

Optische Eigenschaften eines RGB-Laserprojektionsmoduls für den Verkehrsraum

Dipl.-Ing. **G. Kloppenburg**¹, Dipl.-Ing. **J. Roth**², Dipl.-Ing. **A. Wolf**¹,
Prof. Dr.-Ing. **R. Lachmayer**¹

¹ Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

² Leibniz Universität Hannover, Institut für Dynamik und Schwingungen

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein scannendes Laserprojektionssystem vorgestellt, welches auf drei Laserdioden basiert und der RGB-Projektion in das erweiterte Fahrzeugvorfeld dient. Die projizierten Informationen wie Navigationshinweise oder Warnungen können sowohl monochromatisch als auch durch die überlagerte Emission der Dioden in Weiß oder anderen Mischfarben dargestellt werden. Durch den Einsatz von Laserprojektion ist dabei eine scharfe Abbildung auf der Straße unabhängig von deren Oberflächentopologie möglich.

Durch die temperaturabhängige Emissionsleistung der Dioden ist der erzeugte Farbort des kombinierten Lichts abhängig von den Betriebs- und Umgebungsbedingungen der Dioden. Diese Einflüsse werden in der vorliegenden Arbeit diskutiert, ebenso die bei Lasern systembedingt auftretenden Speckles. Außerdem wird abgeschätzt, bis zu welcher Umgebungshelligkeit das vorgestellte System Symbole bzw. Text mit ausreichendem Kontrast projizieren kann.

Abstract

In this paper we present a scanning system for the RGB-projection of relevant information onto the road in the driver's field of view. Based on laser diodes, the system can project monochromatic light offering a good color contrast as well as mixed light, e.g. white. Due to the laser based projection the influence of the road topology on the sharpness of the projected image is negligible.

The color of the mixed light is strongly influenced by the diodes' temperatures. This fact and the generation of speckles will be discussed. We give an approximation of the maximum environment illuminance that still allows the recognition of the projected symbol or text.

1. Einleitung

Die Entwicklung hochauflösender Scheinwerfer mit hoher Lichtstärke steht seit einigen Jahren im Fokus der Automobilbeleuchtung. Zur Realisierung von Scheinwerfern mit hoher Lichtstärke und kleinem Bauraum kommen aktuell neben den bereits weit entwickelten LEDs auch die verhältnismäßig neuen Laserdioden als Lichtquelle ins Spiel. Erste Serienanwendungen von Lasern in der Fahrzeugbeleuchtung setzen auf statische Systeme, die über einen laserangeregten Leuchtstoff eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke und damit eine Vergrößerung der Leuchtweite von Fahrzeugen erzielen sollen [1 - 4].

Neben der Entwicklung von Scheinwerfersystemen zur optimierten Ausleuchtung des Verkehrsraumes stehen zunehmend auch Scheinwerfermodule zur Bereitstellung von lichtbasierten Fahrerassistenzfunktionen im Fokus der Entwicklung. Durch die Informationsprojektion in einem Bereich von etwa 10 – 25 m vor dem Fahrzeug ergibt sich eine Vielzahl von Möglichkeiten, den Fahrer zu unterstützen. So können beispielsweise Navigationsinformationen und Warnungen direkt in das Blickfeld des Fahrers projiziert werden, ohne dass dieser den Blick von der Straße abwenden muss. Bei aktuellen Systemen werden die Daten größtenteils im Armaturenbrett oder im Entertainmentssystem angezeigt, die neben der Abwendung des Blickes auch eine Adaption des Auges an die veränderte Sehentfernung erfordert. Als Verbesserung dazu können die vermehrt eingesetzten Head-Up-Displays gesehen werden, bei denen Informationen auf kleinen Scheiben vor dem Fahrer oder direkt in die Windschutzscheibe projiziert werden. Solange die dort angezeigten Daten nur knapp über der Motorhaube dargestellt werden, ist allerdings auch hier eine Neufokussierung der Augen notwendig. Bei der Informationsprojektion direkt auf die Straße entfallen diese Nachteile. Außerdem kann eine sogenannte „kontaktanaloge“ Darstellungsweise mit geringem Aufwand erreicht werden. Dabei werden die angezeigten Daten dynamisch an die Umgebung angepasst, so dass beispielsweise die zu verwendende Fahrspur oder Abzweigung direkt markiert wird. Laser eignen sich aufgrund ihrer hohen Energiedichte besonders gut für den Einsatz in dynamischen Anzeigesystemen. Durch die hohen Beleuchtungsstärken, die mit Lasern möglich sind, lassen sich hohe Kontraste zwischen projizierter Information und Umgebungslicht erzeugen.

