

## Abschlussbericht

<b>ZE: AUDI AG</b>	<b>Förderkennzeichen: 13N13086</b>
<b>Vorhabenbezeichnung:</b>	<b>Intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer – iLaS</b>
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	<b>01.08.2014 – 30.09.2017</b>
<b>Berichtszeitraum:</b>	<b>01.08.2014 – 30.09.2017</b>

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Kurzdarstellung.....	4
1.1 Aufgabenstellung.....	4
1.2 Voraussetzungen.....	6
1.3 Planung und Ablauf .....	6
1.4 Ausgangspunkt.....	8
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	9
2. Eingehende Darstellung .....	11
2.1 Ergebnisse des Forschungsvorhabens .....	11
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	20
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	20
2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	20
2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	21
2.6 Veröffentlichungen des Ergebnisses .....	22

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Darstellung des Systemaufbaus mit relevanten Schlüsselthemen .....	5
Abbildung 2: Schematische Darstellung des geplanten Lichtsystems .....	5
Abbildung 3: iLaS-Verbundpartner .....	9
Abbildung 4: iLaS Funktionsprinzip .....	11
Abbildung 5: Homogenität Synthetischer Matrix-Beam (MxB) .....	12
Abbildung 6: Konzeptdarstellung Auslegung Leuchtdichtevertelung auf den Konverter .....	13
Abbildung 7: Darstellung von verschiedenen Konzepten zur Modulaufteilung .....	13
Abbildung 8: Proband mit Interviewer (links) und Bachelorand (rechts) .....	14
Abbildung 9: Streckenplan Testszenarien .....	15
Abbildung 10: Hindernis LKW (links) und Leitpfosten (rechts) .....	15
Abbildung 11: Ergebnisse Testfahrten Hindernis (links) und Leitpfosten (rechts) .....	15
Abbildung 12: Laser-Schlusslicht .....	16
Abbildung 13: Finale Topologie des Demonstratorfahrzeugs .....	17
Abbildung 14: Simulierte Leuchtdichtevertelungen .....	18
Abbildung 15: Bewertungskurve zur Differenzierung von Leuchtdichteunterschieden .....	18
Abbildung 16: Gradienten-Analyse nach dem optischen Konzept "klare Linien" .....	19
Abbildung 17: Gradienten-Analyse nach dem optischen Konzept "Homogenität" .....	19

# 1. Kurzdarstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Gemäß dem Jahresbericht des Deutschen Verkehrssicherheitsrats (DVR) aus dem Jahr 2011 sind die Unfallzahlen auf deutschen Straßen in den letzten zehn Jahren um 25 % gesunken. Gleichzeitig konnten durch die Einführung aktiver und passiver Sicherheitselemente in den Fahrzeugen der Insassenschutz und damit auch die Zahl der verunglückten Personen im Straßenverkehr deutlich gesenkt werden. Gemessen am Fahrzeugaufkommen stellt der überdurchschnittlich hohe Anteil an Unfällen bei schlechten Sichtverhältnissen, speziell in der Dämmerung und bei Nacht, eine besondere Herausforderung dar. Ungefähr die Hälfte aller tödlichen Verkehrsunfälle ereignet sich nachts, obwohl hier nur etwa ein Viertel des Gesamtverkehrsaufkommens anfällt. Um die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen, müssen insbesondere die Beleuchtungssysteme hinsichtlich Leuchtdichte und Ausleuchtungs-genauigkeit weiter verbessert werden, um optimale Sichtverhältnisse für den Autofahrer und eine bestmögliche Wahrnehmung des Verkehrs durch alle Verkehrsteilnehmer zu ermöglichen. Über die Nutzbarmachung der höheren Leuchtdichte und damit verbundenen Auflösungsmöglichkeiten von Laser-Weißlicht ließe sich eine noch exaktere Ausleuchtung des Verkehrsraums gewährleisten.

Mit der Lasertechnologie können Leuchtdichten erzielt werden, die um den Faktor zehn größer gegenüber der LED-Technologie sind und somit kompaktere und effizientere Optiken erlauben. Zusammen mit der geringen Strahldivergenz des unkonvertierten blauen Laserlichts führt dies dazu, dass das Laserlicht effizient über faseroptische Leiter zum Scheinwerfer geführt werden kann. Die daraus resultierende Trennung von Lichtquelle und Lichtaustrittsstelle im Fahrzeug bietet gegenüber heutigen Lösungen den Vorteil zur Umsetzung sehr kleiner und äußerst kompakter Scheinwerfer. Neben der Platzierung der Lichtquelle in einem Fahrzeugbereich mit weniger kritischen Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur, Feuchtigkeit) und dem damit verbundenen effizienteren Betrieb der Lichtquelle ergeben sich durch diese Bauraumreduzierung folgende Vorteile:

- Verbesserter Fußgängerschutz
- Reduzierung des vorderen Fahrzeugüberhangs und somit Erhöhung der Fahrstabilität
- Vergrößerung des Fahrgastraums

Mit dem Verbundprojekt iLaS (intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer) sollten die Grundlagen für den Aufbau eines neuartigen, mechanikfreien Scheinwerfersystems erforscht werden, das über den Einsatz eines scannenden Systems im Fern- und Abblendlichtbereich eine auf die jeweilige Situation („situativ“) intelligente und anpassbare („variable“) Ausleuchtung des Straßenraums ermöglicht. Hierfür wurden folgende zentrale Arbeitsziele festgelegt:

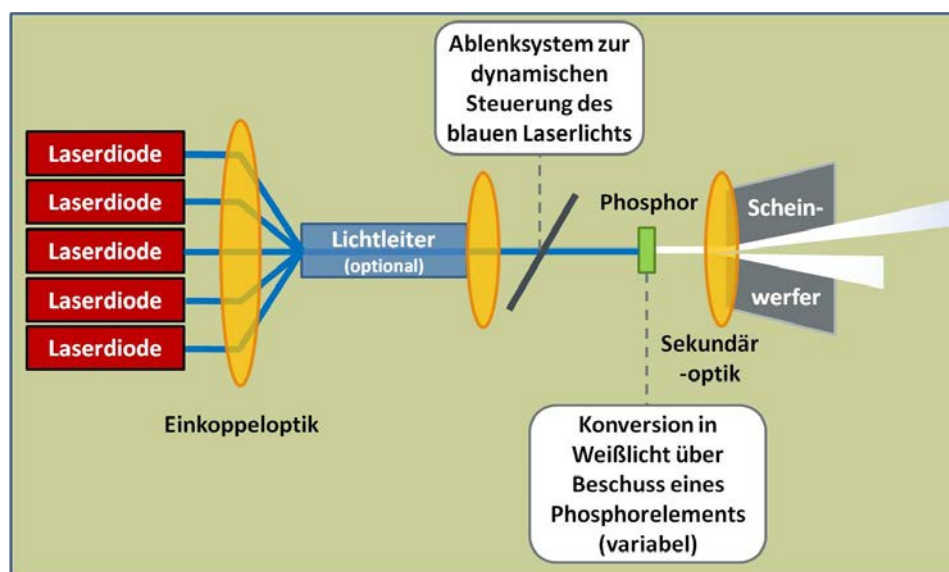
- Effektives Thermomanagement für eine Laser-Weißlichtquelle innerhalb geschlossener Fahrzeugstrukturen
- Effektives Thermomanagement für Phosphorelemente innerhalb geschlossener Fahrzeugstrukturen bzw. an der Lichtaustrittsstelle im Scheinwerfer
- Erforschung des optimalen Auflösungsvermögens eines adaptiven und blendfreien Abblend- sowie Fernlichts und Umsetzung in einem mechanikfreien Scheinwerfer
- Dynamische Synchronisation elektrischer und optischer Systeme
- Entwicklung adaptiver (intelligenter) Lichtfunktionen, welche nur oder insbesondere mit einem solchen neuartigem System darstellbar sind

Abbildung 1 zeigt den Systemaufbau mit relevanten Schlüsselthemen.



**Abbildung 1: Darstellung des Systemaufbaus mit relevanten Schlüsselthemen**

Um eine bessere Vorstellung des geplanten Lichtsystems zu bekommen ist es in nachfolgender Abbildung 2 schematisch dargestellt.



**Abbildung 2: Schematische Darstellung des geplanten Lichtsystems**

Die erarbeiteten Ergebnisse sollten schließlich in einen Gesamtdemonstrator zur Umsetzung und Validierung der neuartigen Lichtfunktionen integriert werden.

Zusätzlich galt es, Licht- bzw. Komfortfunktionen wie etwa Markierungs- oder Kennzeichnungsbilder im Nahbereich zu erarbeiten, im Rahmen von physiologischen Untersuchungen zu prüfen und in das Tisch- sowie das Fahrmuster zur Validierung im Rahmen von Tests und Probandenstudien mit einzubeziehen.

Bei erfolgreichem Abschluss des Vorhabens und dem Nachweis zur Einsetzbarkeit dieses innovativen Ansatzes wäre der Grundstein für eine Markteinführung im Automobilsektor gelegt. Damit besäße Deutschland gegenüber der asiatischen und nordamerikanischen Konkurrenz einen langjährigen Wettbewerbsvorteil hinsichtlich des Einsatzes von Laserlichttechnologie für Beleuchtungsfunktionen und Lichtsysteme von Fahrzeugen. Für die AUDI AG als Antragsteller dieses Teilvorhabens ist es daher von zentraler Bedeutung, seine Erfahrungen im Bereich der Lichtentwicklung aus vorangegangenen Projekten mit in das Verbundvorhaben einzubringen.

Darüber hinaus ergibt sich für Audi bei einer erfolgreichen Umsetzung des Vorhabens die Möglichkeit, das markeneigene Lichtdesign basierend auf dem Einsatz von Laserlicht weiter zu entwickeln und so den technologischen Fortschritt mit einer für das Unternehmen als Innovationsträger charakteristischen Designentwicklung zu verknüpfen. Diese Entwicklung wird die Marktdurchdringung dieses neuartigen Lichtansatzes vor allem im Premiumsegment weiter befördern.

