

Lichtmodule auf Basis von laseraktiviertem Leuchtstoff für den Einsatz als Zusatzfernlicht

Untersuchung von Leuchtstoffen und Aufbau eines Lichtmoduls

Prof. Dr.-Ing. **R. Lachmayer**; Dipl.-Ing. **A. Wolf**;
Dipl.-Ing. **G. Kloppenburg**, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Leibniz Universität Hannover

Kurzfassung

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“ 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. Die Konstruktion mit einem laseraktivierten Leuchtstoff ermöglicht durch die Trennung von Lichterzeugung und Frequenz-Konversion ein verbessertes Thermomanagement des Systems. Außerdem lassen sich hiermit attraktive Designansätze umsetzen.

Anhand eines Zusatzfernlichts, welches aus Laserdioden mit Ansteuerung und Kühlung, Leuchtstoffschicht und Reflektor besteht, wird dieser Ansatz validiert. Aufbauend auf Voruntersuchungen [1, 2] wird mit dem System der Einfluss verschiedener Konversionsschichten in Bezug auf die Parameter Lichtstrom, Wirkungsgrad und Farbort betrachtet. Bei laserbasierten Lichtquellen kommt außerdem dem Farbwiedergabeindex und der richtungsabhängigen Homogenität des abgestrahlten Lichts eine besondere Bedeutung zu. Ferner wird die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Betriebstemperatur der Laserdiode dargestellt. Ein geeigneter Leuchtstoff wird gewählt und der Prototyp eines Zusatzfernlichts aufgebaut.

1. Einleitung

Insbesondere für den Einsatz in Elektroautos wird kontinuierlich nach Lösungen gesucht, die elektrischen Verbraucher im Fahrzeug effizienter zu gestalten. Die Fahrzeugfrontbeleuchtung bietet durch den Einsatz sehr heller, weißer LEDs eine Möglichkeit dazu. Diese LEDs basieren typischerweise auf einem blau emittierenden LED-Chip, der mit einer Frequenzkonversionsschicht überzogen ist. Diese absorbiert Teile des blauen Lichts und

wandelt sie in ein breites Spektrum von grün bis rot um [3]. In zunehmendem Maße halten neben LEDs auch auf Laserdioden basierende weiße Lichtquellen Einzug in den Alltag wie beispielsweise in Projektoren. Auch erste Fahrzeughersteller wie BMW [4], Audi [5] und Daimler [6] haben den Einsatz von Laserlicht in der Fahrzeugbeleuchtung angekündigt bzw. vorgestellt. In vielen Fällen wird ein derartiges Licht ähnlich wie bei der LED mittels einer blauen Diode und anschließender Frequenzkonversion umgesetzt. Aufgrund der vergleichsweise gerichteten Abstrahlcharakteristik und hohen Energiedichte von Laserdioden bietet sich hier eine Trennung von Lichterzeugung und -konversion an. Hieraus und durch die hohe Leistungsdichte des Laserlichts ergeben sich unter anderem Vorteile bei der Erstellung von Kühlkonzepten wie auch beim Design der Reflektoren und Scheinwerfer.

2. Simulation und Konzept des Systems

Gemäß ECE-Regelung 113 gelten für Fernlicht-Zusatzscheinwerfer mit Glühlampen an definierten Messpunkten Minimal- bzw. Maximalwerte der auf einer 25 m entfernten Testwand erzeugten Lichtstärke [7]. Die dort genannten Werte können auch für das hier vorgestellte Lichtmodul als Referenz dienen.

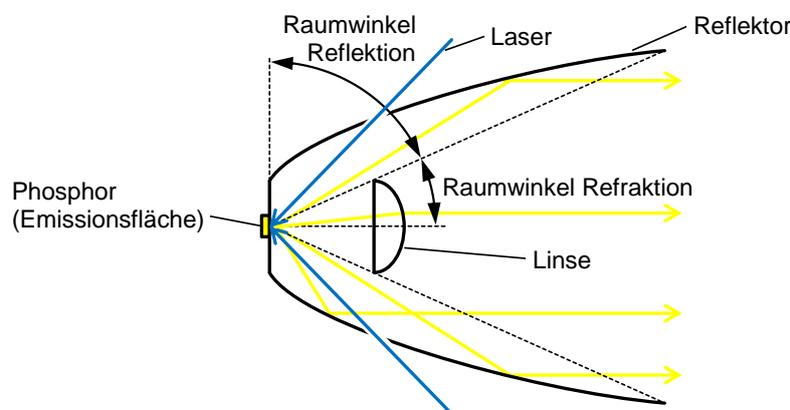


Bild 1: Konzept des Laserscheinwerfers

Im Laserscheinwerfer, dessen Konzept in Bild 1 dargestellt ist, kommt eine reflektive Konversionsschicht zum Einsatz. Diese ermöglicht im Gegensatz zu einer transmissiven ein vereinfachtes Temperaturhandling. Zudem wird das gesamte Licht ausschließlich in den 2pi-Halbraum abgestrahlt, wodurch das optische System effizient gestaltet werden kann. Hierbei kann der Leuchtstoff als idealer Lambert-Strahler angesehen werden. Der Großteil des emittierten Lichts trifft auf einen segmentierten Reflektor, welcher eine in vertikaler Richtung fokussierte, in horizontaler Richtung leicht öffnende Lichtverteilung erzeugt. Anders als in

einem Patent der Zizala Lichtsysteme GmbH [8] wird das Laserlicht nicht von vorne durch die Reflektoröffnung in das System geleitet, sondern durch die seitlichen Reflektorflächen. Dadurch treffen die Lichtstrahlen unter einem spitzen Winkel auf die Konversionsschicht.