2. Technologie scannender Systeme

Grundsätzlich lassen sich Mikros Scanner in ihren Antriebsmechanismen unterscheiden. Die durch den Antriebsmechanismus erzeugte Kraft führt zu einer Auslenkung der jeweiligen Scannerachse. Am häufigsten ist bei Mikros Scannern die Krafterzeugung durch elektrostatische und elektrodynamische Antriebsmechanismen vorzufinden. Bei elektrostatischen Mik-

roscannern sind Rotor und Stator meist als Fingerelektroden ausgeführt und ermöglichen lediglich ein Anziehen dieser, so dass der Spiegel durch Anlegen einer Spannung in seine Ursprungslage gezogen werden kann. Elektrostatische Mikros Scanner werden deshalb häufig resonant mit einer Rechteckspannung betrieben. Um den Mikros Spiegel in eine Schwingung zu versetzen ist ein bestimmter Anfahrzyklus notwendig. Beginnend von hohen Frequenzen werden diese verringert, bis der Spiegel nahe seiner Resonanzfrequenz betrieben wird. Pro Spiegelschwingperiode ergeben sich zwei Perioden des Ansteuersignals. Ein elektrostatischer Mikros Spiegel wird deshalb mit der doppelten Schwingfrequenz betrieben. Eine definierte Positionierung des Spiegels oder ein beliebiges Bewegungssignal kann mit einem solchen Mikros Scanner nicht umgesetzt werden, da diese typischerweise resonant betrieben werden und somit näherungsweise eine Sinusschwingung ausführen. Auch bei elektrostatische angetriebenen Mikros Scannern gibt es Ansätze, die Elektroden des Stators unter die Elektroden des Rotors zu positionieren, so dass eine beliebige Winkelauslenkung durch Anpassung der Spannung ermöglicht wird.

Bei elektrodynamischen Mikros Spiegeln erfolgt die Krafterzeugung durch einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld. Das Magnetfeld wird dabei durch einen Permanentmagneten unter dem Mikros Spiegel erzeugt. Beim Anlegen einer Spannung fließt ein Strom durch die auf dem Mikros Spiegel verlaufenden Leiterbahnen. Entsprechend der Lorentzkraft wirkt auf diesen Leiter eine Kraft die vereinfacht abhängig von der magnetischen Flussdichte, der Stromstärke und dem Winkel zwischen diesen Größen sowie der Leiterlänge ist. Nach diesem Antriebsprinzip lassen sich die Achsen auch mit beliebigen Signalen, etwa einem Sägezahn, betreiben. Ebenfalls ist der resonante Betrieb mit elektrodynamischen Mikros Scannern möglich.

Zur Erzeugung eines Bildes muss der einfallende Laserstrahl in zwei Raumrichtungen abgelenkt werden. Dies lässt sich entweder durch zwei hintereinander geschaltete 1D Mikros Spiegel oder durch einen kardanisch aufgehängten 2D Mikros Spiegel realisieren. Je nach Betriebsart der jeweiligen Achsen ergeben sich drei grundsätzliche Betriebsmöglichkeiten:

Scanner resonant-resonant: Werden beide Achsen des Mikros Spiegels resonant betrieben, ergibt sich in der Projektion aufgrund der überlagerten Sinusbewegungen eine Lissajous Figur, die je nach Frequenzverhältnis beeinflusst werden kann. Dies hat den Vorteil, dass große Winkelamplituden bei geringen Spannungen ermöglicht werden. Die Bildpunkte werden bei diesem Verfahren nicht nacheinander gescannt.

Scanner quasistatisch-resonant: Eine weitere Möglichkeit ist der quasistatische Betrieb einer Achse und der resonante Betrieb der anderen Achse. Typischerweise wird bei der Bildprojektion ein Sägezahnprofil auf der vertikalen Achse realisiert, so dass ein linearer, vertikaler Geschwindigkeitsverlauf entsteht. Die resonante Achse führt eine Sinusbewegung aus, so

dass sich eine Trajektorie ergibt, die zum Zeilenscanning verwendet werden kann. Die Bildinformation kann sowohl unidirektional als auch bidirektional projiziert werden. Bei der unidirektionalen Projektion ergeben sich gleiche Abstände der Bildpunkte. Bei der bidirektionalen Darstellung kommt es zu einer Pixelverdichtung zu den Rändern. Jedoch ermöglicht ein bidirektionales Verfahren, mehr Licht in die Projektion zu strahlen.

Scanner quasistatisch-quasistatisch: Ein Verfahren, was hauptsächlich zur Darstellung von Vektorgrafiken bzw. Grafikumrissen genutzt werden kann, wird durch den quasistatischen Betrieb auf beiden Achsen erreicht. Hierbei werden nacheinander Punkte einer Gesamtfigur abgefahren, so dass sich die Umrisse dieser als Projektion ergeben. Nachteilig bei diesem Verfahren ist, dass sich – im Gegensatz zu den vorher genannten Verfahren – keine Flächen ausleuchten lassen. Jedoch wird die verfügbare Leistung auf eine kleinere Fläche verteilt, so dass sich höhere Beleuchtungsstärken und damit ein besserer Kontrast zu einer vorhandenen Untergrundbeleuchtung ergeben.

3. Demonstratoraufbau

Wie in den vorausgegangenen Abschnitten dargestellt, lässt sich durch den Einsatz eines schnell bewegten Spiegels in Kombination mit verschiedenfarbigen Laserdioden ein vielseitig einsetzbares, dynamisches Projektionssystem aufbauen. Um gleichzeitig hohe Auflösungen und Kontraste bei einer variablen Farbdarstellung zu ermöglichen, ist die Wahl eines geeigneten Ansteuerungskonzepts notwendig. Umso kleiner der strahlableitende MEMS-Spiegel (**M**icro**e**lectrom**e**chanical **s**ystem) ist, desto hochfrequenter kann er angesteuert werden. Gleichzeitig sind hohe Auflösungen sowie hohe Bildwiederholraten möglich. Dies beschränkt die Auswahl möglicher Lichtquellen, da das abgestrahlte Licht so auf die Spiegelfläche fokussiert werden muss, dass es den Spiegel mit einem durch die Pixelgröße definierten Divergenzwinkel verlässt. Als Lichtquellen kommen als Kantenemitter ausgeführte Laserdioden zum Einsatz, die mit ihrer gegenüber LEDs sehr kleinen Emissionsfläche ein sehr kleines Étendue und damit hervorragende Eigenschaften zur Strahlformung und –lenkung besitzen.

In dem hier vorgestellten Prototypenaufbau (Bild 1) wird die Emission drei verschiedenfarbiger Laserdioden überlagert und anschließend mit einem Mikrospiegel abgelenkt. Die verwendeten Dioden strahlen bis zu 1,6 W blau (450 nm), 150 mW grün (520 nm) und 500 mW rot (638 nm) ab [5 - 7]. Für den gewählten Einsatzzweck eines quasistatisch-resonant betriebenen Mikrospiegels müssen sehr hohe Schaltfrequenzen für die einzelnen Dioden realisierbar sein, um eine hohe Bildwiederholrate bei angemessener Auflösung erreichen zu können. Die verwendeten Treiber ermöglichen Schaltfrequenzen von etwa 10 MHz pro Diode.

Um die von den Dioden emittierten Laserstrahlen zusammen mit dem Mikrospiegel verwenden zu können, ist ein optischer Aufbau zur Strahlformung und –kombination erforderlich. Die Abstrahlcharakteristik einer Laserdiode lässt sich mit zwei Winkeln θ_{\parallel} und θ_{\perp} beschreiben, die ohne weitere optische Elemente zu einem rechteckigen Emissionsbild führen. Die Winkel unterscheiden sich je nach Diodentyp. Für jeden der drei Strahlengänge werden individuell angeordnete optische Bauteile eingesetzt, um ein gleichmäßig beleuchtetes Pixel zu erzeugen. Allen eingesetzten Kantenemittern ist gemein, dass der Öffnungswinkel in einer Richtung deutlich kleiner ist als in der anderen Richtung. Typische Werte für die eingesetzten Dioden sind beispielsweise $\theta_{\parallel} = 6 - 7^{\circ}$ und $\theta_{\perp} = 20 - 40^{\circ}$ (FWHM, Öffnungswinkel bis zur Hälfte der Maximalleistung) [8].

Für die Kombination der verschiedenfarbigen Strahlen werden im Aufbau dichroitische Spiegel verwendet. Diese verfügen über eine teildurchlässige Beschichtung, die bestimmte Wellenlängenbereiche reflektiert, während sie für andere durchlässig ist. Für die Strahlkombination der drei eingesetzten Laser sind zwei dichroitische Spiegel notwendig. Aufgrund der großen Öffnungswinkel der Dioden wird das emittierte Licht kurz hinter der Lichtaustrittsfläche mit Primärlinsen gesammelt, die zur Kollimation der Strahlen eingesetzt werden können. Für den Aufbau als Scanner sollen jedoch Pixel mit einer gewissen Größe erzeugt werden. Erreicht wird dies durch Kombination der einzelnen Primäropitken mit einer weiteren Linse.

Hinter dem Spiegel soll der Strahl über einen in beiden Richtungen ähnlichen Divergenzwinkel verfügen, der die Pixelgröße in einem bestimmten Abstand definiert. Hierzu wird der Laserstrahl zunächst auf den Mikrospiegel fokussiert um sich anschließend mit dem geforderten Winkel aufzuweiten. Mit zunehmender Entfernung vom Lichtaustritt des Scanners vergrößert sich also auch der Laserpunkt.

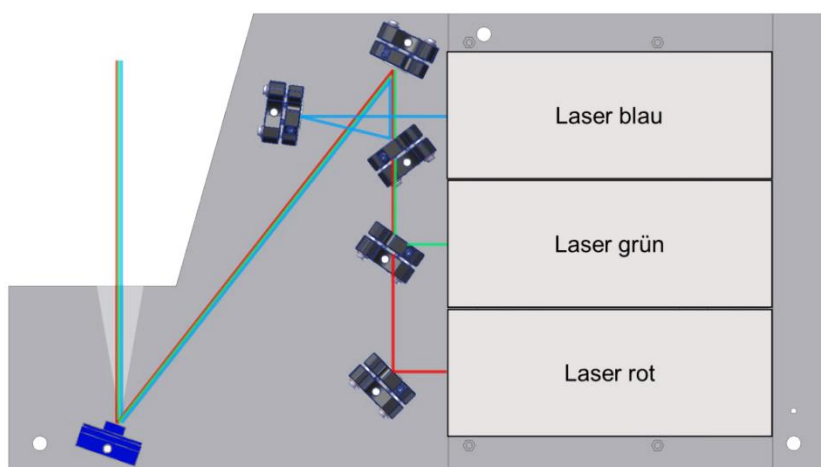


Bild 1: Aufbau des optischen Systems mit Strahlkombination

Ziel des Aufbaus ist eine Pixelgröße von $50 \times 50 \text{ mm}^2$ auf einer angestrahlten Wand in 10 m Entfernung vom Scanner. Um dies zu erreichen muss der kombinierte Strahl einen Öffnungswinkel (zur optischen Achse) von $0,14^\circ$ besitzen. Hierzu wird die Länge der drei optischen Pfade auf die Abstrahlcharakteristik der jeweiligen Diode angepasst (Bild 1). Die Strahllenkung erfolgt entweder über die bereits beschriebenen dichroitischen Spiegel oder über breitbandig reflektierende Spiegel, die jeweils in zwei Achsen eingestellt werden können und somit zwei Freiheitsgrade für die Strahlpositionierung liefern. Für die Überlagerung der drei Strahlen sind insgesamt acht Freiheitsgrade notwendig. Um bestmögliche Ergebnisse für die Darstellung weißer Farben zu erzeugen, muss die Effizienz des grünen und roten Strahlengangs maximal sein, da die blaue Diode im Verhältnis dazu immer genügend Leistung zur Verfügung stellen kann. Aus diesem Grund wird die in Bild 1 dargestellte Anordnung gewählt. Insgesamt werden vier Spiegel für die Strahlkombination und ein weiterer für die Positionierung des kombinierten Strahls auf dem Mikroskopspiegel verwendet, so dass das Gesamtsystem über zehn Freiheitsgrade verfügt.

Besondere Beachtung muss dem Thema Augensicherheit gewidmet werden, da das Scannermodul Laserstrahlung direkt in den Verkehrsraum emittiert. Durch den definierten Divergenzwinkel des abgestrahlten Lichts nimmt die erzeugte Bestrahlungsstärke quadratisch mit der Entfernung ab. Demzufolge ist das System ab einer von der emittierten Leistung abhängigen Entfernung augensicher. Dadurch, dass sich der Laserstrahl in dem scannenden System permanent bewegt, ist der zeitgemittelte Energieeintrag sehr gering. Zur Sicherstellung der Augensicherheit müssen jedoch weitere Konzepte eingesetzt werden. So sollte das System erst ab einer gewissen Fahrzeuggeschwindigkeit aktiviert werden können. Hier ist eine Kopplung mit der automatischen Türverriegelung denkbar. In Verbindung mit der Fahrzeugkamera und deren Personen- und Situationserkennung lassen sich Notaus-Kriterien definieren, so dass der Scanner automatisch deaktiviert wird, wenn sich Lebewesen im gefährdeten Bereich befinden oder die Situation unvorhersehbare Risiken birgt, beispielsweise Reflektionen an Pfützen. Da Nickbewegungen des Fahrzeugs den Abstrahlwinkel des Scanners verändern, sollte das System so hoch wie möglich am Fahrzeug montiert werden [9].

4. Ergebnisse

Die Emission von Laserdioden ist stark von deren Betriebstemperatur abhängig. Einerseits ändert sich die abgestrahlte Wellenlänge, andererseits auch die optische Ausgangsleistung. Für den Einsatz im Kraftfahrzeug kann die Umgebungstemperatur der Dioden nicht als konstant angenommen werden, da sich die Dioden sowohl durch ihre Verlustleistung selbst erwärmen als auch starken klimatischen Umgebungseinflüssen ausgesetzt sind.

In Bild 2 ist der mit den Dioden darstellbare Farbraum als Dreieck in eine CIE-Normfarbtafel eingetragen, ebenso der von der ECE als weiß zugelassene Bereich für Fahrzeugscheinwerfer. Die drei dargestellten Kurven, auf denen sich der emittierte Farbort verschiebt, basieren auf den Annahmen dass die Temperatur aller Dioden gleich ist und der Wirkungsgrad des optischen Systems 50 % für die blaue Diode, 52 % für die grüne und 35 % für die rote beträgt, unabhängig von der emittierten Leistung der Dioden und deren Temperatur. In der Praxis ändert sich das Strahlprofil der Laserdioden in Abhängigkeit von Betriebsstrom und Temperatur, was hier vernachlässigt wird. Außerdem wird angenommen, dass sich die Emissionswellenlänge im betrachteten Temperaturbereich von 20 °C bis 30 °C kaum ändert.

Die ausgefüllten Punkte in Bild 2 markieren den bei 20 °C abgestrahlten Farbort und die Kreise den bei 30 °C. Der Wirkungsgrad aller drei Dioden sinkt mit steigender Temperatur (vergleiche Bild 3). Die Emission der grünen Diode ist bei allen betrachteten Betriebsströmen nur geringfügig von der Temperatur des Diodengehäuses abhängig.

Gleiches gilt für die blaue Diode, wenn sie deutlich oberhalb der Laserschwelle betrieben wird. Bei einem Strom von 180 mA hingegen ist eine starke Abhängigkeit der abgestrahlten Leistung von der Betriebstemperatur zu erkennen. Die rote Diode ist stärker von der Temperatur abhängig als die beiden anderen, vor allem bei niedrigen Betriebsströmen. Ein Betrieb der roten Diode oberhalb vom 30 °C Gehäusetemperatur soll vermieden werden [7].

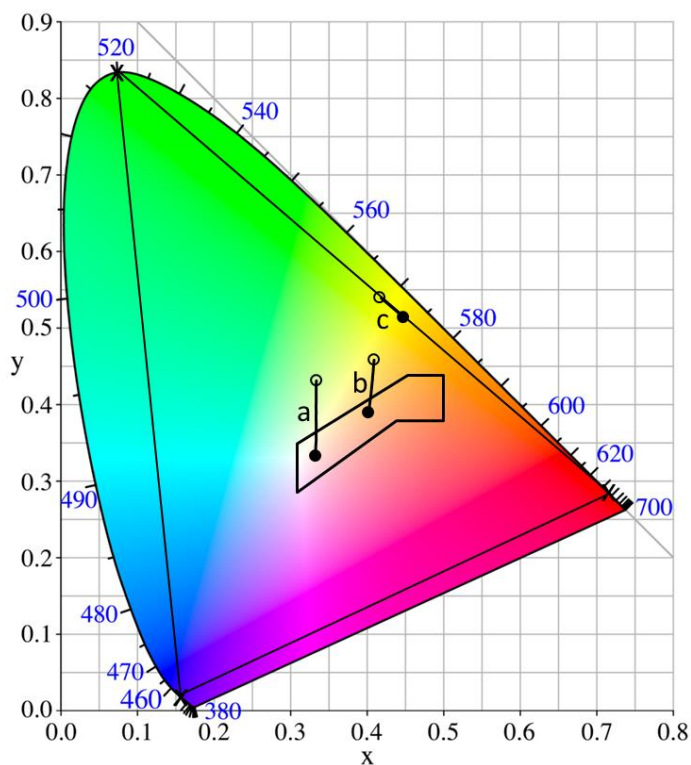


Bild 2: Temperaturabhängige Änderung des Farborts des emittierten Lichts

Folgende drei Zustände sind in Bild 2 dargestellt, wobei der zu erzeugende Farbort bei 20 °C Diodentemperatur ermittelt wird:

- ECE-konformes Weiß mit hoher Farbtemperatur (5485 K) und reduzierter Ausgangsleistung des Systems (rot 365 mA, grün 183 mA, blau 180 mA). Die Werte der blauen Diode entsprechen den Messwerten aus Bild 3, die Werte der anderen werden linear interpoliert. Die blaue Diode wird nahe ihrer Laserschwelle betrieben, so dass ihre Ausgangsleistung stark temperaturabhängig ist. Auch die Emission der roten Diode nimmt mit steigender Temperatur deutlich ab. Da die grüne Diode eine geringere Temperaturabhängigkeit zeigt, verschiebt sich der Farbort mit steigender Temperatur in Richtung steigender y-Werte und liegt bei 30 °C deutlich außerhalb des ECE-Weißraums. Eine Erhöhung der Ausgangsleistung würde den emittierten Farbort stabilisieren, da die Temperaturabhängigkeit der blauen Diode bei höheren Betriebsströmen zurückgeht.
- ECE-konformes Weiß mit niedrigerer Farbtemperatur (3575 K). Die rote Diode wird mit 600 mA betrieben, was dem maximal sinnvollen Strom bei einer Temperatur von 30 °C entspricht. Wie in Fall a) wird die blaue Diode mit 180 mA bestromt und die temperaturabhängige Leistung der grünen Diode bei 270 mA durch Interpolation bestimmt. Dieser Betriebszustand ist, ähnlich wie der Zustand a), stark durch den Rückgang der Emission der blauen Diode bei steigender Temperatur geprägt. Auch hier bewirkt eine Temperaturänderung um wenige Kelvin die Erzeugung einer nicht ECE-konformen Lichtfarbe.

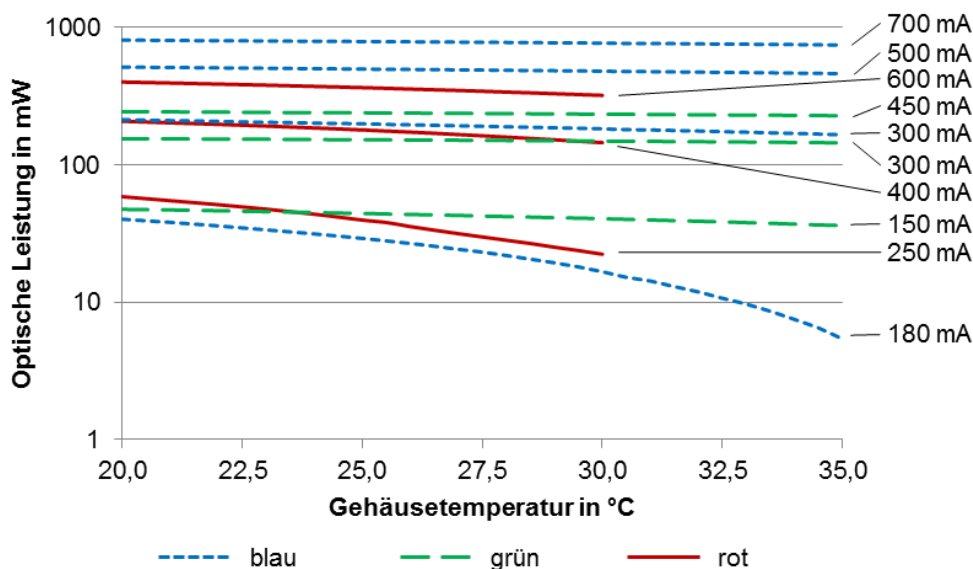


Bild 3: Optische Ausgangsleistung der Dioden in Abhängigkeit von der Gehäusetemperatur

- c) Gelb, bei maximal sinnvollem Strom der roten Diode von 600 mA. Die blaue Diode ist ausgeschaltet, die grüne wird mit 300 mA betrieben. Bei diesem Zustand ist die Abhängigkeit des Farborts von der Betriebstemperatur deutlich geringer als in den beiden zuvor betrachteten Fällen, da die Ausgangsleistung der roten und der grünen Diode weniger temperaturabhängig ist als die der blauen bei kleinen Strömen. Allerdings nimmt die Emission der roten Diode mit steigender Temperatur stärker ab als die der grünen, so dass sich die Lichtfarbe von einem satten gelb zu einen leichten gelbgrün verschiebt.

Bedingt durch die eingebrachte Laserenergie muss neben den Laserdioden selbst auch die in den verwendeten Mikrospiegel eingebrachte Temperatur beim Bildaufbau berücksichtigt werden. Dabei besitzt insbesondere die resonante Achse eine starke Abhängigkeit von der Temperatur. Weiterhin ist die Spiegelplatte des Mikrosanners mit einer Aluminiumbeschichtung appliziert, die etwa 10 bis 15% der auftreffenden Laserleistung in Form von Wärme absorbiert. Die Aufnahme der Wärmeenergie hat zur Folge, dass die Aufhängung weicher wird und sich die Federsteifigkeit verringert. Wenn die Phasenlage nicht bekannt ist, kann der Laserimpuls mit der örtlichen Lage in der Projektion nicht synchronisiert werden, wodurch es zu Bildverschiebungen kommt. In Bild 4 ist die Verschiebung des Amplitudengangs durch eine Temperaturerhöhung bzw. Erhöhung der Laserleistung qualitativ dargestellt.

Beim Betrieb der resonanten Achse mit fester Frequenz und ohne Regelung würde eine Temperaturerhöhung zu einer Amplitudenverringering von 1 zu 2 führen. Wird hingegen eine Resonanzregelung, etwa durch eine „Phase Locked Loop“ verwendet, dann folgt bei einer Temperaturänderung lediglich eine Verschiebung der Frequenz von 1 zu 2. Das System bleibt folglich im Resonanzbetrieb.

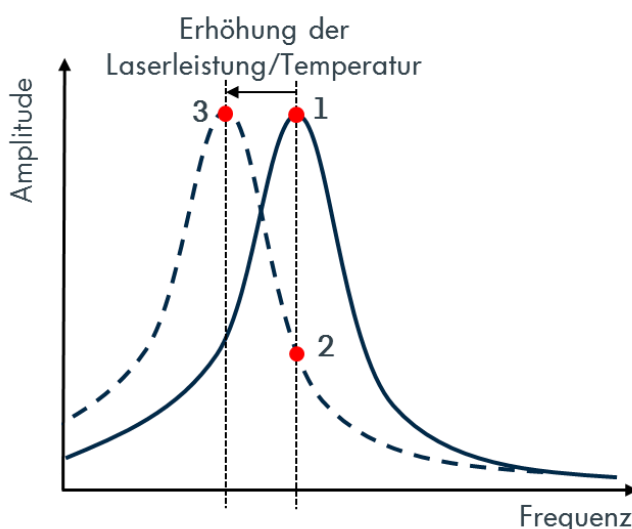


Bild 4: Amplitudengang in Abhängigkeit von der Laserleistung/ Temperatur am Mikrospiegel

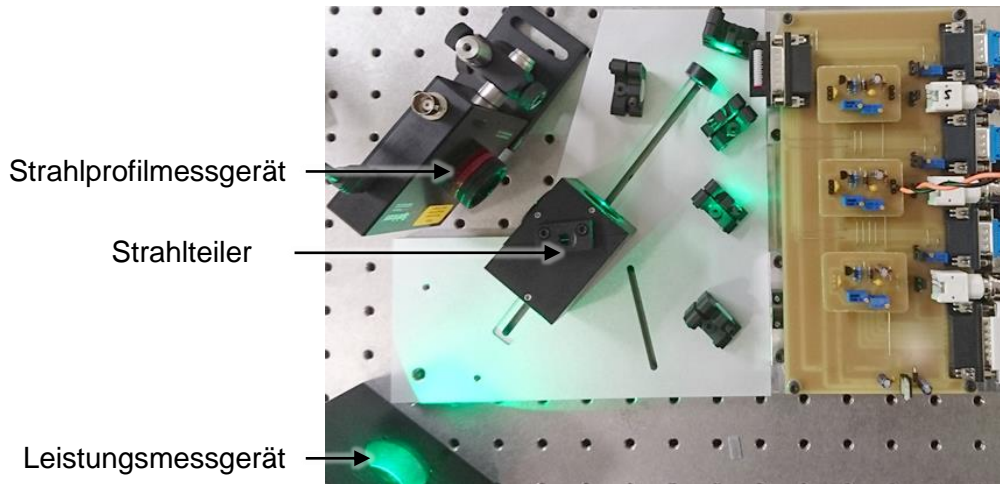


Bild 5: Versuchsaufbau zur Vermessung des Strahlprofils

Aufgrund der Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Temperatur bzw. Laserleistung ist insbesondere bei Verwendung von höheren Laserleistungen die Implementierung einer Resonanzregelung erforderlich. Weitere Zusammenhänge werden in [10] erläutert.