## 1.2 Voraussetzungen

Design und äußeres Erscheinungsbild moderner Fahrzeuge spielen bei der Kaufentscheidung des Kunden eine zentrale Rolle. Die Automobilindustrie versucht deswegen über die Hervorhebung zentraler markenspezifischer Designmerkmale, das eigene Produkt im Verhältnis zu anderen Fahrzeugen beim Kunden kenntlich zu machen und über die Polarisierung den Kunden an sich zu binden. Dies gelingt immer häufiger über die Formensprache der Scheinwerfer und Heckleuchten, die ein wichtiges Merkmal des Fahrzeugcharakters sind. In steigendem Maße wird vom Käufer auch der technologische Entwicklungsstand sowie der Innovationsgrad eines Neufahrzeugs mit in die Entscheidung einbezogen. Gerade im Bereich der Lichttechnik und des Lichtdesigns lassen sich diese beiden Faktoren verbinden. Hier hat zuletzt die Entwicklung der LED - Technologie und deren Integration in die Fahrzeugbeleuchtung zu großen Innovationsprüngen beigetragen, die auch das Design der Fahrzeuge entscheidend beeinflusst hat.

Mit der Laserlicht-Technologie kann nun der nächste erfolgreiche Schritt in der Entwicklung der Lichttechnologie und des Lichtdesigns begangen werden. Für die variable Lichtverteilung im Zusammenhang mit Laserlicht-Technologie existieren bisher keine Vorarbeiten. Insbesondere die von den Verbundpartnern mit dem Projekt angestrebte Zusammenführung der intelligenten Lichtsteuerung mit einer variabel abbildbaren, laserbasierten Weißlichtquelle stellt im Automobilbereich einen innovativen Ansatz dar, der heutige elektromechanische Systeme vollständig ablösen könnte.

Die Option, Laserlicht zeitlich und mit entsprechendem Ablenkssystemen auch räumlich schnell variieren zu können, wird zusammen mit der weiteren Entwicklung der Halbleitertechnologie dazu führen, die Effizienz des optischen Gesamtsystems zu erhöhen.

## 1.3 Planung und Ablauf

Um eine erfolgreiche Umsetzung des Verbundvorhabens iLaS zu gewährleisten, wurden fünf Arbeitspakete geschnürt. Nachfolgend sind alle Arbeitspakete aufgeführt, an denen die AUDI AG aktiv beteiligt war. Eine detaillierte Beschreibung der Arbeiten erfolgt in 2.1.

### Arbeitspaket 1 – Vorgaben und Spezifikation

- *AP 1.1 – Erarbeitung Spezifikationen für Einsatz Laserlichtquelle im Fahrzeug*  
Die AUDI AG hat sich in diesem Arbeitspaket um die Identifikation der nötigen Anforderungen für den Einsatz eines Laser-Phosphor-basierten Scheinwerfermoduls im Automobil gekümmert. Dabei standen insbesondere die optischen Anforderungen in Bezug auf Kontrast, Lichtverteilung und Farbtemperatur im Mittelpunkt.
- *AP 1.2 – Spezifikation Laser-basiertes adaptives Beleuchtungssystem*  
Neben den Spezifikationen für die allgemeine Anwendung einer Laserlichtquelle im Fahrzeug hat die AUDI AG zusammen mit den Verbundpartnern Bosch und OSRAM die mechanischen, optischen, thermischen und elektrischen Schnittstellen des Laser-Phosphor-Moduls zum Scheinwerfer bzw. zum Fahrzeug untersucht und festgelegt.

### Arbeitspaket 2 – Systemkonzeption und Systemaufbau

- *AP 2.5 – Systemauslegung und Systemoptimierung*  
Audi hat sich in diesem Arbeitspaket mit dem thermischen Design zur Entwärmung des Leuchtstoffs, des Pumpmoduls sowie des Ablenksystems inklusive der Schnittstelle zum Scheinwerfer und zum Fahrzeug befasst.

- *AP 2.6 – Anfertigung von Demonstrator-Einheiten*

Basierend auf den Ergebnissen der Arbeitspakete zur Systemauslegung und zum Aufbau des Ablenksystems wurden in diesem Arbeitspaket entsprechende Tisch- und Fahrmuster für die Tests und Validierungsaufgaben hergestellt. Die AUDI AG zeigte sich hier vornehmlich für die Darstellung eines kompletten adaptiven Laser-Fernlicht-Demonstrators zur Integration in den Scheinwerfer verantwortlich.

#### Arbeitspaket 3 – Design und Aufbau Ablenkssystem

- *AP 3.1 – Erstellung Spiegelkonzept mit MEMS Mikro -Spiegeln*

Audi hat in diesem Arbeitspaket den Prozess zur Klärung der technischen und funktionalen Randbedingungen begleitet. Hierzu zählen vor allem die Anforderungen und Vorgaben hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Bauraums, die Analyse der thermischen Umgebung sowie die Berücksichtigung der gesetzlich vorgegebenen Lichtverteilung bzw. Lichtleistung.

#### Arbeitspaket 4 – Physiologische Studien und Simulationen

- *AP 4.1 – Physiologische Parameter*

Audi hat im Rahmen der Arbeiten zum Arbeitspaket 4.1 einen Beitrag zur Definition des Anforderungsprofils geleistet, wie beispielsweise Auflösung oder Öffnungswinkel sowie Aufsetzwinkel. Zudem wurde, basierend auf den vorliegenden Ergebnissen, eine Aussage zur programmseitigen Umsetzbarkeit geliefert.

- *AP 4.2 - Komfortfunktionen*

Die AUDI AG hat hier die seitens des Verbundpartners KIT durchgeführte Analyse der in Arbeitspaket 5.1 definierten Lichtfunktionen hinsichtlich Sinnhaftigkeit sowie ihrer physiologischen Wirkung und ihres Störpotenzials im Verkehrsraum unterstützt. Parallel hat Audi in Vorbereitung auf die Erstellung möglicher neuer Zulassungskonzepte die Genehmigungsfähigkeit der definierten Lichtfunktionen innerhalb der Economic Commission for Europe (ECE) geprüft.

- *AP 4.3 - Validierung*

In diesem Arbeitspaket hat sich Audi an der Untersuchung der Fähigkeiten und Akzeptanz des Prototypen im Probandenversuch sowie am Vergleich mit einem anerkannten Seriensystem, beispielsweise LED Matrix-Scheinwerfer oder Vario LED- bzw. Xe - System, beteiligt.

#### Arbeitspaket 5 – Systemintegration und Validierung

- *AP 5.1 – Spezifikation und Konzeptdefinition*

Für die Untersuchung möglicher neuer Komfortfunktionen hat die AUDI AG neuartige Lichtfunktionen entwickelt und in einem ersten Schritt virtuell dargestellt.

- *AP 5.2 – Messung Laserschutzklasse (LSK) und Zulassungskonzept*

Audi hat in diesem Arbeitspaket die messtechnische Ermittlung möglicher Gefährdungen im „in Ordnung-Fall“ und „nicht in Ordnung-Fall“ unter Berücksichtigung der DIN EN 62471 sowie DIN EN 60825 für die Definition geeigneter mechanischer sowie elektronischer Absicherungsmaßnahmen unterstützt. Hierfür wurden entsprechende Fahrzeugsensordaten in das System mit eingebunden, die eine sichere Abschaltung z.B. im Crash-Fall gewährleisten.

- *AP 5.3 – Hardware- und Funktionsintegration*

Im Rahmen der Hardware- und Funktionsintegration hat sich die AUDI AG um die Implementierung entsprechender Bauteile sowohl in den Scheinwerfer als auch in die Fahrzeugkarosserie gekümmert. Im Anschluss erfolgte die algorithmische Umsetzung der definierten Lichtfunktionen zur Darstellung der dynamisch erzeugten Lichtverteilungen.

- *AP 5.4 – Validierung und Kalibrierung*

Im Arbeitspaket 5.4 hat Audi die umgesetzten Lichtfunktion durch Ermittlung der über die hohe Auflösung verbesserten Erkennbarkeitsentfernungen bzw. Sichtbedingungen validiert. Zusätzlich

wurde die Untersuchung der Auswirkungen der einzelnen Lichtfunktionen auf das Blickverhalten und die Aufmerksamkeit von Probanden mittels eines Eye-Tracking-Systems durchgeführt.

## 1.4 Ausgangspunkt

Laserdioden sind Bestandteil vieler elektronischer Geräte im Consumer-Bereich. Sie finden sich z.B. in Laserdruckern, in CD-, DVD- und Blu-ray - Geräten oder werden für Schnittanzeigen bei Schneidegeräten und Sägen, aber auch zu Zwecken der Materialbearbeitung eingesetzt. Für diese Anwendungsgebiete sind eigene Ansätze im Bereich Thermomanagement oder Betriebs- bzw. Benutzersicherheit gegeben.. Erste Ergebnisse von entsprechenden Demonstratoren der Verbundpartner im Laborumfeld zeigen, dass die Luminanz laserbasierter Weißlichtquellen den von heutigen LEDs um einen Faktor zehn übersteigen kann.

Für die Umwandlung eines Laserstrahls in weißes Licht müssen entweder verschiedenfarbige Laserdioden überlagert werden, bis die gewünschte Lichtfarbe entsteht, oder es muss eine Konversion über den Einsatz von Phosphorelementen vorgenommen werden. Die im Projekt angestrebte Variante mit Leuchtstoffen hat den Vorteil einer besseren Farbwiedergabe als auch die Möglichkeit, keine direkte und damit potentiell gefährliche Laserstrahlung aus dem Scheinwerfer zu emittieren. Die Erzeugung von weißem Licht mittels Laserdioden ist derzeit vereinzelt im Video-Projektionsmarkt für Consumer-Anwendungen zu sehen, allerdings sind die Leistungsdichten und Temperaturanforderungen nicht mit der Anwendung im Automobil vereinbar.

Die variable Lichtverteilung ist bei den deutschen Automobilherstellern bereits in Serienfahrzeugen integriert. Sie existiert in Form von adaptiven Xenon-Systemen oder Voll-LED-Scheinwerfern. Bei den LED-Systemen werden einzelne Gruppen von Leuchtdioden in Intensität und Richtung unterschiedlich angesprochen, was eine variable Lichtverteilung ermöglicht. Im Bereich der Forschung sei u.a. auf die Verbundvorhaben LiSiLED (FKZ 19 S10001B) oder SEEL (FKZ 13 N11271) verwiesen, in denen ein Scheinwerfersystem mit blendfreiem Fernlicht auf LED-Basis entwickelt wird. Die Funktionen des Systems umfassen die Einteilung des Fernlichtbereichs in einzeln ansteuerbare Sektoren sowie die Teilverdunkelung im Fernlichtbereich, um andere Verkehrsteilnehmer nicht zu blenden.

### Bestehende Schutzrechte (eigene und Dritter)

Folgende Schutzrechte sind der AUGI AG bekannt:

- Auf dem Gebiet der Weißlichterzeugung durch die teilweise Konversion von LEDs und Laserstrahlung durch einen geeigneten Konverter gibt es zahlreiche Patente. Grundlegende Arbeiten stammen von OSRAM, die auch für die Lizenzierung und Herstellung weißer LEDs benötigt werden.
- In der Offenlegungsschrift der Audi AG DE 10 2007 055 480 B3 ist die Umsetzung einer Beleuchtungsvorrichtung mit einem auf einen Phosphor scannenden Lasersystem abgesichert
- In der Offenlegungsschrift der Audi AG DE 100 34 381 A1 sind die durch einen Laserscanner erzeugbaren Lichtverteilungen zur Informationsanzeige und Navigationsunterstützung auf der Straße beschrieben.
- DE 197 37 653 A1 von OSRAM von 1997 beschreibt eine Beleuchtungseinrichtung für Fahrzeuge, welche Mikrospiegel zur Strahlformung benutzt.
- Mit der Offenlegungsschrift WO 2009/112961 A1 von Koninklijke Philips electronics N.V. wird ein grundlegendes Konzept geschützt, dass die Kombination aus einer Laserquelle, einem Lichtkonverter und einer anschließenden Optik zur Strahlformung des Gesamtlichtes beschreibt.
- In der deutschen Offenlegungsschrift von OSRAM AG, DE 10 2010 062 460 A1 wird eine spezielle Anordnung aus Laser, Konverter und Strahlformer geschützt.



- In der Patentschrift DE102006029204 A1 von OSRAM von 2006 wird eine Lichtleiter-Anordnung geschützt, bei der mit einer kurzwelligen Lichtquelle über einen Lichtleiter ein Leuchtstoff gepumpt wird.
- Zur Definition von MEMS Strukturen: Patent DE 4241045: Verfahren zum anisotropen Ätzen von Silizium 1994
- Patentanmeldung seitens Bosch für statischen Spiegel auf Basis Magnetbügel DE102010064218A1
- Patentanmeldung seitens Bosch für die Erfassung des Auslenkwinkels durch Torsion mit piezoelektrischen Elementen DE 2010029074A1

Die Aufzählung zeigt, dass alle Verbundpartner wichtige Teilaspekte der Forschungsziele bereits frühzeitig adressiert haben und damit auch im Verbund umsetzen können. Es gibt darüber hinaus eine Vielzahl von Fremd-Anmeldungen, jedoch sind keine einschränkenden Schutzrechte Dritter für diesen neuen Ansatz bekannt.

#### Bisherige Arbeiten des Antragstellers

Die AUDI AG zählt mit einem Umsatz von über 60 Milliarden Euro und 1,88 Millionen produzierten Fahrzeugen zu den weltweit erfolgreichsten Automobilherstellern im Premiumsegment. Darüber hinaus ist das Unternehmen mit über 90.000 Beschäftigten ein wichtiger Arbeitgeber. Innovative Technik, visionäres Design und ausgezeichnete Qualität haben die AUDI AG zu einem anerkannten Hersteller hochwertiger Fahrzeuge gemacht. Im Geschäftsjahr 2017 wurden insgesamt über 3,8 Milliarden Euro in Forschungs- und Entwicklungs (F&E) - Aktivitäten investiert. Dies entspricht einem Anteil von 6,3% an den Umsatzerlösen. Ferner sind aktuell über 13.600 Mitarbeiter für F&E innerhalb der AUDI AG beschäftigt. Im Mittelpunkt aller Aktivitäten steht hierbei die Entwicklung wegweisender und nachhaltiger Fahrzeugkonzepte, um den hohen Anforderungen der Kunden nach immer besseren Lösungen umfassend gerecht zu werden. Speziell im Bereich der Lichttechnologie gilt Audi seit jeher als Innovationstreiber und will diesem Ruf auch in Zukunft gerecht werden. Dazu wird auch das Projekt iLaS einen entscheidenden Beitrag leisten.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Verbundvorhabens iLaS hatte die AUDI AG die Möglichkeit, mit einer Reihe hochqualifizierter Partner zusammen zu arbeiten. Im nachfolgenden wird kurz auf die einzelnen Verbundpartner eingegangen, die auch in Abbildung 3 dargestellt sind.



**BOSCH OSRAM**



**Abbildung 3: iLaS-Verbundpartner**

### Bosch GmbH

Die Robert Bosch GmbH ist ein weltweit agierendes Unternehmen, das in den unterschiedlichsten Bereichen tätig ist. Der Bereich Automotive Electronics (AE) hat einen großen Teil seiner Sensorentwicklung und Sensorfertigung am Standort Reutlingen. Diese enge Verzahnung zwischen Entwicklung und Fertigung erlaubt es, mit kurzen Entwicklungszyklen anspruchsvolle Produkte auf den Markt zu bringen. Aus dem Umfeld der Mikro-Elektro-Mechanischen System (MEMS) - Spiegel bringt der Geschäftsbereich AE folgende Kompetenzen in das Verbundprojekt iLaS ein:

- Bosch fertigt Spiegelsysteme für die Laserprojektion in mobilen Pico-Projektoren. Aus diesen Aktivitäten resultiert Know-how hinsichtlich gasdichter und optisch funktionaler Verpackungen auf Wafer-Level Ebene.
- Bosch hat Erfahrung mit der Ansteuerung und Lagedetektion von MEMS-Spiegeln für Displaysysteme. Mit Hilfe komplexer Ansteueralgorithmen sind prinzipiell auch nicht homogene Lichtverteilungen, wie sie für automotive-Anwendungen notwendig sind, erreichbar.
- Von Fertigungsseite bringt Bosch zusätzlich mehrjähriges Know-how in der Herstellung und Charakterisierung optisch glatter Schichten von Mikrosiegeln ein.

Zusammen genommen sind diese Kernkompetenzen für den fertigungstechnischen Erfolg der optischen Ablenkeinheit im Rahmen des Förderprogramms wesentlich.

### Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Das KIT ist mit über 9.000 Beschäftigten und einem Jahresbudget von knapp 800 Mio. Euro eines der weltweit größten Forschungs- und Lehrinrichtungen mit dem Potenzial, auf ausgewählten Forschungsgebieten eine weltweite Spitzenposition einzunehmen. Das Lichttechnische Institut (LTI) am KIT erforscht die Erzeugung und Nutzbarmachung von Licht. Im Schwerpunkt Lasertechnik wird die Herstellung von mikro- und nanophotonischen Bauelementen im Reinraum mit deren messtechnischer Charakterisierung im Laserlabor kombiniert. Modernste Messgeräte ermöglichen u.a. Strahlungsmesstechnik, Spektroskopie sowie Transmissions- oder Reflexionsmessungen. Mit der Prüfstelle für lichttechnische Einrichtungen an Fahrzeugen (LTIK) ist eine umfassende Expertise in der automobilen Lichttechnik gewährleistet. Für die Untersuchung der Auswirkungen innovativer Lichtfunktionen auf Straßenverkehrsteilnehmer existiert ein auf Videoprojektionstechnik basierender Forschungsscheinwerfer (Propix). Über die pixelförmige Ausleuchtung des Verkehrsraums (in Full-HD) ermöglicht Propix die Festlegung der Zielparameter des Laserscheinwerfersystems.

### OSRAM GmbH

Die OSRAM Licht AG ist ein weltweit tätiges deutsches Unternehmen mit Sitz in München, das Leuchtmittel und -systeme für Spezialanwendungen, halbleiterbasierte Lichtprodukte sowie professionelle Leuchten und Lösungen herstellt. Die OSRAM Geschäftseinheit *Specialty Lighting* bedient die Anwendungsbereiche Automotive sowie Display-Optik und bringt die optimalen Voraussetzungen mit, um hochintegrierte Scheinwerfer-Module mit adaptiven Funktionen bzw. Display-Charakter auszustatten. Im Rahmen des angestrebten Projektes setzt OSRAM neueste Laserdioden aus der eigenen Fertigung aber auch aus der Forschung und Entwicklung ein. Die Kernkompetenz in der Herstellung von Hochleistungsleuchtstoffen sowie das Know-how aus der Keramikfertigung für Brenner-Gefäße von Entladungslampen sind essenziell für das Erreichen der Projektziele.

### ZKW

ZKW ist im Projektverlauf als assoziierter Partner hinzugekommen. Die ZKW Group hat sich auf innovative Premium-Lichtsysteme und Elektronik-Module spezialisiert. Sie beschäftigt als einer der Branchenführer in diesem Segment etwas 8.000 Mitarbeiter an den Standorten in Österreich, der Slowakei, Tschechien, China, Indien, Mexiko und den USA. ZKW ist als Systemlieferant weltweit einer der führenden strategischen Partner der Automobilindustrie.

## 2. Eingehende Darstellung

### 2.1 Ergebnisse des Forschungsvorhabens

Wie bereits erwähnt, lag der Fokus des Forschungsvorhabens iLaS auf der Erarbeitung der Grundlagen für die Erzeugung und weitere Verarbeitung von Laser-Weißlicht sowie der Umsetzung neuartiger Lichtfunktionen basierend auf einer augensicheren Laser-Weißlichtquelle in einem mechanikfreien Scheinwerfer. In Abbildung 4 ist das Funktionsprinzip von iLaS vereinfacht dargestellt.

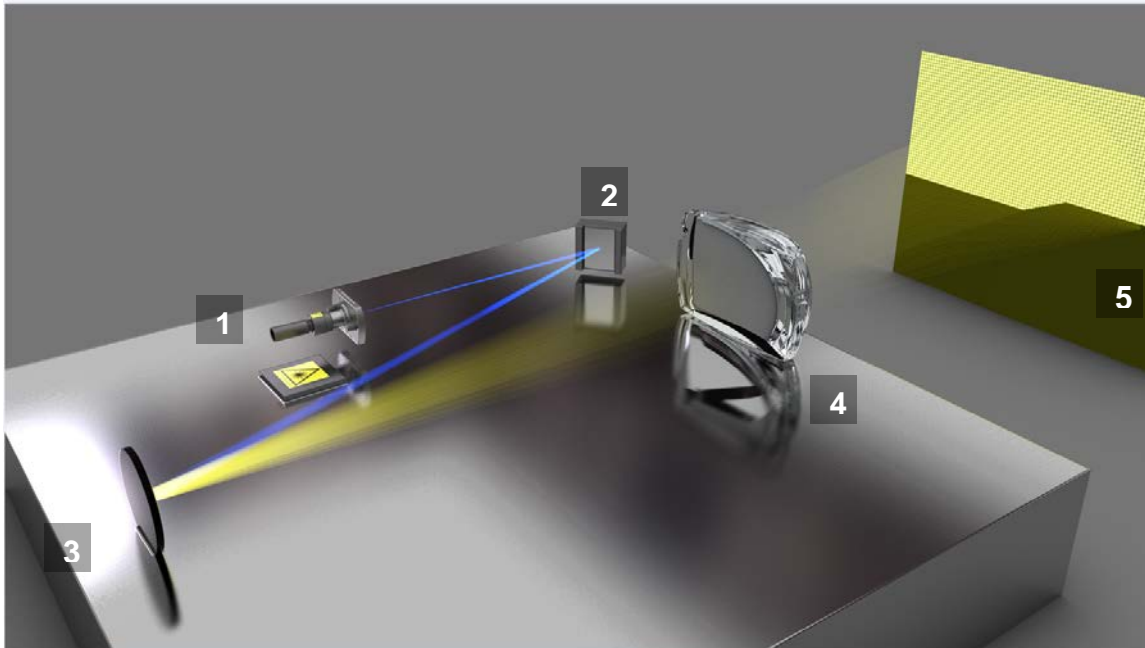


Abbildung 4: iLaS Funktionsprinzip

Laserdioden (1) strahlen auf einen Mikrospiegel (2) welcher durch Ablenkung den Laserstrahl auf dem Phosphor (3) abfahren lässt und über die Sekundärlinse (4) ein Lichtbild (5) auf die Straße projiziert. Durch das pulsen der Laserdioden können einzelne Pixel ein- bzw. ausgeschaltet werden und somit eine Matrix-Beam-Auflösung von bis zu 10.000 Pixeln im Fern- und Abblendlicht erzeugt werden. Um die angestrebten Arbeiten konstruktiv durchführen zu können wurden fünf Arbeitspakete geschnürt, die in Kapitel 1.3 kurz erwähnt wurden und auf die nachfolgend detailliert eingegangen wird.

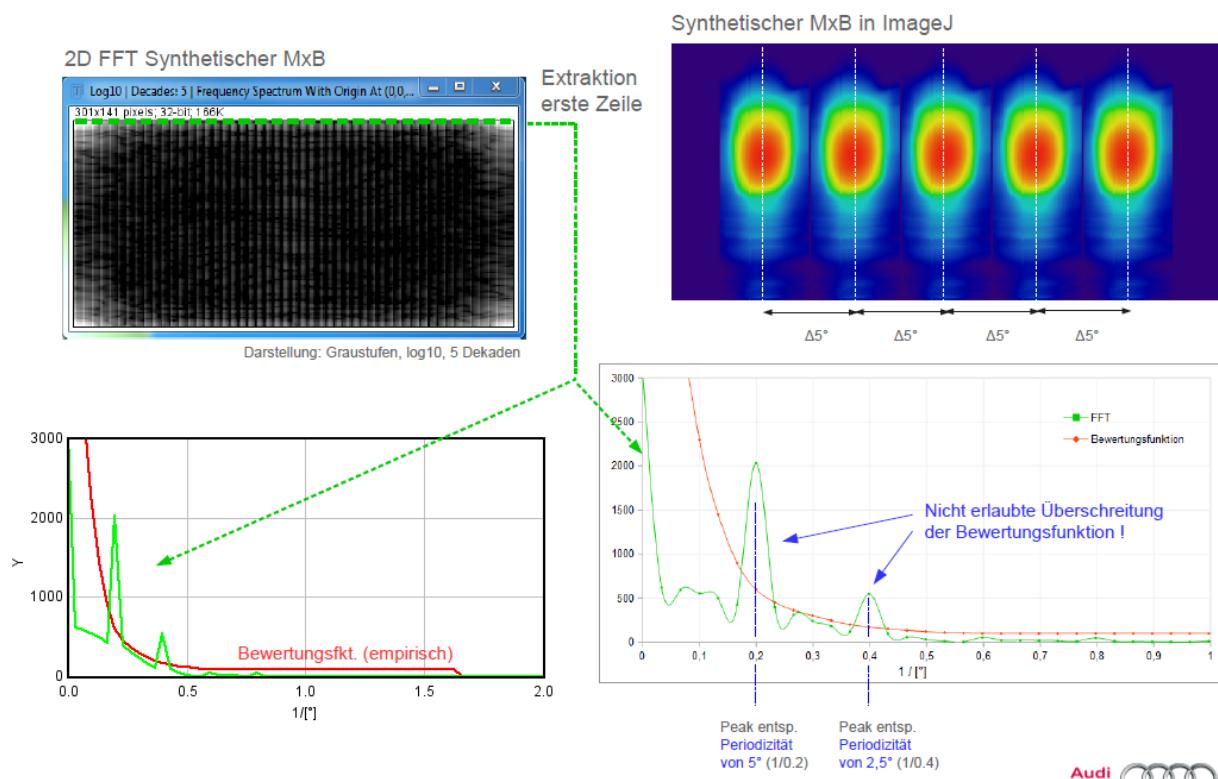
#### Arbeitspaket 1 – Vorgaben und Spezifikation

Eine zentrale Voraussetzung für die Erreichung der Projektziele war die Identifikation und Ausformulierung der nötigen Anforderungen für den Einsatz eines Laser-Phosphor-basierten Scheinwerfermoduls im Automobil. Dabei standen neben den optischen Anforderungen in Bezug auf Kontrast, Lichtverteilung und Farbtemperatur auch Faktoren wie die Einbauumgebung im Fahrzeug mit seinen thermischen und mechanischen Randbedingungen im Mittelpunkt. Audi hat die elektrischen, thermischen und mechanischen Anforderungen zusammengefasst und an die Projektpartner verteilt. Aufgrund der von den Partnern untersuchten Optikkonzepte wurde vor allem unter dem Gesichtspunkt des Bau-raums ein Hauptaugenmerk auf das Package der Konzepte gelegt. Infolge einer durchgeführten Bewertungsmatrix wurden die Spezifikationen angepasst und in Form eines Spezifikationslastenhefts mit den Partnern diskutiert. Dieses Lastenheft konnte im Projektverlauf permanent überarbeitet und an den aktuellsten Berichtsstand angepasst werden.

Die erarbeiteten Anforderungsprofile und Ergebnisse aus der Untersuchung der Einbauumgebung sind auch in den nächsten Arbeitsschritten in die Festlegung und Spezifikation des Scheinwerfer-

Packages mit spezifischen Vorgaben für das Lasermodule, die Dimensionierung des Phosphors sowie das optische System eingeflossen. Im weiteren Verlauf des Projekts wurde aus der Package-Definition ein Lastenheft für die Verwendung einer Laserlichtquelle im Automotive-Umfeld erarbeitet. Speziell für die Entwicklung von hochauflösenden adaptiven Scheinwerfern sind Lichtverteilungsprofile für das Abblendlicht sowie Fernlicht erarbeitet worden.

Die überarbeitete Version des Laserscanner-Lastenheftes beinhaltet auch Überlegungen zur Homogenität der Lichtverteilung. Durch die gewählte eindimensionale Systemauslegung mit mehreren horizontal scannenden Zeilen musste eine Bewertungsgrundlage erarbeitet werden, um akzeptable Lichtverteilungen zu identifizieren. Hierzu wurde von Audi ein Tool entwickelt, welches die Fernlichtverteilungen eines Scheinwerfers mit Laserscanner mit einer empirisch bestimmten Bewertungsfunktion vergleicht. Ziel dieser Beurteilung war die optimale Auslegung der Laserspots auf dem Konversionsphosphor sowie der Optiken im Strahlenverlauf des konvertierten Lichtes. Die folgende Abbildung 5 zeigt beispielhaft eine vertikale Überlagerung von Matrix-Beam Lichtquellen, die mit den diskreten Laserkanälen verglichen werden können. Die zweidimensionale Fouriertransformation (Frequenzspektrum) gibt Aufschluss über Periodizitäten in der Lichtverteilung, die als störende Inhomogenität durch den Fahrer wahrgenommen werden können. Wie das Diagramm unten rechts zeigt, wurde in diesem Fall das Anforderungskriterium nicht erfüllt, da das Frequenzspektrum (FFT) die Werte der empirisch ermittelten Bewertungsfunktion an mehreren Stellen überschreitet. Die Verifizierung der Homogenität anhand der Bewertungsfunktion wurde im weiteren Projektverlauf durch Vermessung des Fahrmusters durchgeführt.



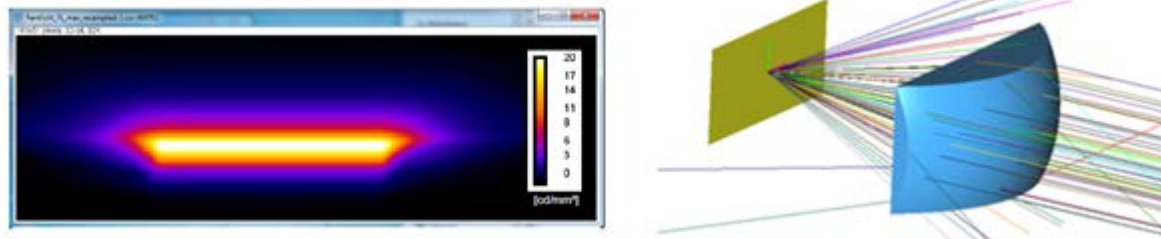
**Abbildung 5: Homogenität Synthetischer Matrix-Beam (MxB)**

## Arbeitspaket 2 – Systemkonzeption und Systemaufbau

Nun galt es, Lösungen hinsichtlich der Systemkonzeption und des Systemaufbaus zu erarbeiten. Hierzu fanden Abstimmungen mit den beteiligten Partnern OSRAM und Bosch statt, um eine erste Optikauslegung mit Leuchtdichteverteilungen auf den Konverter zu definieren. Audi hat hierzu, beginnend

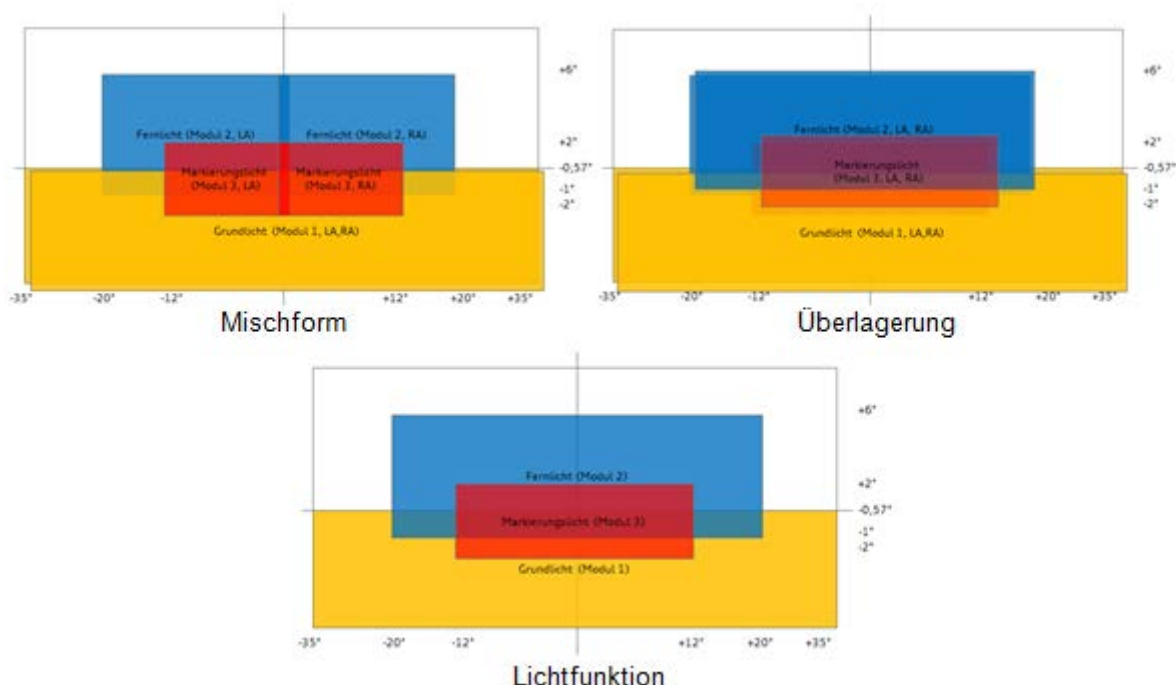
mit der Lichtverteilung auf der Straße, ein erstes Optikkonzept für das Linsensystem ausgearbeitet, das in Abbildung 6 dargestellt ist.

Zudem wurde seitens Audi die Leuchtdichteverteilung auf dem Konverter berechnet und an die Partner verteilt. Auf dieser Basis konnte OSRAM Konzepte für 2D SingelBeam/ 2D Multibeam sowie 1D CurtainBeam ausarbeiten.



**Abbildung 6: Konzeptdarstellung Auslegung Leuchtdichteverteilung auf den Konverter**

Des Weiteren konnten erste Konzepte für unterschiedliche Modulaufteilungen erstellt sowie deren jeweilige Vor- und Nachteile bewertet werden. Abbildung 7 zeigt drei verschiedene Konzepte. Jedes davon bietet gewisse Vor- und Nachteile. So entsteht bei der Modulaufteilung Mischform keine Lücke im Abblendlicht, dafür wird für das Abblendlicht ein großer Phosphor benötigt. Beim Konzept Überlagerung ist ein homogener Übergang innerhalb der Lichtfunktionen gewährleistet, allerdings bestehen hier erhöhte Anforderungen an die Pixelüberlagerung und es wird sowohl ein größerer Phosphor als auch größere Optiken benötigt. Bei der Modulaufteilung Lichtfunktion hat der Öffnungswinkel des Grundlichts keine Auswirkung auf den Öffnungswinkel des Fernlichts. Zusätzlich geht mit dieser Variante eine Reduzierung der Peakleistung einher und es können kleinere Linsen verwendet werden. Nachteilig ist hierbei der erhöhte Justieraufwand sowie die erhöhte Komplexität im Scheinwerfer.



**Abbildung 7: Darstellung von verschiedenen Konzepten zur Modulaufteilung**

### Arbeitspaket 3 – Design und Aufbau Ablenkssystem

Im AP 3 lag der Schwerpunkt auf der Umsetzung der in AP 2 definierten Vorgaben und Spezifikationen für das Ablenkssystem sowie auf der Erstellung eines Spiegelkonzeptes mit MEMS (Mikro-Elektro-Mechanisches System) - Spiegeln. Diese zeichnen sich durch ihre prinzipiell gute Fähigkeit aus, Ablenkwinkel genau einzustellen.

Ein wichtiger Punkt für die AUDI AG bestand in der Klärung der technischen und funktionalen Randbedingungen. Dazu zählen die Anforderungen und Vorgaben hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Bauraums, die Analyse der thermischen Umgebung sowie die Berücksichtigung der gesetzlich vorgegebenen Lichtverteilung bzw. Lichtleistung. Ferner brachte sich Audi bei der Erarbeitung der Designparameter für die optimale Bildwiederholfrequenz mittels der unternehmenseigenen Erfahrungen bezüglich des Perlschnureffekts und der Flimmerfrequenz im peripheren Sichtfeld bei Heckleuchten ein. Speziell für die Auslegung der Elektronikansteuerung und der MEMS-Geschwindigkeit war eine detaillierte Spezifikation der Bildaufbaufrequenz entscheidend.

### Arbeitspaket 4 – Physiologische Studien und Simulationen

Nun standen physiologische Studien und messtechnische Untersuchungen im Mittelpunkt. Bei den physiologischen Studien stellte sich heraus, dass es von entscheidender Bedeutung ist, eine Zielhomogenität unabhängig von Vergleichsdaten zu definieren. Darum wurde ein zusätzlicher Ansatz gewählt, der auf einer Gradientenanalyse von Leuchtdichten der Lichtverteilung basiert. Dieser Ansatz wird im AP 5 genauer beschrieben.

Hinsichtlich der messtechnischen Untersuchungen war es wichtig, die Tests so realitätsnah wie irgend möglich durchzuführen. Darum führte Audi umfangreiche Fahrtests in Schweden und Ingolstadt durch. Dabei wurden insgesamt über 21.000 km mit eingeschaltetem Scheinwerfer zurückgelegt, bei denen das Laserlicht mehr als 200 Stunden im Einsatz war.

Außerdem wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes die Probandenstudie „Pixeltest“ durchgeführt. Hintergrund waren die zu erwartenden Flimmereffekte bei Laserlicht, da dieses den Ausleuchtungsbereich in Bahnen abtastet (hochfrequentes An-/Ausschalten). Für die Tests wurde der vorhandene Demonstrator aus dem abgeschlossenen und vom BMBF geförderten Projekt SEEL modifiziert und angepasst. Es wurden von 38 Teilnehmern Fahrversuche auf einer abgeschlossenen Teststrecke durchgeführt, nachdem eine Proberunde inklusive Helligkeitsmessung absolviert war. Die Fahrten fanden bei Dunkelheit statt und es gab zwei Szenarien mit reflektierenden Stimuli, wobei die Frequenz und die Geschwindigkeiten innerhalb der Szenarien variiert wurden. Die Probanden wurden durch einen Interviewer begleitet und es fand sowohl eine Vor- als auch eine Nachbefragung zum subjektiven Erleben der Fahrten statt.

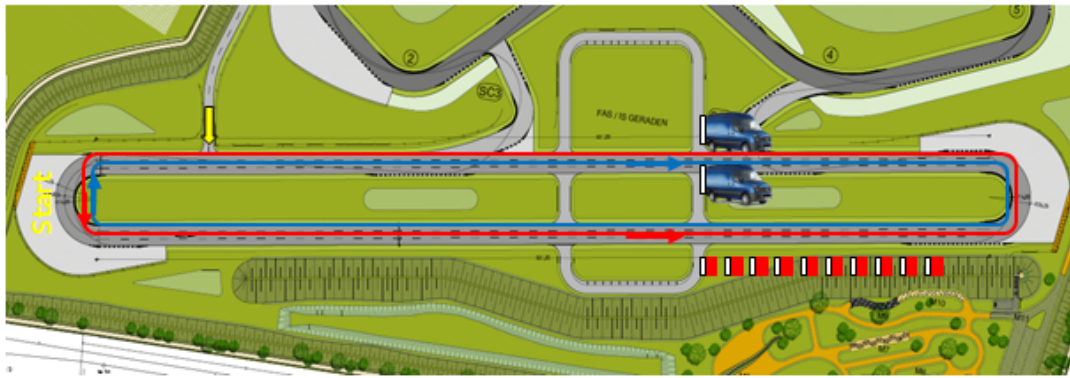
Abbildung 8 zeigt die Testperson auf dem Fahrersitz mit dem Interviewer im Fond (links) sowie einen Bachelorand hinten rechts (rechts) mit dem Car-PC.



**Abbildung 8: Proband mit Interviewer (links) und Bachelorand (rechts)**

In nachfolgender Abbildung 9 ist die Teststrecke abgebildet. Man kann sowohl die beiden Kleinlaster (blau) des Testszenarios Hindernis als auch die Leitpfosten (rot) des Testszenarios Leitpfosten deutlich erkennen. Wie das Testszenario in der Realfahrt ausgesehen hat, ist in Abbildung 10 ersichtlich.





- **Testszenario Hindernis (inkl. Pixeltest)**  
14 Runden auf nördlicher Geraden durch Kleinlastwagen hindurch, Befragung während Rückfahrt auf Gegengeraden
- **Testszenario Leitpfosten**  
18 Runden auf südlicher Geraden an Leitpfosten vorbei, Befragung während Rückfahrt auf Gegengeraden

Abbildung 9: Streckenplan Testszenarien

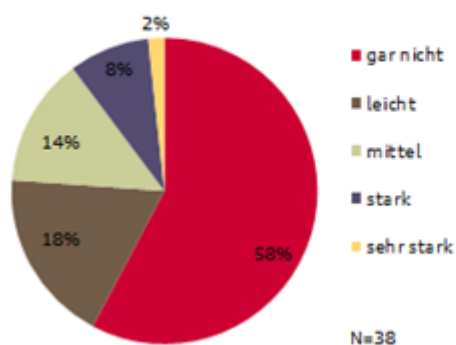


Abbildung 10: Hindernis LKW (links) und Leitpfosten (rechts)

Für die Studie wurden auch diverse Faktoren berücksichtigt wie beispielsweise die Lichtausstattung am aktuellen Fahrzeug der Probanden, die Häufigkeit in der die Probanden bei Dunkelheit fahren sowie eventuelle Sehschwächen bzw. das Tragen einer Sehhilfe.

Eine Auswertung der Ergebnisse sowohl der Hindernis- als auch der Leitpfostenfahrt ist in Abbildung 11 in Form eines Kuchendiagramms dargestellt.

Flimmern wahrgenommen?



Flimmern wahrgenommen?

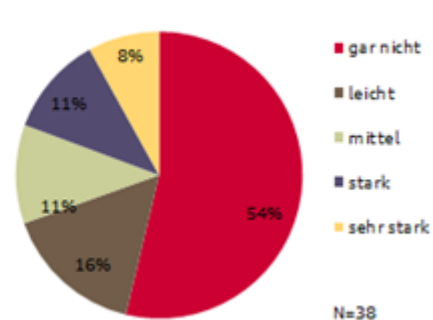


Abbildung 11: Ergebnisse Testfahrten Hindernis (links) und Leitpfosten (rechts)

Generell hat die Probandenstudie gezeigt, dass es keine Abhängigkeit der Flimmerfrequenz von der Geschwindigkeit gibt. Eine erhöhte Flimmerfrequenz wurde vor allem bei älteren Fahrern festgestellt. Das Phänomen der Flimmerfrequenz ist im Allgemeinen ab einer mittleren Frequenz von weniger als 60 Hz zu erkennen. Hinsichtlich der Flimmerfrequenz wurde von Audi eine Zielfrequenz von mindestens 150 Hz angestrebt. Die Ergebnisse wurden auch im Rahmen eines Verbundtreffens mit den Projektpartnern diskutiert. Bosch und OSRAM konnten die Ergebnisse bei ihren Arbeitspaketen zur Auslegung des MEMS-Spiegels und der iLaS-Zielfrequenz berücksichtigen.

#### Arbeitspaket 5 – Systemintegration und Validierung

Zu Beginn dieses Arbeitspakets konnten wie geplant erste Überlegungen zur Entwicklung neuartiger Lichtfunktionen getätigt werden. Grundlage für die Auswahl und Untersuchung ist die um mehrere Potenzen höhere Auflösung des Laserlichts. Zu den möglichen Lichtfunktionen, die umgesetzt werden können, zählen u.a. eine lichtunterstützte Navigation, Fahrspur- und Fahrbahnmarkierungslichter, synthetisches Kurvenlicht, Hervorhebung bzw. Dimmung von Verkehrszeichen, Berg-/Talfahrtausblendung sowie die Auslagerung von Signalfunktionen auf die Straße und die Leuchtweitenregulierung. Nachfolgende Abbildung 12 zeigt einen in der Heckleuchte verbauten Laser, der hinter dem eigenen Auto eine rote Linie in Fahrzeugbreite auf die Fahrbahn projiziert. Bei Regen, Nebel oder Gischt spannt sich dadurch ein virtuelles Warndreieck auf, das dazu beiträgt, das hinterherfahrende Fahrzeug auf Distanz zu halten und so die Wahrscheinlichkeit von Auffahrunfällen bei Schlechtwetter deutlich reduziert.



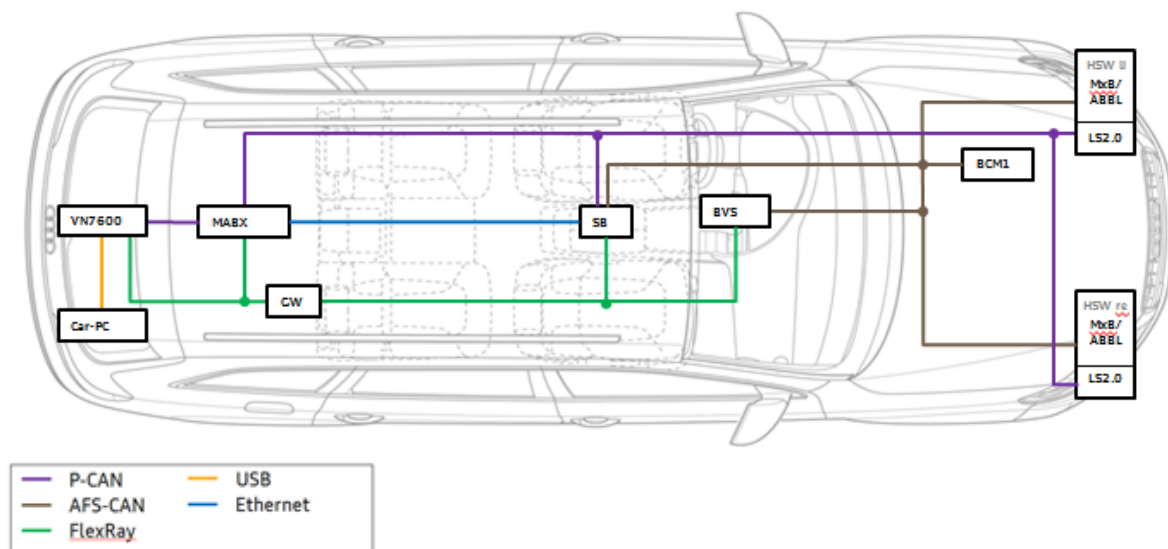
**Abbildung 12: Laser-Schlusslicht**

Aufgrund der Einordnung der verwendeten Laser in die höchste Laserschutzklasse (LSK 4) wurde im Rahmen von AP5 auch eine detaillierte Sicherheitsanalyse der Lichtquelle und des optischen Systems durchgeführt, um Haut- und Augenschäden zu verhindern. Aufgrund der hohen Leuchtdichte und der Laser-Phosphorkonversion wurden Analysen in Bezug auf die photobiologische Augensicherheit DIN EN 62471 sowie eine Bewertung des Gesamtsystems nach der Laserschutznorm DIN EN 60825 durchgeführt, damit entsprechende Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden können.

Der nächste Schritt bestand darin, die bis zu diesem Zeitpunkt gewonnenen Erkenntnisse umzusetzen, sprich den Laser in den Scheinwerfer und diesen dann in das Demonstratorfahrzeug zu integrieren. Für die Systemintegration wurden zunächst die Lasermodule, Mikrospiegel, Phosphor sowie entsprechende Kühlkomponenten konstruktiv durch CAD-Tools unter Berücksichtigung der Audi-Designvorgaben in den Versuchsträger integriert. Die thermische Anbindung der temperaturempfindlichen Bauteile wurde in entsprechenden Simulationen abgeprüft. Nach erfolgter Konstruktions- und Simulationsdurchführung konnten die entsprechenden Bauteile sowohl in den Scheinwerfer als auch in die Fahrzeugkarosserie implementiert werden.



Eine wichtige Rolle spielte auch die Topologie des Demonstratorfahrzeugs. Nachdem hierfür ursprünglich ein Audi A8 ins Auge gefasst wurde, fiel die Entscheidung aufgrund der klaren Vorteile im Bereich der für das Projekt wichtigen Performance-Werte sowie verfügbarem Bauraum des Scheinwerfers auf einen Audi Q7. Während der Vorbereitung des Versuchsträgers zur Integration des Laserscanners wurde das Konzept zur Ansteuerung des Demonstrators detailliert ausgearbeitet und die zusätzliche Architektur im Versuchsträger realisiert. Die Inbetriebnahme der Mess- und Erprobungsarchitektur wurde im Berichtszeitraum abgeschlossen. Die Integration beinhaltet die Inbetriebnahme der Mess- und Erprobungsarchitektur, den Abgriff aller notwendigen Fahrzeugsensoren, die Verarbeitung der Signale, die Hardware in welcher die neuartigen Algorithmen hinterlegt sind sowie die Anschlüsse zur Ansteuerung der Prototypen-Scheinwerfer. Abbildung 13 zeigt die finale Topologie des Demonstratorfahrzeugs.



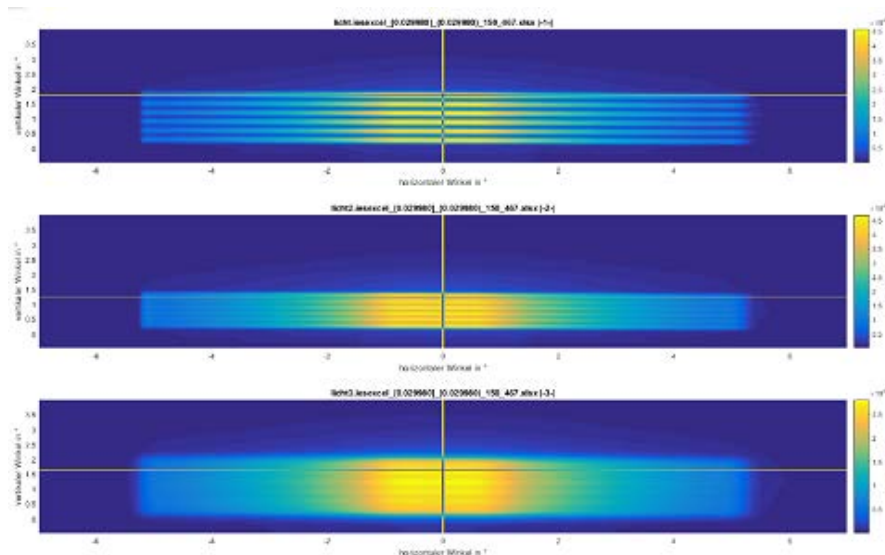
**Abbildung 13: Finale Topologie des Demonstratorfahrzeugs**

[Begriffserklärung: VN7600: Übersetzer zwischen CAN und PC; MABX: MicroAutoBox (Ablauf des Funktionsmodells); GW: Gateway (Signalabgriffe); SB: Schalterbox; BVS: Bildverarbeitungssteuerggerät (Kamera + Objektberechnung); BCM1: Body Control Module (Steuergerät für Standardlichtfunktionen); HSW: Hauptscheinwerfer; MxB: MatrixBeam; ABL: Abblendlicht; LS2.0: Laserspot 2.0 (Laserscannermodul)]

Mit Lieferung der ersten Prototypenscheinwerfer, welche einen rudimentär funktionsfähigen Laserscanner beinhalteten, konnten anhand eines fahrbaren Versuchsträgers die ersten Tests zur Algorithmenentwicklung durchgeführt werden. Die Funktionstüchtigkeit der verbauten Zusatzarchitektur sowie die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Laserscanner wurden verifiziert. Erste Testfahrten mit zwei Laserscanner-Scheinwerfern der ersten rudimentär funktionsfähigen Generation zeigten eine signifikante Abhängigkeit der Positionierung der beiden Scannermodule in den Scheinwerfern zueinander. Zur Bewertung einer Parallaxekorrektur war die Justage der Scannermodule unabhängig vom Matrix-Beam oder Abblendlicht notwendig.

#### Homogenitäts-Analysetool

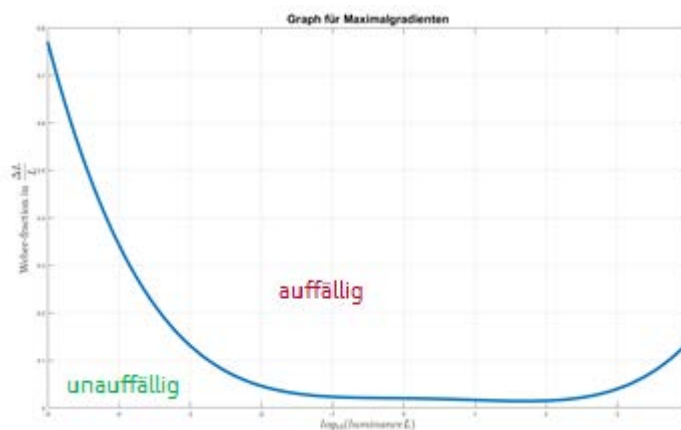
Als nächstes wurde ein Bewertungs-Tool für erste Messungen des Laserscannerdemonstrators angewendet. Durch die Weiterentwicklung des Konverters hat sich das sogenannte Spot-Confinement signifikant verbessert. Die mehrkanalige Lichtverteilung der 6 Laser führte daher zu einem deutlich sichtbaren Übergang zwischen hellen und dunklen Bereichen in der Lichtverteilung, wie man im oberen Bild von Abbildung 14 sehen kann.



**Abbildung 14: Simulierte Leuchtdichteverteilungen**

Die Abbildung zeigt weitere Leuchtdichteverteilungen resultierend aus einer verringerten Distanz zwischen den Laserkanälen (mitte) sowie durch Defokussieren der Einzelkanäle (unten).

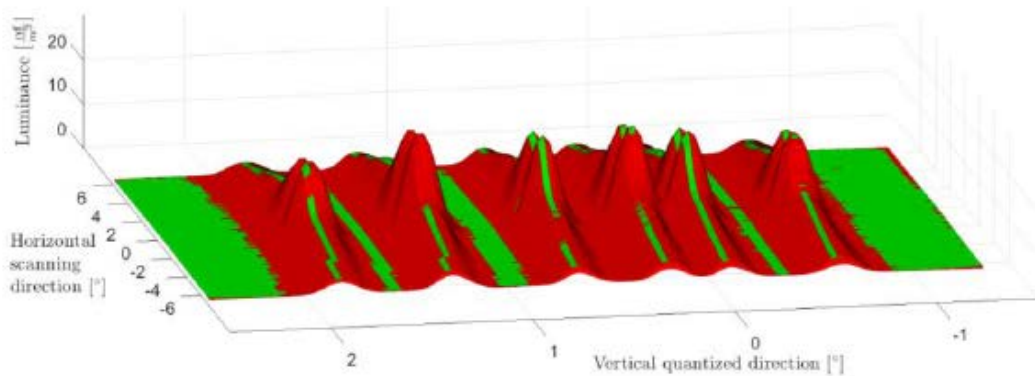
Um eine Zielhomogenität in der Leuchtdichte zu definieren wurde der Ansatz der Fouriertransformation weitergeführt. Dabei treten Effekte durch die Gesamtlichtverteilung auf, welche sensibel auf das Ergebnis des Bewertungstools wirken. Abbildung 15 zeigt die Bewertungskurve zur Differenzierung von auffälligen und unauffälligen Leuchtdichteunterschieden, die durch das menschliche Auge gegebenenfalls als Inhomogenitäten wahrgenommen werden. Die Bewertungskurve basiert auf dem Weber-Fechner-Gesetz.



**Abbildung 15: Bewertungskurve zur Differenzierung von Leuchtdichteunterschieden**

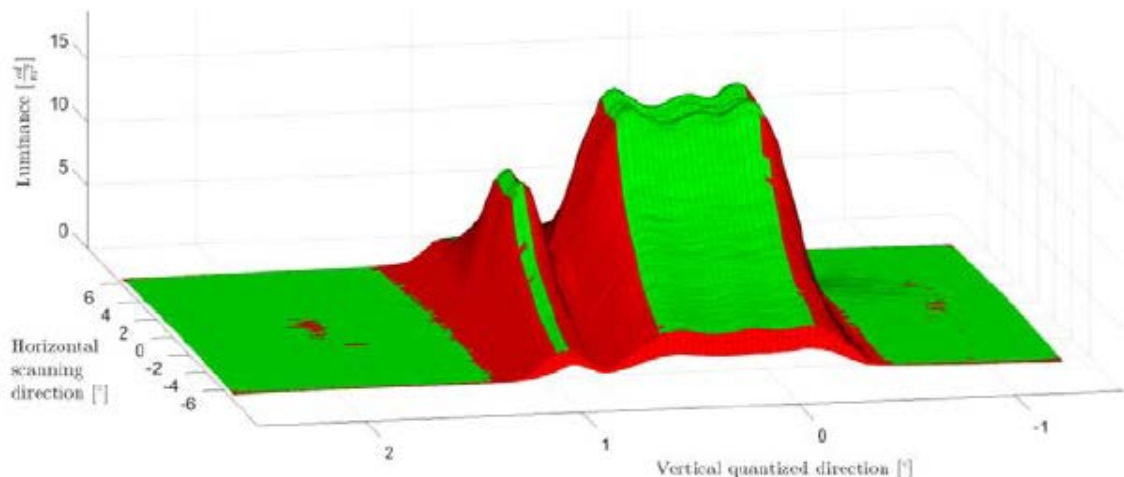
Zudem basiert die Homogenitäts-Bewertungskurve auf einer empirischen Untersuchung, sodass ein zusätzlicher Ansatz gewählt wurde, um eine Zielhomogenität unabhängig von Vergleichsdaten zu definieren. Dieser zweite Ansatz basiert auf einer Gradientenanalyse von Leuchtdichten der Lichtverteilung, wie er bereits zu Beginn von AP 4 erwähnt wurde. Laut Weber-Fechner-Gesetz hängen wahrnehmbare Unterschiede der Leuchtdichte von der Leuchtdichte-Anpassung des Beobachters ab. Die Bewertungskurve in Abbildung 15 stellt sozusagen eine Grenze dar. Diese Grenze hängt von der Leuchtdichte ab, an welche sich das menschliche Auge anpasst. Ist die Leuchtdichte-Anpassung kleiner als  $10^{-1} \text{ cd/m}^2$  oder größer als  $10^{2.5} \text{ cd/m}^2$ , dann nimmt die Inhomogenitäts-Grenze zu, d.h. innerhalb dieser Grenzwerte nimmt das menschliche Auge sogar kleine Gradienten in der Leuchtdichte wahr.

Das Laserscanner-System wurde hinsichtlich einer Differenzierung der Leuchtdichteverteilung analysiert. Außerdem wurde überprüft, inwiefern eine Helligkeitsveränderung eine feststellbare Inhomogenität gemäß dem Weber-Fechner-Gesetz darstellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt. Die Gradienten-Analyse in Abbildung 16 basiert auf dem optischen Konzept „klare Linien“. Hier stellen die grünen (hellen) Bereiche Homogenitäten dar, während die roten (dunklen) Bereiche Inhomogenitäten offenbaren.



**Abbildung 16: Gradienten-Analyse nach dem optischen Konzept "klare Linien"**

Abbildung 17 stellt die Gradienten-Analyse nach dem optischen Konzept „Homogenität“ dar. Auch hier stellen die grünen (hellen) Bereiche wieder Homogenitäten dar, während die roten (dunklen) Bereiche Inhomogenitäten offenbaren.



**Abbildung 17: Gradienten-Analyse nach dem optischen Konzept "Homogenität"**

Das Verhältnis der homogenen zu den inhomogenen Teilen steigt von 32 % im Konzept „klare Linien“ auf 70 % im Konzept „Homogenität“. Darüber hinaus sind in Abbildung 17 deutlich nicht-wahrnehmbare Gradienten auf dem Plateau der Leuchtdichte sowie wahrnehmbare Inhomogenitäten beim Übergang von hellen in dunkle Bereiche zu erkennen.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Detaillierte Informationen hierzu sind dem Verwendungsnachweis zu entnehmen.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Dieses Projekt war im Verbund durchzuführen, da momentan in jeder Phase der Produktentstehung noch erhebliche Risiken zu finden sind. Dies gilt für die Leuchtstoffe und Lichtquellen, die optischen Materialien sowie Ablenkssysteme für hohe Laserleistungen bis hin zur Verknüpfung in einem intelligenten Licht-Modul und Zusammenführung bzw. Integration in einem Kraftfahrzeug. Jede Phase für sich könnte den Einsatz dieser Technik im Kraftfahrzeug limitieren oder gar verhindern. Risiken entstehen auch durch die Herstellungs- und Teilepreise, welche sich gegenüber den Preisen von konventionellen Materialien behaupten müssen. Die Halbleiter-Lasertechnologie bietet gegenüber konventionellen LEDs viele Vorteile in den optischen Systemen, allerdings startet man gegenüber diesen mit einer Zeitverzögerung, die es aufzuholen gilt. Ein zusätzliches Risiko stellt das gesamte Thermomanagement für das Basismodul sowie die Entwicklung spezifischer Sicherheitssysteme im Kontext mit der Phosphorkopplung dar.

Die Projektpartner besitzen ausgewiesene Kompetenzen auf ihren Geschäfts- und Wissenschaftsfeldern und haben damit dazu beigetragen, die geplanten Projektziele erfolgreich umzusetzen. Bei dem Forschungsprojekt „iLaS“ handelt es sich um ein industriegeführtes Verbundprojekt, welches aus wissenschaftlicher und technologischer Sicht sehr komplex war und daher nur in dem Industrieverbund mit universitärer Forschung stattfinden konnte. Der Verbund umfasst alle innovativen Teile der Wertschöpfungskette vom Material- und Komponentenhersteller sowie Systemintegrator bis zum industriellen Endverbraucher. Dies war Voraussetzung zum Gelingen des Vorhabens, gleichzeitig unterstreicht es aber auch die Komplexität des Projektziels.

Ein erfolgreicher Abschluss des Vorhabens bietet allen beteiligten Unternehmen die Chance, ihre guten Wettbewerbspositionen zu sichern und auszubauen. Damit wird letztendlich die wirtschaftliche Stellung des Hochtechnologie-Standortes Deutschland auf dem Weltmarkt weiter gestärkt.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

### Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Ein dynamisches Laserlicht wird bisher bei Scheinwerfersystemen im Kraftfahrzeugsektor nicht eingesetzt. Die angestrebten Entwicklungslösungen und Fortschritte hinsichtlich Effizienz, Auflösung, Langlebigkeit und Lichtstärke können für einen neuen Innovationsschub bei adaptiven Frontscheinwerfer-Lichtsystemen im Automobilsektor und darüber hinaus sorgen. Es ist davon auszugehen, dass diese Alleinstellungsmerkmale zu einer Koexistenz von Laser und LED-basierten Scheinwerfersystem führen werden, da beide Technologien ihre Vorteile abhängig von den jeweiligen Randbedingungen in der Anwendung ausspielen werden. Ferner darf angenommen werden, dass führende Firmen beide Technologien beherrschen müssen. Dabei werden Erkenntnisse des Projekts neue Ergebnisse liefern, die von Audi permanent evaluiert werden, um eine mögliche Anwendbarkeit für die Serienentwicklung sicherzustellen.

Der Rückfluss der Erkenntnisse ist schon im Laufe des Förderprojekts ständig erfolgt. Ein Transfer in die Serie, ein Übertrag auf andere Modelle bzw. die Anwendung hinsichtlich Modul- und Plattformstrategie wird angestrebt. Für die Entwicklung der Fahrzeuge wird die AUDI AG weiterhin in die Entwicklungszentren Neckarsulm und Ingolstadt investieren. In diesen Standorten wird mit den Zulieferern

gemeinsam die Überführung der Erkenntnisse des Förderprojekts in marktfähige Produkte gewährleistet. Basierend auf dem Machbarkeits-Nachweis wird Audi über eine Berücksichtigung der Projektergebnisse bei zukünftigen Entwicklungsvorhaben und Umsetzungen im Rahmen von Serienfahrzeugen entscheiden.

Die Projektpartner erwarten von Lasern eine starke Verbreitung in der Serienanwendung, zunächst im deutschen Markt, später auch in allen globalen Märkten mit Gesetzgebung durch UN-Regelungen. Gleichzeitig wird damit ein wichtiger Beitrag zur Stärkung der deutschen Wirtschafts- und Innovationskraft geleistet, was wiederum die Anziehungskraft der deutschen Unternehmen für qualifizierte Mitarbeiter und Führungskräfte aus dem In- und Ausland weiter ausbauen wird.

#### Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Auf der einen Seite eröffnen Laser für das optische System im Scheinwerfer bisher unerreichbare Möglichkeiten, auf der anderen Seite belasten sie aber auch alle Materialien deutlich über heute bekannte Niveaus. Insbesondere die Leuchtstoffe, aber auch potenzielle Mikrospiegelsysteme sind in den zu erwartenden Leistungsdichten bisher nicht getestet worden. Allerdings gibt es Vorarbeiten im Bereich der Medizintechnik und Videoprojektion, die bisher keine prinzipiellen Barrieren erkennen lassen, so dass lediglich ein Restrisiko in Bezug auf die schwierigen Umwelt- und Temperaturanforderungen im Automobil bleibt.

Sollte das Forschungsthema mit einem 2-Achsen Mikro-Spiegel erfolgreich umgesetzt werden, so würde dies auch in Video-Projektionsanwendungen, die heute mit DMDs und LCDs betrieben werden, zur Anwendung kommen können. Aber auch andere Automotive-Anwendungen wie Rückprojektionsanwendungen für Instrumentenbereiche oder Displays könnten von den Entwicklungen profitieren.

#### Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Aus wissenschaftlicher Sicht liefern die angestrebten Entwicklungen einen bedeutenden Beitrag zur Technologieforschung in den genannten Domänen, der zu weiteren Patenten und Veröffentlichungen der Verbundpartner führen wird. Einige der wissenschaftlichen Ergebnisse werden wie oben angedeutet unter Umständen über den Automotive-Bereich hinaus Einfluss nehmen. Dabei werden Erkenntnisse des Projekts neue Ergebnisse liefern, die von Audi permanent evaluiert werden, um eine Anwendbarkeit für die Serienentwicklung sicherzustellen. In der Produkteinführungsphase würden in einem ersten Projekt bis zu 100.000 Scheinwerfer pro Jahr ausgestattet werden. Bei entsprechender Skalierbarkeit kann ein Serieneinsatz im Verlauf von drei Jahren über die gesamte Fahrzeugflotte möglich sein.

Audi verfolgt hierbei wie bei der Einführung anderer neuer Technologien die Strategie, diese zuerst im Premiumsegment und anschließend über eine schrittweise Entwicklung auch bei Fahrzeugen der Mittel- und Kompaktklasse anzubieten. Für die Entwicklung der Fahrzeuge wird die AUDI AG weiterhin in die Entwicklungszentren Neckarsulm und Ingolstadt investieren. In diesen Standorten wird mit den Zulieferern gemeinsam die Überführung der Erkenntnisse des Förderprojekts in marktfähige Produkte gewährleistet.

## **2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Durchführung des Vorhabens sind der AUDI AG keine Fortschritte von anderen Unternehmen auf diesem Gebiet bekannt geworden.

## **2.6 Veröffentlichungen des Ergebnisses**

Die Inhalte und Ergebnisse des Projekts wurden durch Audi auf folgenden öffentlichen Veranstaltungen und Kongressen bzw. in folgenden Fachartikeln etc. präsentiert:

### **Fachartikel:**

- ISAL Konferenz 2015
- ISAL Konferenz 2017
- VISION Konferenz 2018
- International LED professional Symposium + Expo | LpS 2016, Bregenz

### **Präsentationen:**

- BMBF Statusseminar Duisburg 2017