Bei klassischen Reflektorsystemen wird das nach vorne emittierte Licht entweder nicht umgelenkt und bleibt somit für die Erzeugung der Lichtverteilung nahezu ungenutzt, oder es wird durch einen Sekundärreflektor, welcher sich an der Lichtquelle befindet, auf den Hauptreflektor zurückgeworfen. Im hier vorgestellten System kommt eine asphärische Linse zum Einsatz. Dadurch wird nahezu das gesamte Licht, welches die Lichtquelle bestehend aus Laserdioden und Leuchtstoffschicht generiert, effektiv genutzt. Zu beachten ist jedoch die von Projektionssystemen bekannte chromatische Aberration. Prinzipbedingt erzeugt jede Linse bei polychromatischem Licht einen Farbsaum, welcher jedoch durch die Überlagerung des refraktierten Lichts mit dem reflektierten geringer ist als bei reinen Projektionssystemen.

3. Untersuchung verschiedener Leuchtstoffe

Ein großer Vorteil des hier verfolgten Systemaufbaus mit einer Trennung der Lichterzeugung in eine anregende Lichtquelle und eine Frequenzkonversionsschicht ist die flexible Anpassung einzelner Teile ohne Beeinflussung der übrigen Systemgestaltung. So können Leuchtstoffe oder Anregungslichtquellen einfach ausgetauscht werden während der restliche Modulaufbau unverändert bleibt. Aus diesem Grund werden im Folgenden verschiedene Leuchtstoffe untersucht und miteinander verglichen. Es handelt sich dabei zum Teil um Entwicklungsmuster, die von der Firma Intematix zur Verfügung gestellt wurden. Da die Leuchtstoffe teilweise für die transmissive Nutzung sowie auch für andere Anwendungsfälle konzipiert wurden, können die in den durchgeführten Versuchen ermittelten Werte nur begrenzt mit den im jeweiligen Datenblatt angegebenen verglichen werden. Insbesondere ist – bedingt durch den Versuchsaufbau – unter Umständen mehr Blauanteil im gemessenen Spektrum als die Emissionseigenschaften vermuten lassen.

Einige der untersuchten Beschichtungen tragen bei zu hoher Leistungsdichte irreparable Beschädigungen davon, während andere bei den aufgebrachten Leistungsdichten lediglich Sättigungserscheinungen aufweisen. Diese führen dazu, dass ein höherer Anteil blauen Lichts in der emittierten Spektralverteilung ist, sobald eine gewisse lokale Bestrahlungsstärke überschritten wird. Insgesamt werden für die hier vorgestellten Ergebnisse sieben Leuchtstoffe untersucht. Vier davon in Pulverform (EY4156, EY4453, NYAG4156-L, NYAG4355-L), zwei als Beschichtung auf einem Glas-Träger (ChromaLit™ CL-750-LR und CL-840-LR) und eine LED (Osram Duris E5, 4000K), bei der die Leuchtstoffschicht von oben bestrahlt wird. Eine weitere LED, die speziell für den Einsatz hoher Energiedichten wie im

Fahrzeugscheinwerfer konzipiert ist, wird nicht berücksichtigt, da der Leuchtstoff durch eine Glasschicht bedeckt ist. So wird die einfallende Strahlung des anregenden Lasers zu großen Teilen reflektiert ohne auf den Leuchtstoff zu gelangen. Dennoch sollten sie Gegenstand zukünftiger Versuche sein, da diese Schichten hohe Bestrahlungsstärken und damit über den einzuhaltenden Abbildungsmaßstab kleine optische Konzepte ermöglichen.

Zur besseren Reproduzierbarkeit werden die Leuchtstoffe mit einer einzelnen Laserdiode angeregt und in einer Ulbrichtkugel mit Spektrometer vermessen. Bei der für die Untersuchungen verwendeten Laser-Lichtquelle handelt es sich um eine Diode der Firma Osram (PL-TB450B) mit einem Betriebsstrom von 1200 mA und einer Nennleistung von 1,6 W optisch [9]. Aufgrund der großen Divergenz des Strahls wird sie zusätzlich mit einer Kollimationsoptik versehen, die die tatsächliche Leistung auf etwa 1,3 W reduziert. Mit einer elektrischen Leistung von $P_{el} = 5,68 \text{ W}$ ergibt sich als Wirkungsgrad der Diode etwa 23 %. Die Gehäusetemperatur der Diode (T_{case}) wird mittels eines thermoelektrischen Kühlelements (TEC) geregelt und für die Versuche zwischen 25 und 50 °C variiert. Sofern nicht anders angegeben, sind die Werte bei $T_{case} = 25 \text{ °C}$ ermittelt. Die Leistungsaufnahme der Temperaturregelung ist dabei im stabilen Zustand gering. Die in [1] durchgeführten Messungen für CL-750-LR und CL-840-LR erfolgten bei $T_{case} = 15 \text{ °C}$, was auch den dort ermittelten Wirkungsgrad von 25 % erklärt. Insbesondere für den Einsatz im Fahrzeug mit teilweise hohen Umgebungstemperaturen ist allerdings der gewählte Bereich von 25-50 °C sinnvoller. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Für die Xenon-Lichtquelle ist kein Lichtstrom angegeben, da diese Information aufgrund der anderen Anregungsart nicht für einen Vergleich geeignet ist. Der Farbort zu den in Tabelle 1 aufgeführten Leuchtstoffen und Lichtquellen bei oben angegebenen Messbedingungen ist in Bild 2 dargestellt.

