte wird jeweils der Mittelwert aus drei Messungen an verschiedenen Stellen gebildet.

Da der eingesetzte 3D-Drucker Planflächen in guter Qualität erzeugt, wird bei der Rückseite der Linse auf eine Politur verzichtet. Eine partielle Wellenstruktur zeichnet sich hier jedoch durch die Verstopfung einzelner Düsen des Druckers ab. Die RP-Linse wird mehrere Stunden mit UV-Licht nachbehandelt. Dennoch ist ihr Transmissionsgrad gegenüber der aus PMMA reduziert.

Ausgerüstet mit den verschiedenen Linsen wird in einer weiteren Messreihe die Lichtverteilung der Scheinwerfervariante B betrachtet. Die Geometrie der Linse ist auf die unterschiedlichen Brechzahlen der Materialien PMMA und Veroclear™ angepasst. Allerdings kann eine exakte Positionierung der Linse im Reflektor nicht sichergestellt werden, was sich in der Lichtverteilung und der Beleuchtungsstärke des Hotspots niederschlagen kann. Die polierte RP-Linse erhöht die Beleuchtungsstärke in Hotspot um 30 % gegenüber dem System ohne Linse. Der Lichtstrom, welcher in den vermessenen und für das Zusatzfernlicht relevanten Bereich emittiert wird, steigt um 11 %. Die HSC-gefräste PMMA-Linse bewirkt eine nahezu scharfe Abbildung des Lichtemissionspunktes vom Leuchtstoff ins Unendliche. Die Beleuchtungsstärke im Hotspot erhöht sich um 224 %, der Lichtstrom um 21 %.



Durch die RP-Linse lässt sich der in den relevanten Winkelbereich emittierte Lichtstrom des Zusatzfernlichts gegenüber dem System ohne Linse deutlich erhöhen. Die Werte der vergleichbaren PMMA-Linse werden nicht erreicht. Durch die leicht raue Oberfläche der RP-Linse ist eine scharfe Abbildung des Lichtemissionspunktes nicht möglich, die erreichte Erhöhung der Beleuchtungsstärke im Hotspot nur gering.

3 FAZIT

Aus Laserdioden in Kombination mit einem Leuchtstoffsubstrat wurden verschiedene Konzepte für Fernlichtmodule entwickelt und Prototypen aufgebaut. Das erzeugte Licht entspricht bei geeigneter Leuchtstoffwahl den für Fahrzeugscheinwerfer vorgeschriebenen Anforderungen [12]. Da die Lichtquelle im herkömmlichen Sinne aus dem Leuchtstoff besteht, sind für die Ausführung der Systems unterschiedliche Anordnungen der anregenden Laserdioden denkbar, was auch gezeigt wurde. Bei den umgesetzten Konzepten handelte es sich ausschließlich um reflektiv eingesetzte Leuchtstoffe in Reflektoren, da diese zum einen eine bessere Wärmeabfuhr durch die Aufbringung auf einer Metallschicht erlauben und zum anderen zu einer höheren Lichtausbeute führen. Aufgrund der Anpassung der Laserleistung können auch Betriebszustände außerhalb der Laborbedingungen von 25 °C für den Modulbetrieb genutzt werden.

Das eingesetzte Verfahren zum Rapid Prototyping einer Linse ist bedingt geeignet. Der in den für ein Zusatzfernlicht relevanten Winkelbereich emittierte Lichtstrom lässt sich deutlich steigern, eine scharfe optische Abbildung ist bedingt durch die begrenzte Oberflächenqualität des Verfahrens nicht möglich, wobei eine Politur hier Verbesserung schafft.

QUELLEN

- [1] BMW Group (2014): BMW Laserlicht geht in Serie. Der BMW i8 ist das erste Serienfahrzeug mit der innovativen Lichttechnologie. Abrufbar online unter https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=bmw-laserlicht-geht-in-serie-der-bmw-i8-ist-das-erste-serienfahrzeug-mit-der-innovativen&outputChannelId=7&id=T0165849DE&left_menu_item=node__8610, zuletzt aufgerufen 14.07.2014
- [2] Audi (2014): Weltpremiere auf der CES 2014 in Las Vegas: Der Audi Sport quattro laserlight concept. Abrufbar online unter https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/public/pressemitteilungen/2014/01/02/weltpremiere_auf_der.html, zuletzt abgerufen 14.07.2014
- [3] Pudenz, K. (2014): Mercedes-Benz Concept GLA bekommt Scheinwerfer mit Laserlicht. Abrufbar online unter <http://www.springerprofessional.de/mercedes-benz-concept-gla-bekommt-scheinwerfer-mit-laserlicht/4379740.html>, zuletzt abgerufen 14.07.2014
- [4] Ye, S., Xiao, F., Pan, Y.X., Ma, Y.Y., Zhang, Q.Y. (2010): Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties, *Journal of Material Science*, Volume 71 (1): 1-34



- [5] Lachmayer, R., Kloppenburg, G. (2013): Development of a Laser Headlight, 13th *International Conference: Intelligent Automotive Lighting 2013*, Wiesbaden (Vortrag)
- [6] Basu, Ch., Kloppenburg, G., Wolf, A., Wollweber, M., Roth, B., Lachmayer, R. (2013): A High Power Blue Diode Laser Pumped White Light Source Using Remote Phosphors, *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting*, München: Herbert Utz Verlag GmbH, 955 Seiten
- [7] Lachmayer, R., Wolf, A., Kloppenburg, G. (2014): Lichtmodule auf Basis von laseraktiviertem Leuchtstoff für den Einsatz als Zusatzfernlicht, *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik – VDI-Berichte 2221*, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 271 Seiten
- [8] Osram (2013): PL-TB450B, Datenblatt. Abrufbar online unter <http://www.frlaserco.com/download/20130816095114/PL-TB450B.pdf>, zuletzt abgerufen 15.07.2014
- [9] Lachmayer, R., Kloppenburg, G., Stephan, S. (2014): Temperature issues with white laser diodes, calculation and approach for new packages, *Photonics Prague 2014* (Abstract angenommen)
- [10] Lachmayer, R., Wolf, A. (2014): Direct Manufacturing optomechatronischer Komponenten, *7. Workshop Optische Technologien 26.11.2013*, Garbsen: PZH Verlag, 136 Seiten
- [11] Ihme, M. (2012): *Rapid Prototyping optischer Komponenten*. Projektarbeit. Hannover: Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (IPeG) der Leibniz Universität Hannover
- [12] ECE (Economic Commission for Europe), (2005): Regelung Nr. 113 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE), L330/214, Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur