



<b>BMBF-Fördermaßnahme:</b>	<b>„Intelligente Beleuchtung“ innerhalb des Förderprogramms „Photonik Forschung Deutschland “</b>
<b>Vorhabenbezeichnung:</b>	<b>Intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer</b>
<b>Teilvorhabensbezeichnung:</b>	<b>Laserbasierte Hochluminanz-Lichtquelle mit dynamischer Leuchtdichteverteilung für adaptive Scheinwerfer-Systeme</b>
<b>Förderkennzeichen:</b>	<b>13N13088</b>
<b>Projektlaufzeit:</b>	<b>01.08.2014 bis 30.09.2017</b>
<b>Berichtszeitraum:</b>	<b>01.08.2014 bis 30.09.2017</b>
<b>Zuwendungsempfänger:</b>	<b>OSRAM GmbH</b>

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde u.a. mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen [FKZ 13N13088] gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

**Inhaltverzeichnis:**

1	Zusammenfassung .....	3
2	Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und andere wesentlicher Ereignisse .....	3
2.1	Konstruktion .....	3
2.2	Primäre Optik .....	4
2.3	Justage der optischen Bauteile .....	5
2.4	Aufbau- und Verbindungstechnik mittels Laserschweißen .....	7
2.5	Elektronik.....	7
2.6	Leuchtstoff-Konverter-Baugruppe .....	8
2.7	Applikationsergebnisse der Prototypen .....	10
2.8	Applikationsergebnisse der Prototypen im Dauertest .....	14
2.9	Applikationsergebnisse der Prototypen im Versuchsfahrzeug (Audi Q7) .....	14
2.10	Realisierte Prototypen der Laser-Light-Engine bzw. der aufgebauten iLaS-Module .....	15
3	Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung. ....	15
4	Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert? .....	15
5	Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind? .....	16
6	Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig? .....	16
7	Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans: .....	16
7.1	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte .....	16
7.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende .....	17
7.3	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende .....	17
7.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	17

## 1 Zusammenfassung

Der Einsatz von Laserdioden als Lichtquelle im Fahrzeugbau wurde von einigen Fahrzeugherstellern wie BMW und Audi in den letzten Jahren zur Serienreife gebracht. So besitzt z.B. der 7er BMW seit 2016 optional diese Technologie, wobei hier die Funktion eines statischen Zusatzfernlichtes realisiert wird. Für statische und insbesondere dynamische Vollscheinwerfer ist aber die Technologie aufgrund deutlich höherer und anderer Leistungs-, Optik- und Temperaturanforderungen aktuell nicht verfügbar. Um in diese neuen Anwendungsbereiche vorzudringen sind die Projektergebnisse des iLaS-Projekts von fundamentaler Bedeutung.

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Demonstratoren mit einer Laser-Light-Engine mit bis zu 17 W blauer optischer Leistung und einem MEMS-Spiegel (Micro-Electro-Mechanical-Systems) zur horizontalen Ablenkung aufgebaut. Zwei optische Konzepte, eine hochpräzise Justage- und Fügetechnik sowie der Prozess des verzugsfreien Laserschweißens wurden im Rahmen des Projekts entwickelt.

Zwei Scanner-Paare wurden schließlich in ein Versuchsfahrzeug verbaut. Ein Paar überstand ~21.000 km ohne technische Mängel (wie z.B. Dejustage). Bei diesen beiden Scannern waren die Laser ~250 h in Betrieb und zeigten ebenfalls keine Veränderungen im Lichtbild.

Somit sind die Projektergebnisse Beweis für ein robustes opto-mechanisches Design für Automotive Anwendungen.

## 2 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und andere wesentlicher Ereignisse

### 2.1 Konstruktion

#### 2.1.1 Bauraumbeschränkung

In Absprache mit den Partnern erfolgte die Konstruktion des iLaS-Moduls in den in einem Serienscheinwerfer zur Verfügung stehenden Bauraum. Ziel war es, Versuche im Fahrzeug machen zu können, um einerseits einen ersten visuellen Eindruck der Scanning-Technologie in der realen automobilen Anwendung zu bekommen, andererseits sollte diese neue Technologie unter den im Automotive-Bereich geforderten Umweltbedingungen erstmals geprüft werden können.

Aus den genannten Gründen wurde zusammen ein Audi Q7 Scheinwerfer als Zielanwendung definiert, der die Basis für die iLaS-Demonstratoren in einem Versuchsfahrzeug darstellen sollte. Mit dieser Festlegung war allerdings der für das Laser-Scanning-Modul zur Verfügung stehende Bauraum stark beschränkt. Es wurde schließlich ein sehr kompakter Bauraum von ca. 85 x 90 x 50 mm festgelegt (hierin nicht eingeschlossen sind Kühlung, Elektronik und sekundäre Scheinwerferoptik).



**Abbildung K1:** LINKS: Komplettes iLaS-Modul, wobei die Abmessungen durch den nutzbaren Bauraum im Zielscheinwerfer bedingt sind. RECHTS: Die realisierte Integration des iLaS-Moduls im Versuchsfahrzeug Audi Q7.

## 2.2 Primäre Optik

### 2.2.1 Prinzip der eindimensionalen Auslenkung

Zu Beginn des Projektes wurden verschiedene Technologien des Ablenkensystems auf deren Vereinbarkeit mit den gewünschten Spezifikationen (speziell der geforderten Intensitäten einer im Fernfeld verschiebbaren Fernlichtverteilung) untersucht. Als einfacher Untersuchungsparameter wurde hierfür u.a. die notwendige (mittlere) bzw. zu installierende (maximale) Laserleistung gewählt. Im Falle eines DMDs (Digital Micromirror Device) als zentrale Auslenkeinheit und auch für den Fall eines 2D-MEMS-Spiegels mit zwei resonanten Achsen war die zu installierende- Laserleistung- für Automotive Anwendungen wie z.B. ADB (Adaptive Driving Beam) nicht sinnvoll zu realisieren. Daher wurden diese Ansätze verworfen. Auch Abschätzungen zu Konverter-Limitierungen und weitere technologisch-technische Begrenzungen eines 2D-MEMS-Spiegels wurden in dieser Sondierungsphase betrachtet.

Schließlich wurde im Zuge des iLaS-Projekts ein alternatives Systemkonzept mit der Bezeichnung „Multibeam/ 1D-Curtain-Prinzip“ verfolgt. Eine Realisierung des Konzepts erfolgte durch die Anordnung mehrerer Laserstrahlen in einer Dimension (linear), die so ausgelegt wurde, dass sie den kompletten gewünschten Winkelbereich in dieser Dimension (vertikal) abdeckt. Somit ist eine Ablenkung in der zweiten Dimension (horizontal) notwendig, was mit dem quasistatischen Spiegel der Fa. Bosch realisiert wurde.

### 2.2.2 Laserlichtquelle

Als Laserlichtquellen für das iLaS-Modul wurden im Rahmen des Projekts drei verschiedene Ansätze evaluiert. Die drei untersuchten Laserlichtquellen unterschieden sich in der optischen Leistung und in der technischen Reife.

Mit folgenden drei Systemen wurden primäre Optikkonzepte und thermische Anbindungsthemen untersucht:

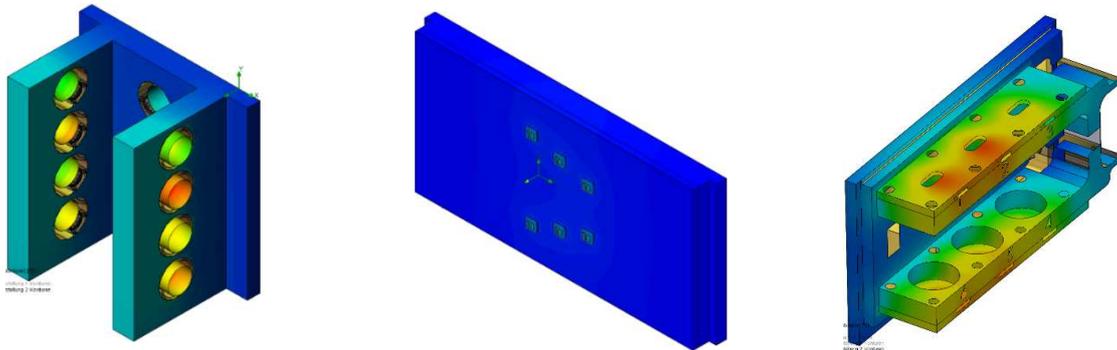
- **TO56 Diode** mit 1W optischer Leistung (eingeführtes Produkt)
- **SMT Diode** mit 2W optischer Leistung (Entwicklungsprojekt @ OSRAM OS)
- **TO90 Diode** mit ebenfalls 2W optischer Leistung (Entwicklungsprojekt @ OSRAM OS)

Aufgrund von verfügbarer optischer Leistung und dem technischen Reifegrad wurde für das iLaS-Projekt und den Aufbauten der Laserscanner schließlich die TO90 Diode als Laserlichtquelle im endgültigen mechanischen und optischen Design vorgesehen.

### 2.2.3 Thermische Schnittstelle

Hauptwärmequelle in der Laser-Light-Engine sind die sechs eingesetzten Laserdioden, die bei einer optischen Leistung von ca. 2,5W eine thermische Entwärmung von ca. 9W pro Kanal benötigen. Um hier möglichst effizient zu sein, wurden alle sechs Dioden im sog. Beamcombiner auf der Rückseite des Moduls in maximaler Entfernung angeordnet. Die optischen Konzepte mussten dies berücksichtigen (s. weiter unten). Damit stellt der Beamcombiner die thermische Schnittstelle zum Kühlkörper dar.

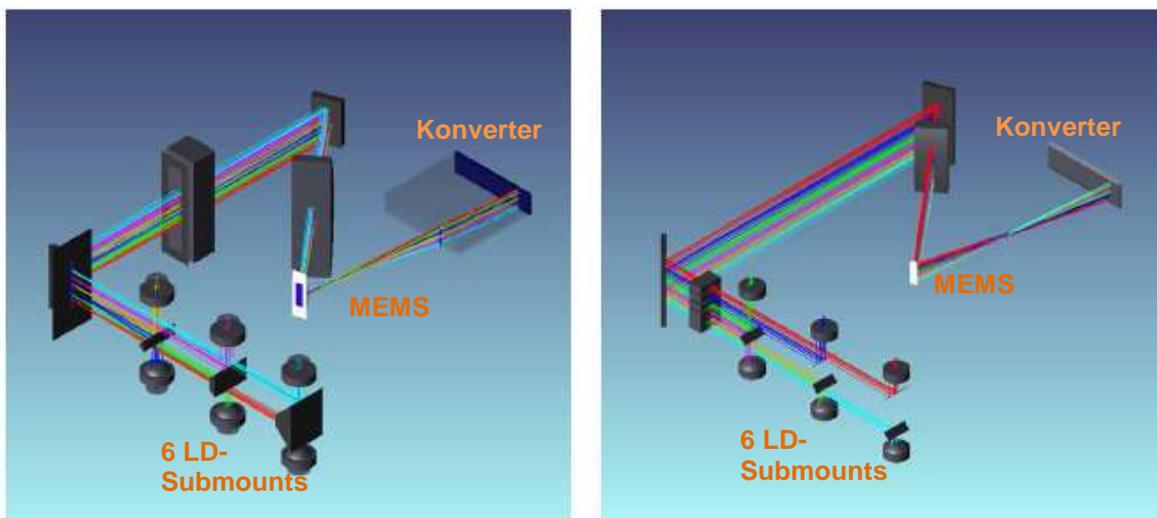
Für alle drei oben genannten Laserlichtquellen wurden thermische Simulationen des Beamcombiners mit optimierten Anordnungen erstellt. Es ist erkennbar, dass die SMT-Ausführung (Mitte) den beiden TO-Varianten (links und rechts) thermisch überlegen ist. Jedoch sind die Temperaturunterschiede nicht allzu groß, sodass im Projekt das einfachste und zugänglichere Konzept mit TO90 Can gewählt wurde.



**Abbildung PO1:** Simulationsergebnisse der verschiedenen Varianten: LINKS: Wärmstes Konzept mit 12 TO56 Dioden; MITTE: SMT Diode (früher Entwicklungsstatus); RECHTS: Realisierter Aufbau mit 6 TO90 Dioden im Beamcombiner.

### 2.2.4 Opto-mechanischer Aufbau

Auf Basis der oben genannten Bauraumrestriktionen und des zentralen Auslenkelements (2D- vs. 1D-MEMS Spiegel) wurden für die Primäroptik insgesamt sechs optische Konzepte designt, simuliert und evaluiert. In den aufgebauten Prototypen wurden schließlich (auch aufgrund des ausschließlich zugänglichen 1D-Spiegels) ein optisches Konzept mit Slow-Axis-Homogenisierung (Konzept-Nr. 4) und ein weiteres mit Fast-Axis/ Slow-Axis-Direktabbildung ohne Homogenisierung (Konzept-Nr. 6) realisiert.

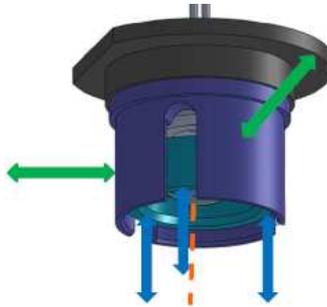


**Abbildung PO2:** LINKS: Optisches Konzept Nr. 4; RECHTS: Optisches Konzept Nr. 6 zur Umsetzung in den Demonstratoren bzw. im Versuchsfahrzeug mit der Darstellung des Strahlengangs des blauen Laserlichts von den sechs Laserdioden bis zur Converter-Ebene

### 2.3 Justage der optischen Bauteile

Die oben dargestellten und im Zuge des Projekts umgesetzten optischen Konzepte erfordern sehr enge Toleranzen an die verwendeten mechanischen Bauteile und auch an die Positionierung der optischen Komponenten (im  $\mu\text{m}$ -Bereich). Aufgrund der Direktabbildung ist v.a. das Konzept Nr. 6 mit einem sehr großen optischen Hebel von ca. 1:100 extrem sensibel bezüglich Abweichungen von der idealen Strahlführung. Besonders sensibel (und somit schwierig) ist der Justage-Schritt der exakten Positionierung der Asphäre unmittelbar vor der Laserdiode im Laserdioden-Submount. So führt z.B. die Verkippung der Linse um nur  $0,1^\circ$  zu einer Spotverschiebung um  $110 \mu\text{m}$  auf dem Converter. Gleiches gilt für die Dezentrierung

und der Defokussierung der Linse. Mit einem völlig überarbeiteten Justage-Konzept (und mit der Möglichkeit der Manipulation der Linse in allen sechs Freiheitsgraden) konnte die geforderte Präzision an die Positionierung der asphärischen Linse vor der Laserdiode erreicht werden.



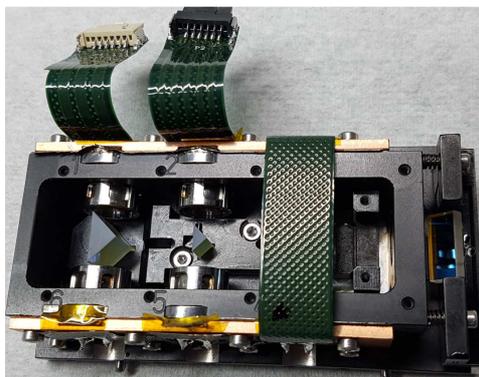
**Abbildung J1:** Mehrteiliger Laserdioden-Submount mit den erforderlichen Justage-Freiheitsgraden, die im  $\mu\text{m}$ -Bereich manipuliert werden müssen.

Die sechs LD-Submounts, die im folgenden Schritt im Beamcombiner zueinander ausgerichtet werden müssen, erforderten eine weitere, sehr aufwendige Justage-Einheit. Hier wurden die LD-Submounts in drei Freiheitsgraden (x, y, und Rotation) manipuliert.



**Abbildung J2:** Justage-Strategie mit den drei relevanten Freiheitsgraden der 6 LD-Submounts und Justage-Ziel von sechs zueinander exakt ausgerichteten Strahlbündeln im Beamcombiner

Die Qualität des Beamcombiners ist entscheidend für die Performance des Gesamtsystems. Daher ist die Detektion der sechs Laserstrahl-Profile mithilfe einer Strahlprofil-Kamera in diesen Justage-Stand (wie auch bei der LD-Justage) integriert.



**Abbildung J3:** Komplett aufgebauter Beamcombiner mit 6 Submounts und 3 Umlenk-Prismen (die beiden Größeren sichtbar)

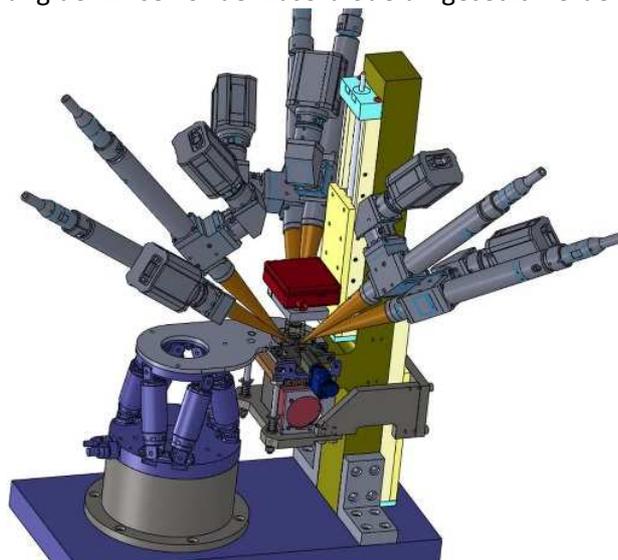
Die Justage des MEMS-Spiegels im Laser-Scanner ist im Vergleich zu den beiden anderen Justage-Schritten am unkritischsten. Der MEMS wird in zwei Schritten justiert. Im ersten Schritt wird der Spiegel mit seinem sog. Stifner-Blech auf einem speziell einwickelten Halter hinsichtlich Höhe und Neigung ausgerichtet.

Im zweiten Schritt muss der auf dem Halter fixierte MEMS im Scanner-Gehäuse nochmals ausgerichtet werden. Je nach optischem Konzept ist die Positionierung innerhalb des Moduls und v.a. die Einstellung des richtigen Winkelbereichs im Strahlengang sehr wichtig, um den Konverter flächig zu treffen.

## 2.4 Aufbau- und Verbindungstechnik mittels Laserschweißen

Aufgrund der geplanten Anwendung im Automotive Bereich (z.B. hinsichtlich Vibrationen, Lebensdauer, Temperaturschwankungen etc.) und der möglichen Belastungen durch energiereiches, blaues Laserlicht innerhalb des Moduls (Ausgasung, Haltbarkeit, etc.) wurde bei der Aufbau- und Verbindungstechnik konsequent auf Laserschweißtechnik gesetzt. Klebprozesse blieben aufgrund der schwierigen Prozessführung komplett unberücksichtigt.

Exemplarisch ist in der folgenden Abbildung der LD-Submount-Justagegestand dargestellt. Mit diesem Aufbau konnte die verzugsfreie Fixierung der Linse vor der Laserdiode umgesetzt werden.



**Abbildung AVT1:** LD-Submount-Justage mit Peripherie zum Laserschweißen (3 Schweißköpfe in 2 Positionen).

Die Auswahl der richtigen Werkstoffpaarungen, der zu verbindenden Geometrien und die Kontrolle des Prozesses beim Laserschweißen, stellen weitere große Herausforderungen dar. In mehreren Iterationen konnte schließlich der Schweißprozess so optimiert werden, dass eine Verkippung der Linsen durch den Wärmeeintrag beim Schweißen auf das notwendige, sehr niedrige Niveau ( $<0,05^\circ$ ) reduziert werden konnte.

## 2.5 Elektronik

Durch die assoziierte Partnerschaft mit ZKW gab es im Projekt-Setup eine Umstellung. ZKW übernahm inhaltlich die Entwicklung und den Aufbau des Lasertreibers und der Systemelektronik der iLaS-Module.

Trotzdem wurde OSRAM-seitig auch an einigen elektronischen Themen gearbeitet: So wurde z.B. ein sechs-Kanal-Lasertreiber für schnelle Schaltzeiten entworfen und aufgebaut. Auch eine rudimentäre Systemelektronik, um z.B. bei Justage-Schritten und Vorversuchen mit der MEMS-Baugruppe in einem Trimming-Mode kommunizieren zu können, wurden im Projekt aufgebaut. Für den erfolgreichen Aufbau der iLaS-Prototypen war auch das Verstehen und Absprechen des elektronischen Interfaces von Laserdioden zu Treiber und MEMS-Baugruppe nötig und wurde daher von OSRAM fachlich begleitet.

## 2.6 Leuchtstoff-Konverter-Baugruppe

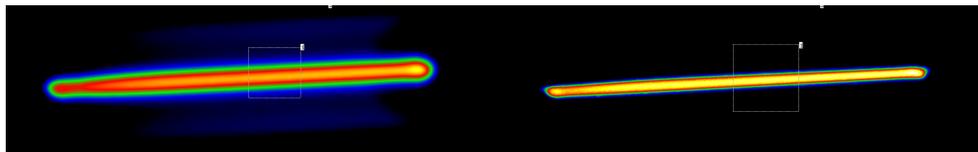
Die LARP (Laser Activated Remote Phosphor) Leuchtstoff-Konverter-Baugruppe hat im System die Aufgabe das blaue Laserlicht mittels Teilkonversion in den spektralen Bereich grün – gelb – rot umzuwandeln und das restliche blaue Pumplicht zu streuen. Kombiniert mit den Spezifikationsanforderungen eines geplanten (Teil) ADB-Systems ergibt sich ein umfangreiches und extrem komplexes Parameterfeld, in dem im Laufe des Projektes notwendigerweise Kompromisse eingegangen und Fortschritte erzielt wurden. Die hauptsächlich zu beachtenden und bearbeiteten Themenfelder sind:

- Zeitliche Abhängigkeit der Pumpleistung und deren Umsetzung in Leuchtdichte
- Maximale erreichbare Leuchtdichten und Applikationsmöglichkeiten, aber auch Grenzen und Kompromisse
- Flankenverlauf der Leuchtdichte bei abgeschalteten und gediminten Bereichen der Lichtverteilung
- Kontrastverhältnisse in den stark dunklen Bereichen der Lichtverteilung
- Erreichen der ECE-R-Farbanforderungen (Economic Commission for Europe Regulation)
- Lichttechnische Stabilität gegenüber wechselnden und zeitabhängigen Pumplichtanforderungen
- Lokale und absolute thermische Belastungsthemen
- Realisierung der benötigten Flächengröße der jeweiligen Technologien

Diese Themen wurden im Projekt mit Hilfe einer empirischen Parameterstudie zur Leuchtstoff-Konverter-Baugruppe bearbeitet. Untersucht wurden hierzu:

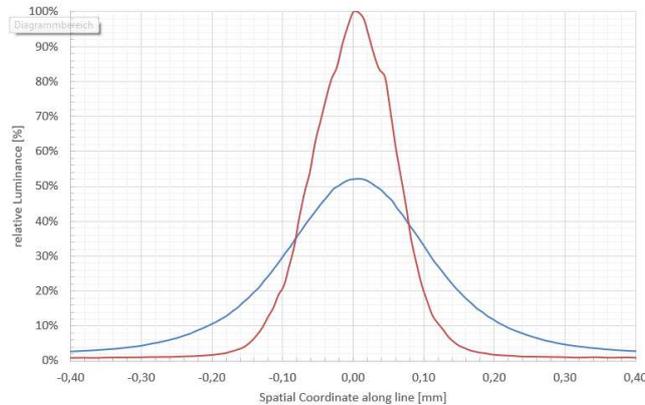
- Hauptsysteme: Vier verschiedene Leuchtstoff-Matrix-Systeme. Nebenansatz: Ein weiterer flankierender Matrix-Ansatz
- Diverse Leuchtstoff-Iterationen
- Verschiedene Substrat-Bonding-Technologien je nach Matrix-System
- Prozess-Iterationsthemen

Bzgl. der ADB-Funktionalitätsthematik konnten im Projektfortgang deutliche Fortschritte in der örtlichen Begrenzung der konvertierten Leuchtdichte gemacht werden. Anhand der Leuchtdichte zweier typischer Konverter-Packages im Laboreinsatz ist dies anhand von Abbildung KP1 zu sehen. Die örtliche Begrenzung und Erhöhung der Leuchtdichte ist hier dargestellt.



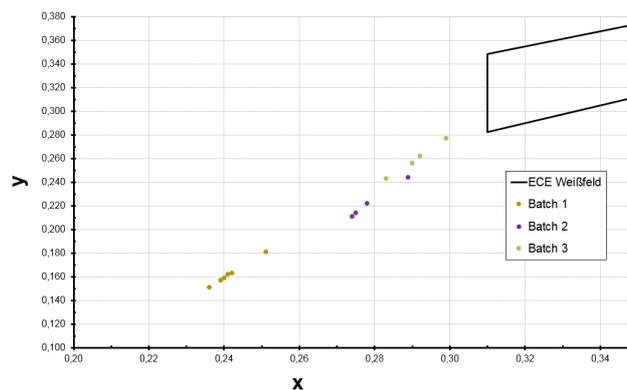
**Abbildung KP1:** Vergleich von Konverter-Packages zweier verschiedener Matrix-Systeme. Die Abbildung zeigt in einer Falschfarbenskala (hell dunkel Verlauf von „gelb“ über „orange“ über „rot“ über „grün“ nach „blau“) die Leuchtdichte einer einzelnen dynamischen Scan-Linie in einem Laborcharakterisierungsaufbau. Die Falschfarbenskala ist jeweils identisch. Die blaue Pumpleistungsdichteverteilung ist jeweils identisch. Der Typ rechts erreicht eine deutlich höhere maximale Leuchtdichte bzw. eine deutlich „schärfere“ vertikale Linienstruktur und eine schwächere Ausprägung von Streulicht weit weg von der eigentlichen Scan-Linie.

Ergänzend zu Abbildung KP1 ist in Abbildung KP2 senkrecht zur Scan-Linie ein relativer Plot eines 2D-Schnittes gezeigt, für die jeweils in KP1 gezeigten Systeme.



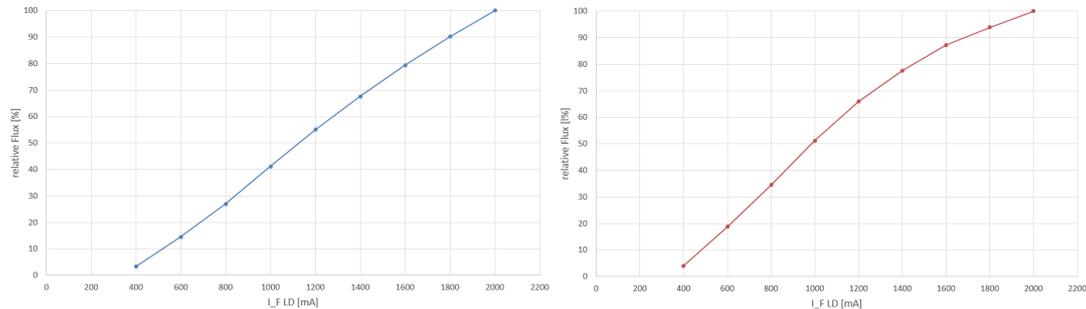
**Abbildung KP2:** Vergleich von Konverter-Packages zweier verschiedener Matrix-Systeme. Die beiden Linien zeigen relative Leuchtdichte-Schnitte aus den Daten von Abbildung KP1. Die rote Linie zeigt das System mit dem besseren „Spot-Confinement“ im Vergleich zur blauen Linie, d.h. einer höheren Leuchtdichte im Zentrumsbereich der Leuchtdichte und eine deutliche Unterdrückung von unerwünschten auslaufenden Flanken der Leuchtdichteverteilung.

Die Farbvariationen und Kontrolle im Herstellungsprozess ist in Abbildung KP3 exemplarisch anhand einiger Batchgruppen dargestellt.



**Abbildung KP3:** Gezeigt ist die empirische Annäherung der Farbe der Lichtverteilung im CIE  $x,y$  Farbraum an das ECE-R-Weißfeld für drei verschiedene Batches mit unterschiedlicher Sample-Anzahl (Punkte im Plot), bei sonst ähnlicher Parametrisierung. Die Variation von Batch 1 über Batch 2 zu Batch 3 hin zeigt die Prozesskontrollmöglichkeiten auf. Variationen innerhalb eines Batches sind ebenso ersichtliche. Hinweis: Da die Standardcharakterisierung mit einer anderen sekundären Optik erfolgte, als die in der finalen Applikation verwendete sekundäre Optik, ergeben sich im Plot Werte außerhalb des ECE-Weißfeldes. Der Abgleich erfolgte über Korrelationsmessungen.

Untersuchungen zur Belastbarkeit und deren Extrapolation zu noch höheren Leistungsdichten kann man exemplarisch in Abbildung KP4 sehen. Die blaue Linie in Abbildung KP4 „links“ zeigt bei bis zu 2000mA Laserstrom ein relativ lineares Verhalten im konvertierten Lichtstrom, wobei sich im Ansatz bei hohen Strömen eine Nichtlinearität erahnen lässt. Ein Betrieb bei noch höheren Strömen scheint möglich. Die rote Linie in Abbildung 4 „rechts“ zeigt bei Strömen  $\geq 1200\text{mA}$  ein deutliches Verlassen des linearen Lichtstroms vs. Laserdioden Vorwärts-Strom-Abhängigkeit. Auch hier scheint zu höheren Strömen hin noch etwas Spiel zu sein, jedoch weniger als bei dem vergleichbaren Konverter-Package. Im Laufe des Projektes hat sich herausgestellt, dass der Gewinn in Leuchtdichte und Spot-Confinement mit einem solchen Lichtstrom vs. Pumplicht-Abhängigkeit kompensiert werden muss. Ein Betrieb bei noch höheren Strömen ist möglich, erscheint jedoch je nach Effizianzforderungen nicht mehr als sinnvoll.



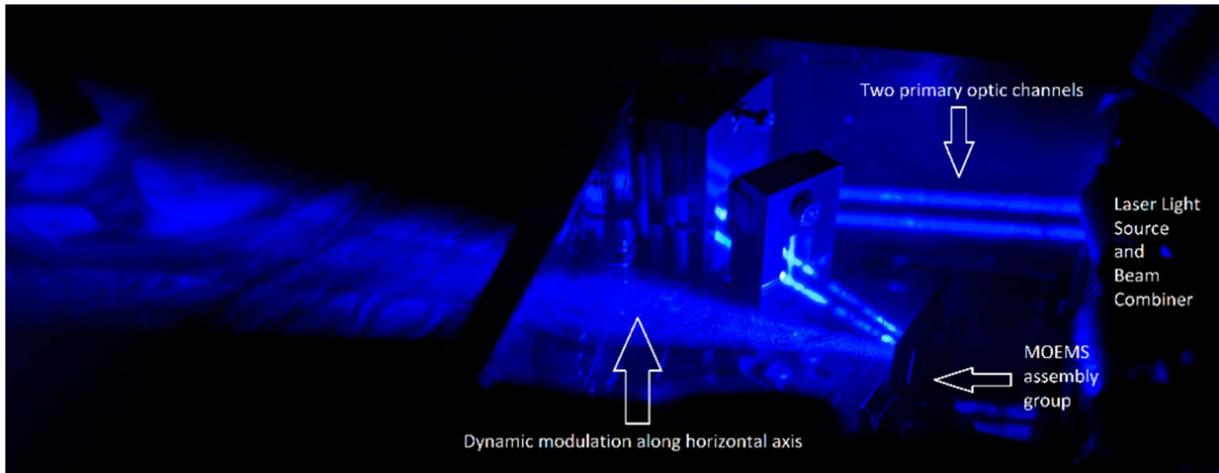
**Abbildung KP4:** Lichtstrom zweier verschiedener Konverter-Packages in einem Prototypen-Scanner. Zum Vergleich wurde nur das Konverter-Package gewechselt. Alle anderen Parameter des Prototypen's sind konstant gehalten. Auf der horizontalen Achse ist der Forward-Current der Laserdioden aufgetragen. Die vertikale Achse zeigt den relativen Lichtstrom gemessen in der Fernfeld-Applikationsziellichtverteilung. Der Typ des zum linken Bild gehörigen Konverter-Packages („blaue Kurve“) entspricht dem in Abbildung KP1 „links“ oder entsprechend Abbildung KP2 „blaue Linie“. Der Typ des zum rechten Bild („rote Kurve“) gehörigen Konverter-Packages entspricht dem in Abbildung KP1 „rechts“ oder entsprechend Abbildung KP2 „rote Linie“. Die beiden relativen Skalen „rechts“ und „links“ sind jeweils nur für den einzelnen Plot gültig.

## 2.7 Applikationsergebnisse der Prototypen

Im Laufe des Projektes wurden mehrere Prototypen aufgebaut. Der verwendete Bauraum ist von echten Scheinwerfer-Verhältnissen abgeleitet. In Abbildung A1 sind zwei Prototypen gezeigt.



**Abbildung A1:** Zwei iLaS-Prototypen bestehend aus Scanner-Einheit und Systemelektronik sowie Kühlkörper und Lüfter.



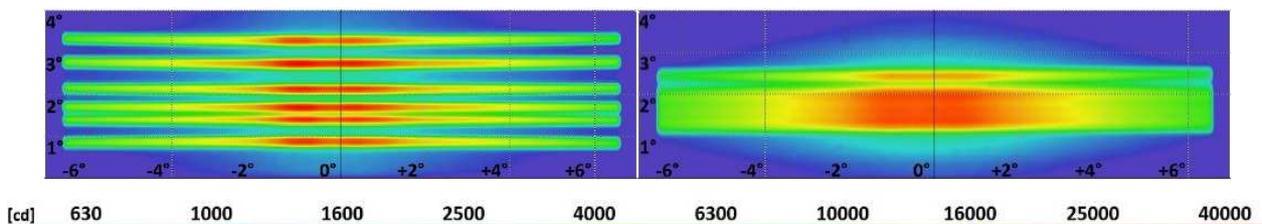
**Abbildung A2:** Blick in die Scanner-Einheit mit zwei laufenden blauen Laserkanälen. Im Strahlengang nach der „MOEMS assembly group“ ist die dynamische horizontale Modulation sichtbar als horizontal „aufgefächertes“ Lichtbündel. Hinweis: Die Sichtbarkeit der Strahlen wurde zu Illustrationszwecken für diese Aufnahme mit zusätzlichen Streupartikeln in der Luft erzeugt.

Abbildung A2 gibt Einblick in die optische Funktionalität der blauen Laserpumplichtstrahlung. Zu Beginn des Projektes war es für das Design und der Konstruktion der einzelnen technologischen Einheiten notwendig, einige Annahmen über den anvisierten Winkelbereich der Fernfeld-Lichtverteilung sowie der korrespondierenden optisch aktiven Konverter-Fläche zu treffen. Diese Parameter sind in Tabelle 1 aufgezeigt.

	Winkelbereich Fernfeld	Optisch aktive Konverter-Fläche
Horizontale Richtung (entlang Scan Richtung)	12° (-6° to +6°)	18mm
Vertikale Richtung (senkrecht zur Scan Richtung)	3° (-0.5° to +2.5°)	4.5mm

**Tabelle 1:** Zielparameter Winkelbereich der Fernfeldverteilung und Abmessung der Konverter-Fläche.

Zusammen mit diesen Annahmen wurde ein System mit sechs primär Optik-Kanälen aufgesetzt, wobei alle sechs Kanäle, durch den um eine Achse drehbaren Mikrospiegel (MOEMS = Micro-Opto-Electro-Mechanical-System), abgelenkt werden. Zusätzlich zum Kernthema der horizontalen Lichtmodulation ist ein kritischer Punkt in einem solchen Konzept die Justage und Anordnung der vertikalen Kanäle. Um diesen Sachverhalt zu erforschen, wurden zwei Konzepte verfolgt, deren Ergebnisse in Abbildung A3 zu sehen sind. Auf der linken Seite hat ein Konzept darauf abgezielt, möglichst scharfe vertikale Linien zu erzeugen, während es auf der rechten Seite das Ziel des komplementären Konzeptes war, eine möglichst homogene vertikale Lichtverteilung zu erzeugen. Für die gezeigten Charakterisierungsergebnisse wurde eine kommerzielle Abbildungsoptik verwendet.



**Abbildung A3:** Lichtstärkeverteilung der zwei im Text beschriebenen Konzepte. In Falschfarbendarstellung, 2-fach logarithmisch. Beide Lichtverteilungen beinhalten einen identischen Lichtstrom; LINKS: Maximale vertikale Linienbreite/-scharfe; RECHTS: Konzept mit optimierter, vertikaler Homogenität.

Die Parameter der beiden Konzepte bzgl. der beschriebenen Unterschiede sind in *Tabelle 2* gelistet. Eine Analyse der Ergebnisse von *Tabelle 2* zeigt, dass die Annahmen aus *Tabelle 1* iteriert werden könnten, um zu einem System zu gelangen, dass die Vorteile beider Konzepte vereinen.

	Volle vertikale Linienbreite (1/e <sup>2</sup> ) [°]	Max. Lichtstärke @ horizontales FOV 12° [cd]	Max. Lichtstärke @ horizontales FOV 4° [cd]	Vertikale Homogenität, "Max. zu Min." Absenkung [%]
Konzept "scharfe vertikale Linien"	0.29	43500	133000	91
Konzept "Maximale vertikale Homogenität"	0.68	18500	57000	21

**Tabelle 2:** Parameter ermittelt aus den Messungen der beiden im Text beschriebenen Konzepte. Alle Werte sind jeweils gemittelt über alle sechs Kanäle je Konzept.

Ein weiteres, wichtiges Thema während des iterativen Prototypen-Aufbauprozesses ist die Evaluierung und die Messung der Effizienzketten. Systemleistungsniveaus und zugehörige Effizienzen sind in *Tabelle 3* aufgeführt.

	Optische Leistung blau [W]		Primär Optik Effizienz [%]	Kugel-Lichtstrom Konverter-Package-Out [lm]	Konverter Effizienz [lm/W]
	Laserdiode	Konverter			
Durchschnitt sechs Kanäle	2.8	2.1	75	320	160
Summe sechs Kanäle	16.5	12.5	n.a.	1920	n.a.

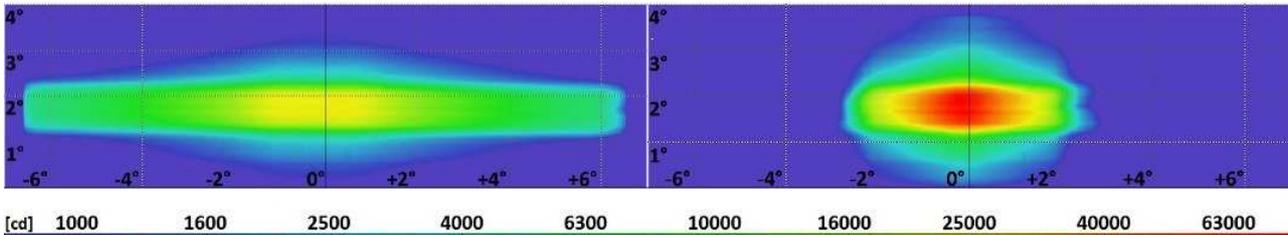
**Tabelle 3:** System-Effizienzketten für einen iLaS-Scanner-Prototypen von Laserdioden-Output hin zu Konverter-Package-Output. Alle Werte stammen von einem Prototypen. Umgebungstemperatur, Laserdioden und thermisches Interface bei 25°C.

Die erfolgreiche Realisierung von über 70% Effizienz der Primäroptik zeigt den Fortschritt bei der Laserstrahlführung über die optischen Elemente inklusive der MOEMS-Baugruppe. Fast 2000lm Ulbrichtkugel-Lichtstrom des Konverter-Packages ist nach unserem Wissensstand einer der höchsten bisher in einer Automotive-LARP-Anwendung gemessenen Werte. Auch die damit verbundene absolute thermische Belastung gehört zu den Höchsten uns bekannten.

Zu den in den Prototypen erreichten und visualisierten „unique selling point features“ gehören:

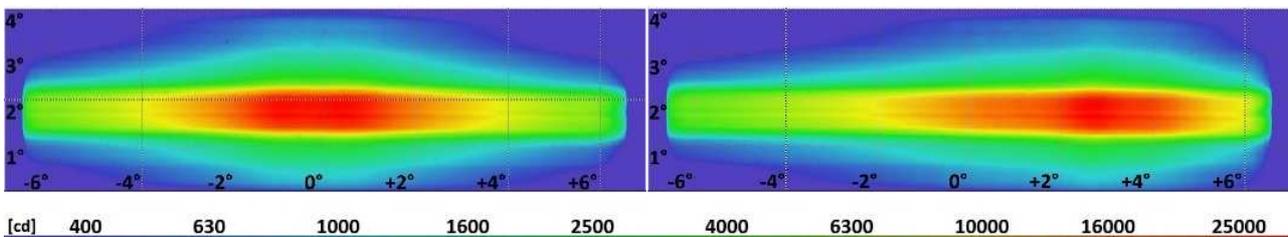
- Leistungsneutrale Kontrolle der Lichtstärke
- Leistungsneutrale Umschichtung von Licht (ohne dynamische Kontrolle der Lichtstärke)
- Kontinuierliche, analoge und horizontale Positionierung einer (oder mehrerer) Ausblendzonen

Die leistungsneutrale Kontrolle der Lichtstärke erlaubt die Ansammlung oder die Verteilung einer bestimmten Lichtmenge in einem gewünschten Raumwinkel. Das ist in *Abbildung A4* dargestellt. Der horizontale Winkelbereich der Lichtverteilung wird grob um einen Faktor 3 geändert. Der totale Lichtstrom in der Lichtverteilung bleibt gleich, während er aber in einem der beiden Fälle in einem kleineren Winkelbereich gesammelt wird und damit eine deutlich höhere Lichtstärke realisierbar ist.



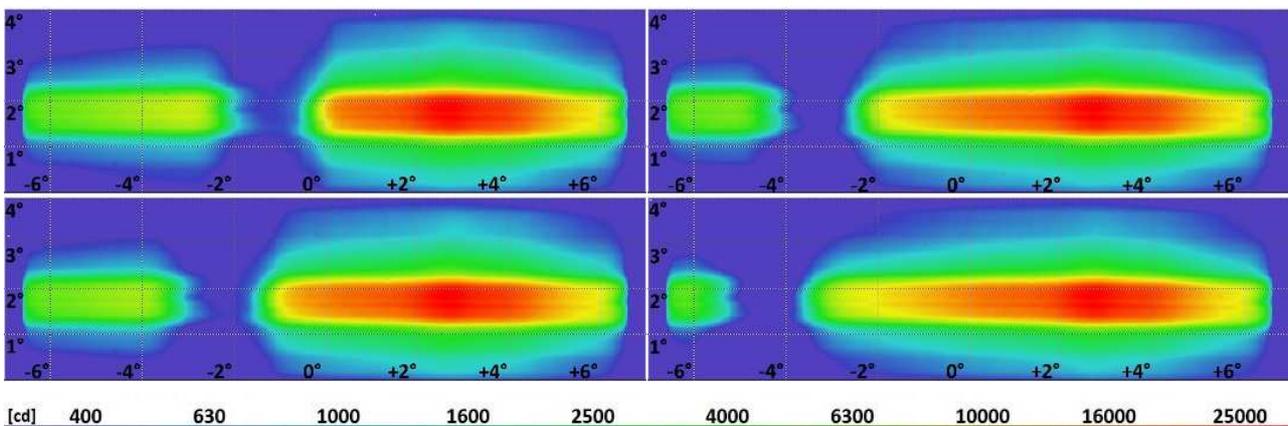
**Abbildung A4:** Lichtstärkeverteilungen in Falschfarben-Darstellung. LINKS: Standard-Lichtverteilung mit breiter horizontaler Verteilung. RECHTS: Autobahn-Modus mit schmaler horizontaler Verteilung. Beide Lichtverteilungen beinhalten denselben totalen Lichtstrom.

Die leistungsneutrale Umschichtung von Licht erlaubt es, das Maximum der Lichtverteilung oder die gesamte Lichtverteilung an sich, innerhalb der Systemgrenzen zu verschieben. Dadurch kann beispielsweise die Funktion des Kurvenlichtes wie in ECE-R 123 definiert, realisiert werden. Ein Beispiel für eine kontinuierliche Umschichtung des Maximums ist in Abbildung A5 gezeigt. Während der gesamte Lichtstrom in der Lichtverteilung konstant bleibt, wird der Lichtschwerpunkt von  $H=0^\circ$  nach  $H=+3^\circ$  verschoben, ohne Laserdioden-Leistung an der Quelle AN oder AUS zu schalten oder eine Dimmung der Lichtquelle vorzunehmen.



**Abbildung A5:** Lichtstärke-Verteilung in Falschfarben-Darstellung. LINKS: Standard-Lichtverteilung mit Lichtschwerpunkt bei  $H=0^\circ$ . RECHTS: Standard Lichtverteilung mit Lichtschwerpunkt bei  $H=+3^\circ$ . Beide Lichtverteilungen beinhalten den gleichen Gesamtlichtstrom.

Kontinuierliche, analoge und horizontale Positionierung einer (oder mehrerer) Ausblendzonen kann im gesamten horizontalen Winkelbereich erreicht werden. Das vom Beobachter wahrgenommene, digitale Schalten in der Lichtverteilung von marktüblichen LED-Systemen mit wenigen Pixeln kann dadurch vermieden werden. Eine exemplarische Reihe an Abbildungen mit einer Ausblendzone ist in Abbildung A6 zu sehen.



**Abbildung A6:** Von der Lichtverteilung OBEN LINKS aus bis zu Lichtverteilung UNTEN RECHTS, ist die Ausblendzone in Schritten von  $1^\circ$  verschoben. Alle Lichtverteilungen beinhalten den Gleichen gesamten Lichtstrom. Hinweis: Die Darstellung ist in Bezug auf die Winkelschrittweite exemplarisch. In der realen Anwendung ergibt sich ein kontinuierlicher, sanfter Übergang, der aber mit einzelnen Bildern hier nicht darstellbar ist.

## 2.8 Applikationsergebnisse der Prototypen im Dauertest

Neben der lichttechnischen Charakterisierung der kompletten Module, inklusive des Converter-Packages, wurde auch eine erste Abschätzung der Langlebigkeit der verbauten Materialien und Komponenten gemacht. Dazu wurde ein Scanner (SC\_0010) mit allen sechs Kanälen auf 100 % Laser-Leistung in einem Dauerversuch im Labor über mehrere Monate betrieben.



**Abbildung A7** Lebensdauertest nach ca. 1250h Laser-Dauerbetrieb (wird fortgeführt)

Nach ca. 1250h im Einsatz, zeigten sich in diesem Versuch keinerlei Ausfälle an den sechs Laserdioden. Am MEMS-Spiegel wurde die Temperatur permanent detektiert. Hier wurden nach anfänglichem Anstieg schließlich ein Gleichgewicht und ein stabiler Betrieb über die komplette Dauer beobachtet. Am verwendeten Converter konnten sowohl visuell als auch lichttechnisch (Leuchtdichte im Fernfeld) keinerlei Veränderungen bei den Zwischen- bzw. Endmessungen des Dauerbetriebs festgestellt werden.

Dieser Langzeitversuch wird noch über das Projektende hinaus bei OSRAM in Herbrechtingen fortgeführt.

## 2.9 Applikationsergebnisse der Prototypen im Versuchsfahrzeug (Audi Q7)

Ziel der Integration der Demonstratoren in ein Versuchsfahrzeug war es, die Evaluierung der neuen Technologie unter realen Umweltbedingungen zu testen. In mehreren Nachtfahrten mit dem AUDI Q7 konnte die Funktionalität der iLaS-Scanner und die Erlebbarkeit gezeigt werden.



**Abbildung A8:** Impressionen einer Nachtfahrt mit dem zentralen Bereich des Laser-Scanners für das adaptive Fernlicht (oberer Kasten; hier ohne LED-Matrix) und der Vorfeldbeleuchtung mit LED-Grundlicht (unterer Kasten); Farbort des Converter-Batches ist bewusst blau gewählt

Im Versuchsfahrzeug wurden bis Projektende zwei verschiedene Scanner-Paare mit unterschiedlichem Reifegrad verbaut (Umbau im Sommer 2017), wovon das erste Paar (Scanner SC\_0004 und SC\_0005) ca. 21.000km ohne technische Mängel (wie z.B. Dejustage) überstanden hat. Bei diesen beiden Scannern waren die Laser ca. 250h in Betrieb und zeigten ebenfalls keine Veränderungen im Lichtbild.

Diese Zahlen sind ein Beweis für das robuste mechanische Design der iLaS-Module. Die Funktionalität aller Bauteile unter realen Umweltbedingungen (inkl. einer Kaltlandfahrt in Schweden) und der Tauglichkeit des Ansatzes für Automotive Anwendungen ist somit gezeigt.

## 2.10 Realisierte Prototypen der Laser-Light-Engine bzw. der aufgebauten iLaS-Module

Im Rahmen des Projekts wurden bei OSRAM in Summe 16 Laser-Light-Engines aufgebaut bzw. mit Unterstützung der Partner zu kompletten iLaS-Modulen assembliert. In dieser Zählweise sind von den insgesamt 16 Demonstratoren fünf überarbeitete Scanner enthalten, die dabei iterativ wesentliche Verbesserungen erfuhren, da Kernkomponenten ausgetauscht oder qualitativ verbessert wurden.

Alle Partner innerhalb des iLaS-Konsortiums (Audi, Bosch, KIT, OSRAM und ZKW) verfügen nach Projektabschluss über mindestens einen kompletten, voll funktionsfähigen Aufbau mit Sekundäroptik, Laser-Light-Engine (inklusive 1D-MEMS und Konverter) plus Elektronik mit Kühleinheit und Ansteuer-Software.

## 3 Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung.

Durch die aufwendigen und vorher nicht abschätzbaren Aufwände bei den Themenkomplexen Justage- und Fügetechnik, sowie umfangreiche Konverter-Package-Untersuchungen sind inzwischen bei OSRAM Mehrkosten angefallen, die über die ursprüngliche Planung hinausgehen. OSRAM hat diese Mehrkosten aus eigener Motivation und Verantwortung heraus getragen.

Aufgrund der aufwendigen Justage- und Fügetechnik wurde im Laufe des Projekts auch die Priorität auf iterative Verbesserungen gesetzt, anstatt mehrere identische Muster zu erstellen. Infolgedessen weisen die beiden Tischmuster (Halbzeitmeilenstein) und die Prototypen SC\_0001, SC\_0002, SC\_0003, SC\_0004 und SC\_0005 bzw. SC\_0006 bis SC\_0014 unterschiedliche Entwicklungsstände auf. Der Fortschritt und die Schritte dieses iterativen Prozesses wurden eng mit den Partnern abgesprochen und abgestimmt.

## 4 Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert?

Die für die Demonstratoren ursprünglich anvisierte volle Low-Beam/ High-Beam-Lichtverteilung ist unter den Voraussetzungen, die mit den Partnern diskutiert wurden, nicht mit sinnvollem Aufwand realisierbar gewesen. Daher wurde im Laufe des Projekts das Field of View auf den zentralen Fernlichtbereich beschränkt und das optische Konzept auf ein „1D-Curtain“-Scanning-Prinzip geändert.

Des Weiteren war ursprünglich geplant, optische Fasern zur Trennung von Lichtquelle und Lichtaustrittsfläche/ Modul zu untersuchen. Davon wurde aufgrund von Überlegungen bzgl. der Sicherheitskonzepte und logistischer Themen im Fahrzeug abgesehen.

Aufgrund des unerwarteten höheren Aufwands und der komplexen iterativen Vorgehensweise in der Justage- und Fügetechnik und dem damit verbundenen Aufwand, die grundsätzlichen Machbarkeitsthemen eines solchen neuartigen Systems an sich darzustellen, rückte der Unterpunkt „Realisierung einer sensorbasierten Absicherung des Scheinwerfers“ aus Arbeitspaket 2.5 in der Evolution des Projektes in den Hintergrund und wurde nicht realisiert. Das Sicherheitskonzept wurde reduziert auf die MEMS- und Systemelektronik-Funktionen.

**5 Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?**

Parallel zum iLaS-Projekt sind die ebenfalls BMBF-geförderten Projekte „μ-AFS“ und „VoLiFa2020“ mit verwandten lichttechnischen Zielen durchgeführt worden und inzwischen auch abgeschlossen. Darüber hinaus sind uns keine weiteren FE-Ergebnisse bekannt.

**6 Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?**

s. Kommentar zu Punkt 4

**7 Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans:**

7.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Patent Anmeldungen:

	Patentnummer (Offenlegung / Anmeldung)	Anmelde-Titel	Anmeldung
1	DE10 2015 207 560	Beleuchtungsvorrichtung mit Halbleiter-Primärlichtquellen und mindestens einem Leuchtstoffkörper	24.04.2015
2	DE10 2015 106 312	Beleuchtungsvorrichtung mit Halbleiter-Primärlichtquellen und mindestens einem Leuchtstoffkörper	24.04.2015
3	10 2016 205 506.2	HALTEVORRICHTUNG FÜR EIN OPTISCHES ELEMENT	04.04.2016
4	10 2016 207 780.5	KOMBINIERVORRICHTUNG FÜR STRAHLUNGEN UND VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG EINER KOMBINIERVORRICHTUNG	04.05.2016
5	10 2016 209 001.1	HALTEVORRICHTUNG FÜR EINE LICHEMITTIERENDE DIODE UND FÜR EINE LINSE UND VERFAHREN ZUR JUSTAGE	24.05.2016
6	10 2015 213 389.3	Spiegelanordnung für eine Beleuchtungseinrichtung und Beleuchtungseinrichtung mit Spiegelanordnung	16.07.2016
7	10 2016 214 513.4	BELEUCHTUNGSVORRICHTUNG	05.08.2016
8	10 2016 217 008.2	BELEUCHTUNGSEINRICHTUNG	07.09.2016
9	10 2016 216 995.5	OPTISCHES BAUTEIL, VERWENDUNG DES OPTISCHEN BAUTEILS UND OPTISCHES SYSTEM	07.09.2016
10	<u>10 2017 104 128.1</u>	KONVERSIONSELEMENT, OPTOELEKTRONISCHES BAUELEMENT UND VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG EINES KONVERSIONSELEMENTS	28.02.2017
11	DE10 2017 223 369.9	Halter für die aktive Justage von Laserdioden-Submounts	20.12.2017

**Tabelle 4:** Schutzrechtsanmeldungen von OSRAM



## 7.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Aufgrund der beobachteten Komplexität einerseits und auch der immer noch unklaren Zielspezifikation der potentiellen Kunden andererseits (hinsichtlich Applikationen, Performance, Kosten, etc.), wird bei OSRAM das Thema nur im Falle von konkreten / spezifischen OEM-Projekten weiterverfolgt. Dazu laufen im Moment aktuell noch Kundenbefragungen. Dieser Prozess ist noch nicht abgeschlossen.

## 7.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

s. Kommentar zu Punkt 7.2

## 7.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

s. Kommentar zu Punkt 7.2

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  iLaS - Laserbasierte Hochluminanz-Lichtquelle mit dynamischer Leuchtdichteverteilung für adaptive Scheinwerfer-Systeme (Teilvorhaben zum Verbundprojekt: „Intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer“)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Dr. Oliver E. Woisetschläger Dr. Jürgen Hager	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2017
	6. Veröffentlichungsdatum Geplant zum 31.3.2018
	7. Form der Publikation TIB
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  OSRAM GmbH Marcel-Breuer-Straße 6 80807 München	9. Ber. Nr. Durchführende Institution —
	10. Förderkennzeichen 13N13088
	11. Seitenzahl 17
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben —
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 19
16. Zusätzliche Angaben  —	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) geplant zum 31.03.2018: TIB (Leibniz Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften Universitätsbibliothek) Welfengarten 1B 30167 Hannover	
18. Kurzfassung 1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik: Der Einsatz von Laserdioden als Lichtquelle im Fahrzeugbau wurde von einigen Fahrzeugherstellern wie BMW und Audi in der Zwischenzeit zur Serienreife gebracht (z.B. seit 2016 im 7er BMW). Diese Technologie wird hierbei für die Funktion eines statischen Zusatzfernlichtes verwendet. 2. Begründung/Zielsetzung der Untersuchung: Für statische und insbesondere dynamische Vollscheinwerfer ist die Technologie aufgrund der deutlich höheren und anderen Leistungs-, Optik- und Temperaturanforderungen aktuell nicht verfügbar. Um in diese neuen Anwendungsbereiche vorzudringen sind die Projektergebnisse des iLaS-Projekts weiterhin von fundamentaler Bedeutung. 3. Methode und Ergebnisse: Es wurden mehrere Demonstratoren mit blauer Laser-Light-Engine mit bis zu 17W optische Leistung und einem MEMS-Spiegel zur horizontalen Ablenkung aufgebaut. Zwei optischen Konzepte, eine hochsensible Justage- und Fügetechnik und der Prozess des verzugsfreien Laserschweißens wurden entwickelt. 4. Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten Zwei Scanner-Paare wurden in ein Versuchsfahrzeug verbaut. Ein Paar überstand dabei ca. 21.000 km ohne technische Mängel (wie z.B. Dejustage). Bei diesen beiden Scannern waren die Laser ca. 250h in Betrieb und zeigten ebenfalls keine Veränderungen im Lichtbild und sind somit Beweis für ein robustes Design für AM Anwendungen.	
19. Schlagwörter LARP; Automotive; Laser; Adaptive Driving Beam; iLaS; BMBF; Scheinwerfer	
20. Verlag  —	21. Preis  —

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title  iLaS – laser based high luminance light source with dynamic distribution of brightness for adaptive spotlight-systems  (Part of joint research project: Intelligent laser light for compact and high definition adaptive spotlights)	
4. author(s) (family name, first name(s))  Dr. Oliver E. Woisetschläger Dr. Jürgen Hager	5. end of project 30.09.2017
	6. publication date planned per 31.03.2018
	7. form of publication TIB
8. performing organization(s) (name, address)  OSRAM GmbH Marcel-Breuer-Strasse 6 80807 München	9. originator's report no. —
	10. reference no. 13N13088
	11. no. of pages 17
12. sponsoring agency (name, address)  German Federal Ministry for Education and Research (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references —
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 19
16. supplementary notes  —	
17. presented at (title, place, date) planned per 31.03.2018 TIB (Leibniz Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften Universitätsbibliothek) Welfengarten 1B 30167 Hannover	
18. abstract 1. Current State-of-the-art: The use of laser diodes as a light source in vehicle construction has meanwhile been brought to series production readiness by some vehicle manufacturers, such as BMW and Audi (for example, in the BMW 7 Series since 2016). This technology is used here for the function of a static additional high beam. 2. Reasoning / Target of Project For static and especially dynamic full headlamps, the technology is currently not available due to significantly higher and different power, optics and temperature requirements. In order to penetrate these new areas of application, the project outcomes of the iLaS project continue to be of fundamental. 3. Method and results Several demonstrators with blue laser light engine with up to 17W optical power and a MEMS mirror for horizontal deflection were built up. Two optical concepts, a highly sensitive adjustment and joining technique and the process of distortion-free laser welding have been developed. 4. Conclusion Two pairs of scanner were installed in a test vehicle. One pair survived approximately 21,000 km without technical defects (such as misalignment). With these two scanners, the lasers were in operation for about 250 hours and also showed no changes in the light image and are thus proof of a robust design for AM applications.	
19. keywords LARP; Automotive; Laser; Adaptive Driving Beam; iLaS; BMBF, Spotlight	
20. publisher —	21. price —