Tabelle 1: Lichtstrom und Farbwerte verschiedener Leuchtstoffe/ Lichtquellen

Leuchtstoff	Lichtstrom	Farbtemperatur	CRI (Ra)	Rotanteil
EY4156	159,7 lm	7184 K	54,73	0,04997
EY4453	204,8 lm	5414 K	55,78	0,07291
NYAG4156-L	303,8 lm	5746 K	59,34	0,06276
NYAG4355-L	226,0 lm	5304 K	60,12	0,07465
CL-750-LR	343,0 lm	6349 K	70,31	0,09454
CL-840-LR	324,8 lm	4629 K	75,10	0,11052
LED Osram Duris E5	103,5 lm	5605 K	82,20	0,12570
Xenon HID	--	4116 K	64,51	0,08060

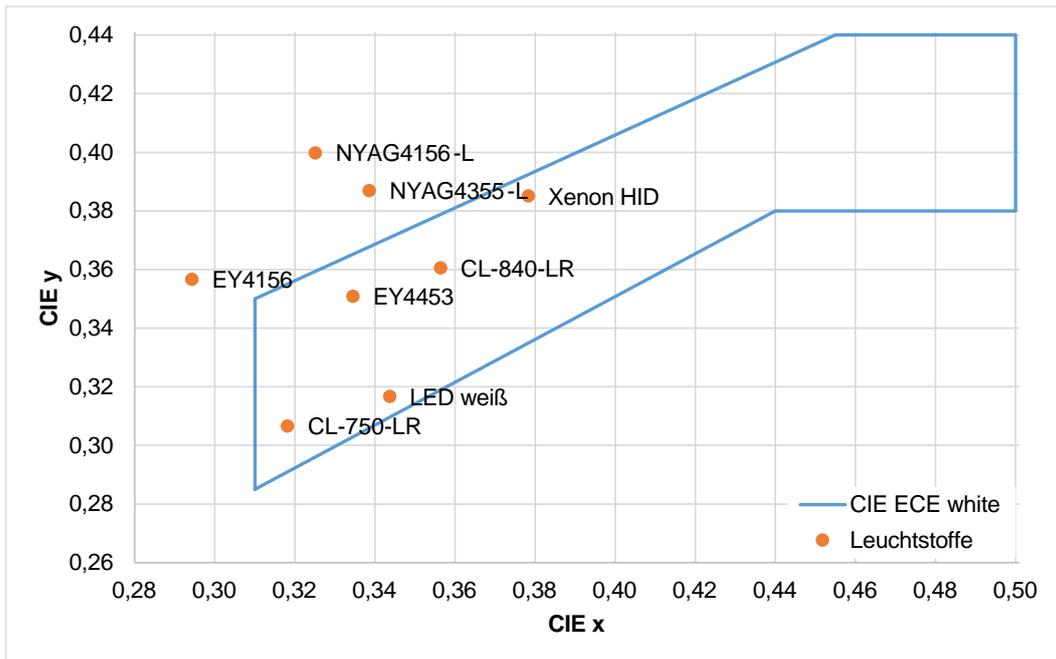


Bild 2: Farborte der in Tabelle 1 aufgeführten Lichtquellen

Die Messung in der Ulbrichtkugel erfasst zu dem emittierten weißen Licht der Leuchtstoffschicht auch nicht umgewandeltes blaues Licht, welches an der Schicht bzw. dem Trägermaterial reflektiert wird. Dieses Verhalten, was auch im Scheinwerfer berücksichtigt werden muss, führt zu relativ hohen gemessenen Farbtemperaturen. Burgin et. al. haben beobachtet, dass bei als Emulsion aufgetragenem YAG:Ce-Phosphor die Effizienz der Frequenzkonversion mit reduzierter Schichtstärke abnimmt [11]. Ein entsprechender Einfluss der Stärke der Konversionsschicht und damit eine Blauverschiebung bei geringer Schichtstärke ist auch hier zu erwarten.

Die ECE schreibt für Scheinwerfer den ECE-Weißbereich vor, in welchem der Farbort des abgestrahlten Lichts liegen muss [7]. Zusätzlich definiert die ECE in Regelung 112 einen Mindest-Rotanteil des Lichtes für LED-Scheinwerfer. Prinzipbedingt ist der Rotanteil weißer wirkungsgradstarker LEDs gering, so dass zur Sicherstellung des Erkennens roter Objekte im Verkehrsraum ein Grenzwert notwendig ist. Laserscheinwerfer verwenden dasselbe Prinzip der Frequenzkonversion, so dass die Aussage der Regelung 112 hier beachtet werden sollte. Gemäß ECE-Regelung 112 muss der Lichtstrom im Bereich 610-780 nm mindestens 5 % des Gesamt-Lichtstroms betragen. Als Messpunkt ist hierbei der Punkt 50 V zu verwenden [10]. In Tabelle 1 ist der Rotanteil des Lichtstroms integral und somit unabhängig vom Abstrahlwinkel der Lichtquelle angegeben. In Abhängigkeit von dem optischen System wird dieser Wert mehr oder weniger exakt auf den relevanten Punkt 50 V

übertragen. Einen hohen Rotanteil liefern die LED als Lumineszenzschicht sowie die Substrate auf Glas (CL-840-LR und CL-750-LR). Der Rotanteil bei EY4156 ist am geringsten und liegt genau auf dem Grenzwert von 5 %. Alle anderen Proben liefern einen ausreichenden, mit Xenonlicht in etwa vergleichbaren Rotanteil.

Für die Bestimmung des Farbortes werden vier der in Bild 2 dargestellten Leuchtstoffe bei verschiedenen Diodenzuständen vermessen. Dazu wird sowohl die Gehäusetemperatur zwischen 25 und 50 °C variiert als auch der eingestellte Betriebsstrom zwischen 400 und 1200 mA verändert. Somit kann ein Bereich ermittelt werden, in dem sich das emittierte Licht befindet, auch wenn die Umgebungsbedingungen – wie im Scheinwerfer typisch – variabel sind. Die Messergebnisse sind in Bild 3 dargestellt. Es wird deutlich, dass die einzelnen Punkte jeweils etwa auf einer Linie liegen, die den blauen Bereich im CIE Farbdigramm mit einem anderen Punkt (grün bis gelb) verbindet. Da sowohl unterschiedliche Diodenleistungen als auch Gehäusetemperaturen (was zu einer Frequenzverschiebung der Diodenemission führen kann) verwendet werden, ist eine eindeutige Tendenz in dieser Form schlecht darzustellen. Die Messpunkte höherer Laserleistungen liegen jedoch weiter im blauen Bereich als die dazugehörigen mit niedrigerer Leistung. Insgesamt liegen von den vermessenen Proben bei der angewendeten Messmethode die beiden Leuchtstoffe CL-840-LR und EY4453 im durch die ECE als „weiß“ zugelassenen Bereich. Bei letzterem müssen einige Betriebszustände vermieden werden.

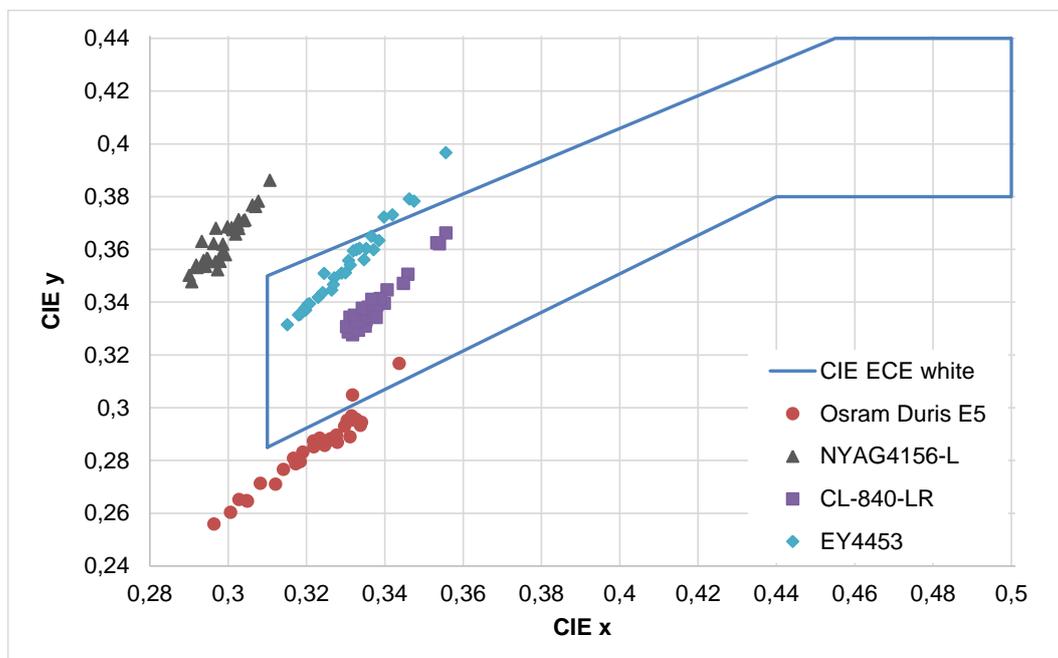


Bild 3: Farborte ausgewählter Leuchtstoffe bei veränderten Diodenparametern

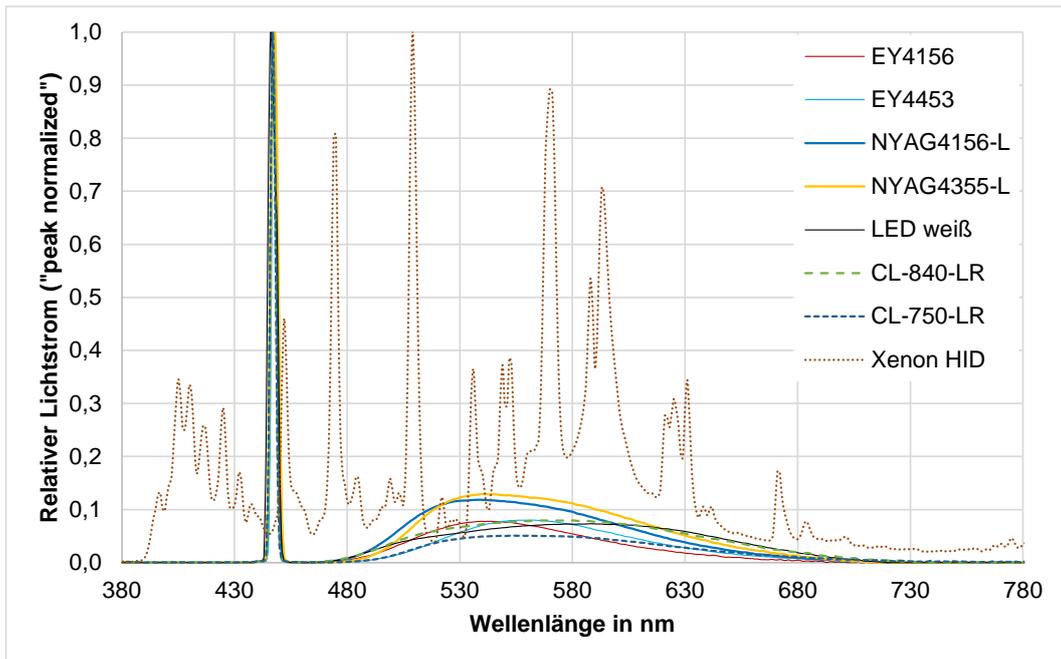


Bild 4: Relative spektrale Emission der Leuchtstoffe im Vergleich zu einer Xenon-HID

Im Vergleich der spektralen Emission der betrachteten Lumineszenzstoffe (Bild 4) wird die unterschiedliche Abstrahlung insbesondere im roten Bereich deutlich. So sind die beiden NYAG-Leuchtstoffe im Wellenlängenbereich zwischen 520 und 600 nm relativ zum Maximum deutlich stärker emittierend als beispielsweise die ChromaLit™-Probe CL-840-LR. Ab 620 nm hingegen liegen sie dann darunter. Neben dem Farbort und dem Lichtstrom ist für den Einsatz in der Beleuchtung auch wichtig, wie die eigentliche Lichtquelle abstrahlt. Im Fall der laseraktivierten Lichtquellen ist dies der Leuchtstoff.

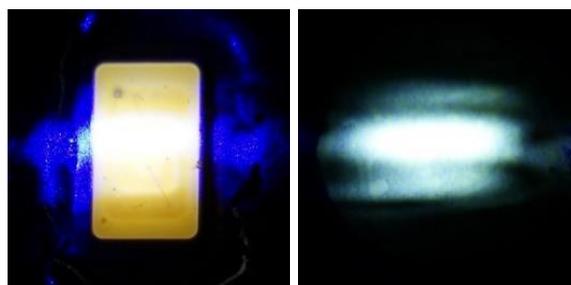


Bild 5: Vergleich des Abstrahlverhaltens von angestrahlter LED (links) und NYAG (rechts)

Bei der Bestrahlung der beschichteten LED und der pulverförmigen Leuchtstoffproben ist der Unterschied der beiden Materialien deutlich zu erkennen. Die Fotos in Bild 5 zeigen in gleicher Kameraeinstellung eine LED und ein Leuchtstoffpulver, jeweils mit demselben teilkollimierten Laser bestrahlt. Dabei ist die Beschichtung der LED komplett zu erkennen,

die Kontur des Laserpunkts jedoch nicht. Diese Eigenschaft ist für den Einsatz im Reflektor nachteilig, da so eine große strahlende Fläche anstelle einer nahezu punktförmigen Lichtquelle hoher Intensität entsteht. Auf dem Pulver hingegen ist das Strahlprofil des aufgetragenen Lasers deutlich zu sehen. Dies ermöglicht es, die hohe Energiedichte eines Laserstrahls optimal in Form einer kleinen emittierenden Fläche zu nutzen.

4. Temperaturabhängigkeit der Lichterzeugung

Beim Einsatz von diodenbasierten Lichtquellen im Fahrzeug ist auch immer eine Betrachtung der Temperaturabhängigkeit des Aufbaus von Bedeutung. Der mögliche Farbraum bei unterschiedlichen Temperaturen (diodenseitig) ist bereits in Bild 3 dargestellt. Die Abhängigkeit des Lichtstroms von der Diodenleistung und -temperatur ist in Bild 6 eingetragen. Für die Diagramme sind beispielhaft die angestrahlte LED (Osram Duris E5) sowie ein NYAG-Leuchtstoff ausgewählt. Der erzeugte Lichtstrom wird mit zunehmender Diodentemperatur geringer, was dadurch zu erklären ist, dass die Diode hier vom Wirkungsgrad her schlechter wird und somit weniger optische Leistung zur Verfügung steht.

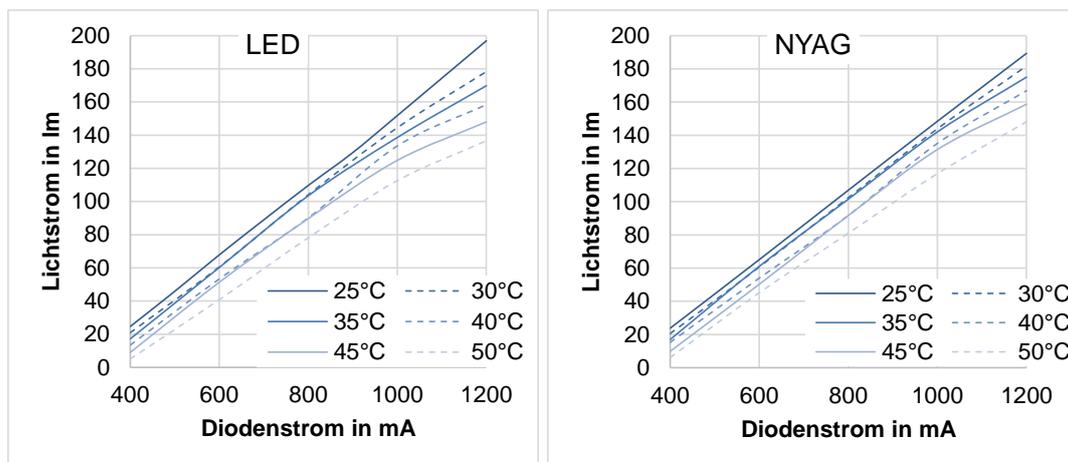


Bild 6: Temperaturabhängiger Lichtstrom von zwei beispielhaft ausgewählten Leuchtstoffen

Ein weiterer kritischer Faktor für die Lichterzeugung ist die Temperatur der Leuchtstoffschicht. Um diese zu untersuchen wird der Versuch wie in Abschnitt 3 aufgebaut und mit einer Infrarotkamera vermessen (FLIR A655sc). Da für die Vermessung mit einer Infrarotkamera metallische Oberflächen ungünstig sind, wird als Träger ein schwarz lackiertes Aluminium-Plättchen verwendet. Auf diesem wird der Temperaturverlauf im Emissionspunkt der Leuchtstoffschicht ausgewertet. Hier treten die höchsten Temperaturen auf. Das Einschalten von Laserlicht mit ca. 1,3 W optischer Leistung führt zu direktem

Temperatursprung um 20 K. Dies resultiert direkt aus der Abwärme der Frequenzkonversion (Stokes-Shift). Die in Bild 7 dargestellte Messung des Temperaturverlaufs der Probe zeigt, dass sich nach wenigen Minuten ein stabiler Zustand einstellt. Die eingebrachte Verlustleistung kann also problemlos über das metallische Trägermaterial der Lumineszenzschicht abgeführt werden. Nach etwa 35 min wird der Laser wieder ausgeschaltet und auch hier tritt der Temperatursprung um 20 K auf, der schon beim Einschalten zu beobachten ist. Im Diagramm ist außerdem noch das Abkühlverhalten auf Raumtemperatur dargestellt.

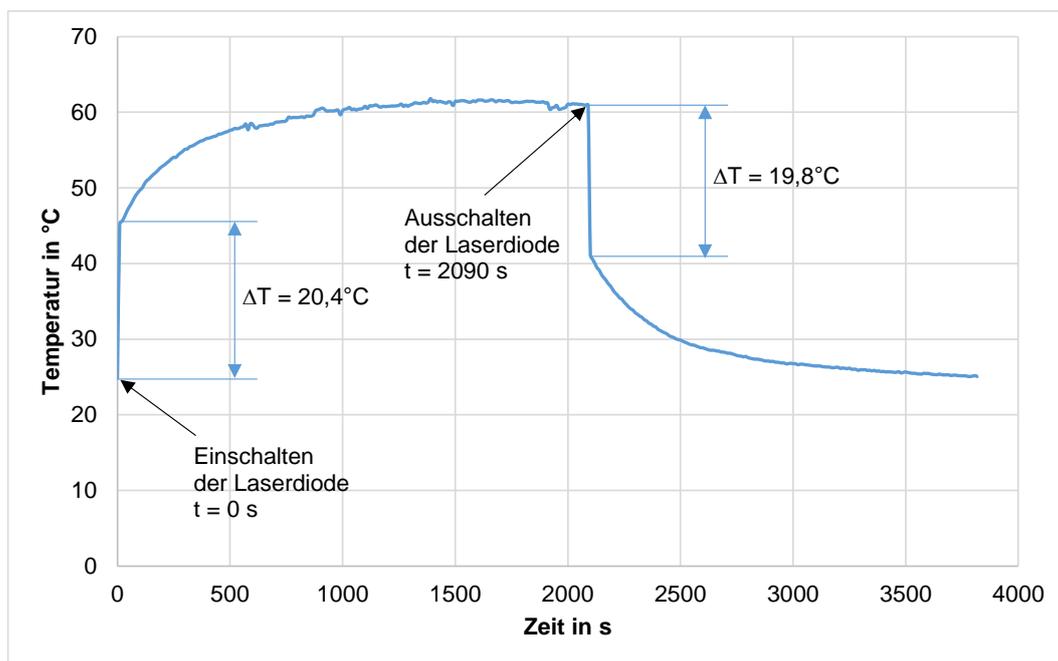


Bild 7: Leuchtstofftemperatur bei Bestrahlung mit 1,3 W optischer Leistung

5. Lichtverteilung des Demonstrators

Um einen Kompromiss zwischen notwendiger Kühlleistung und erzeugtem Lichtstrom zu erreichen, wird das Lichtmodul bei einer Dioden-Ausgangsleistung von etwa 2 W betrieben und auf einem Goniophotometer vermessen. Bei dem verwendeten Messgerät handelt es sich um das GO-H 1400 der Firma LMT. Der verwendete Messkopf befindet sich in 25 m Entfernung, womit normgerechte Messbedingungen gegeben sind. Die Ergebnisse der Messungen sind in Bild 8 zusammengefasst zu sehen. Auf der linken Seite sind die erreichten Beleuchtungsstärken für den Aufbau mit Linse wie in Abschnitt 2 dargestellt zu sehen. Das Maximum liegt hier bei 83,75 lx. Als Vergleich dazu ist rechts das Ergebnis der Messung ohne Linse mit einem Maximum bei 73,71 lx aufgetragen.

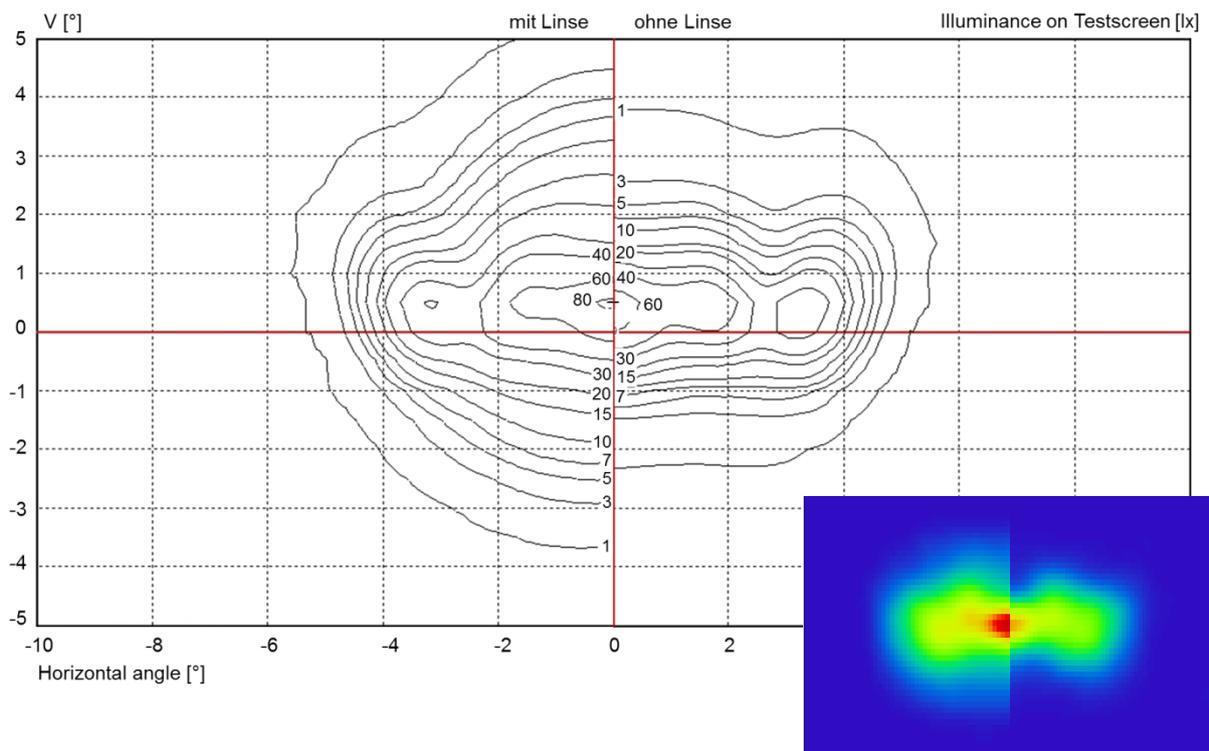


Bild 8: Lichtverteilung des Laserlicht-Moduls auf einer 25 m entfernten virtuellen Testwand, Maximum bei 83,75 lx (linke Hälfte), zum Vergleich: ohne Linse, Maximum bei 73,71 lx (rechte Hälfte), unten rechts: Simulation mit bzw. ohne Linse

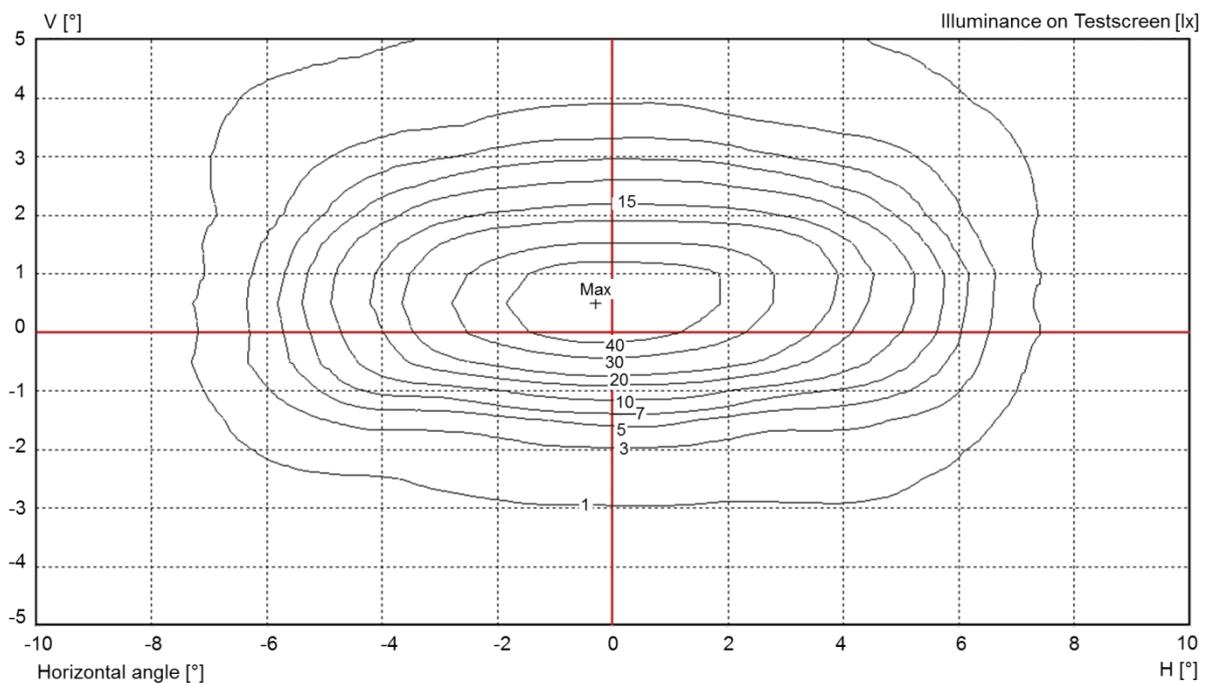


Bild 9: Handelsübliches Zusatzfernlicht (im Fahrzeugscheinwerfer), Maximum bei 52,30 lx

Der Einfluss der Linse, welche das ansonsten ungenutzte Licht aus den äußeren Bereichen in der Mitte und etwas darüber bündelt, wird deutlich, insbesondere auch durch die Tatsache, dass der erreichte Maximalwert der Beleuchtungsstärke mit Linse um etwa 10 lx höher ist als ohne. Zusätzlich ist in Bild 9 auch die Messung eines konventionellen Zusatzfernlichts aus einem handelsüblichen Scheinwerfer dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass für das aufgebaute Lichtmodul wie auch für das in Bild 9 vermessene handelsübliche Zusatzfernlicht keine Einbaulage bekannt ist, wird die Ausrichtung auf dem Messschirm willkürlich gewählt.



Bild 10: Am IPeG HSC-gefräste Linse und Reflektor sowie aufgebautes Lasermodul mit blauem „Laserglanz“ (im Fahrzeugscheinwerfer integriert)

6. Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf dem Prinzip laseraktivierter Leuchtstoffe wurde ein Konzept für ein Zusatzfernlichtmodul entwickelt, simuliert und realisiert. Anhand des aufgebauten Prototyps konnte die generelle Eignung des Konzepts validiert werden. Für die Umsetzung der Frequenzkonversion wurden verschiedene Leuchtstoffe untersucht und hinsichtlich Lichtstrom, Farbort und erforderlichem Rotanteil der Emission bewertet. Hier trat insbesondere der Leuchtstoff ChromaLit™ CL-840-LR hervor, welcher in jedem betrachteten Betriebszustand innerhalb des von der ECE vorgeschriebenen Farbraums liegt und dabei sowohl über einen vergleichsweise großen Wirkungsgrad als auch über einen hohen Rotanteil verfügt. Da die untersuchte Probe für den transmissiven Einsatz konzipiert ist, wäre für den Einsatz im untersuchten Laserscheinwerfer ein anderes optisches Konzept als das verfolgte notwendig. Der gewählte Systemaufbau hat zum Ziel, durch die Kombination von

Reflektor und Linse nahezu das gesamte emittierte Licht in die gewünschte Richtung zu lenken.

Der gewählte Ansatz bietet aufgrund der hohen Energiedichte des Lasers großes Potenzial besonders für adaptive Scheinwerfersysteme. Mit der erwarteten Steigerung der Effizienz und Reduktion der Kosten blauer Laserdioden ist ein Serieneinsatz der Technologie auch als Hauptscheinwerfer möglich. Weiterhin sollen Leuchtstoffe, wie sie zum Teil in weißen Hochleistungsdioden eingesetzt werden, Gegenstand zukünftiger Versuche sein.

Literaturverzeichnis

- [1] Basu, Ch.; Kloppenburg, G.; Wolf, A.; Wollweber, M.; Roth, B.; Lachmayer, R.: 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 2013
- [2] Lachmayer, R.; Kloppenburg, G.: Development of a Laser Headlight, 13th Conference Intelligent Automotive Lighting, Wiesbaden 2013
- [3] Ye, S.; Xiao, F.; Pan, Y.X.; Ma, Y.Y.; Zhang, Q.Y.: Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties. Journal of Material Science (2010) Volume 71 (1) S. 1-34
- [4] 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
(abgerufen am 28.02.2014)
- [5] https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/public/pressemitteilungen/2014/01/02/weltpremiere_auf_der.html (abgerufen am 28.02.2014)
- [6] <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1591907-1-1591941-1-0-0-1591748-0-1-8-7163-0-0-0-0-0-0-0.html> (abgerufen am 28.02.2014)
- [7] ECE-Regelung 113
- [8] AT 512 587 A1 2013-09-15
- [9] PL-TB450B, Datenblatt, OSRAM OS 2013
- [10] ECE-Regelung 112
- [11] Burgin, J.; Jubera, V.; Debéda, H.; Glorieux, B.; Garcia, A.; Lucat, C.: Screen-printed phosphor coatings for white LED emission. Journal of Material Science (2011) Volume 46 (7) S. 2235–2241