Die drei von den Laserdioden emittierten Strahlenbündel müssen weiterhin so überlagert werden, dass sie einerseits möglichst nur den Mikrospiegel ($900\ \mu\text{m} \times 1000\ \mu\text{m}$) treffen und andererseits der im Fernfeld erzeugte Bildpunkt homogen in Farbe und Intensität erscheint. Zur Charakterisierung der Strahlprofile an der Position des Scannerspiegels wird der in Bild 5 dargestellte Versuchsaufbau genutzt. Im optischen Pfad wird ein 95/5-Strahlteiler eingesetzt, wobei der 95%-Anteil der Strahlung auf ein Leistungsmessgerät geleitet wird.

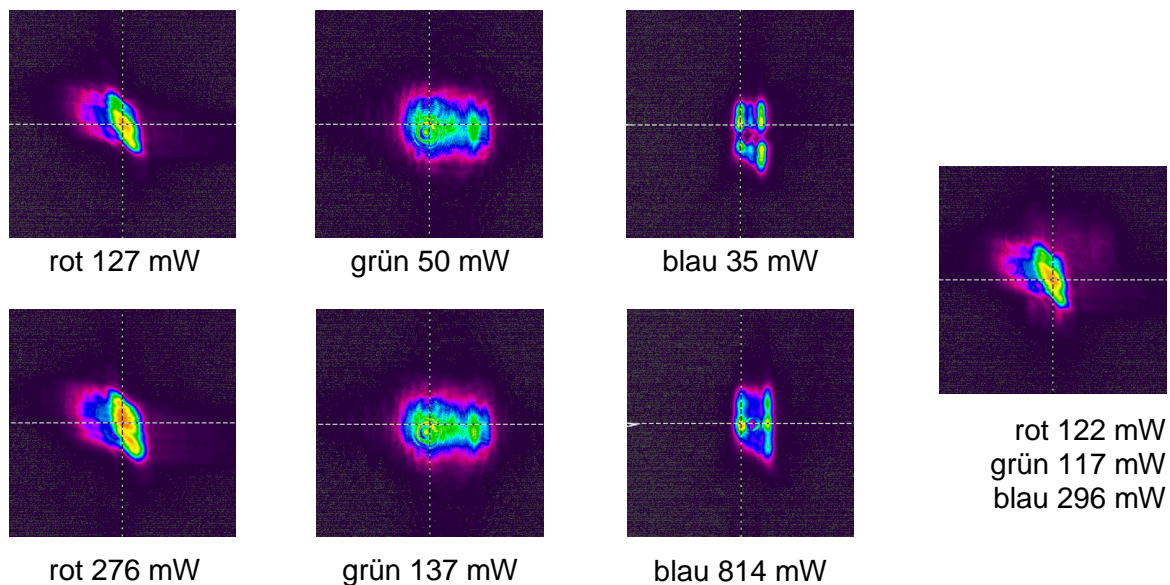


Bild 6: Strahlprofile der Laserdioden am Mikrospiegel

Um die Strahlgeometrien an der Position des Mikrospiegels erfassen zu können, ist der optische Pfad im Messaufbau zwischen den einzelnen Laserdioden und dem Strahlprofilmessgerät näherungsweise genau so lang wie im realen Setup zwischen Dioden und Mikrospiegel. In Bild 6 sind die Strahlprofile der einzelnen fokussierten Laserdioden dargestellt und jeweils der Punkt höchster Bestrahlungsstärke markiert. Die Bestrahlungsstärke wird in Falschfarben wiedergegeben, wobei jedes Bild auf die höchste lokale Bestrahlungsstärke normiert ist. Die dargestellte Fläche beträgt jeweils $2000\ \mu\text{m} \times 2000\ \mu\text{m}$. Die angegebene Leistung entspricht der optischen Leistung, die auf dem MEMS-Spiegel ankommen würde.

Die grüne und die blaue Diode beleuchten eine annähernd rechteckige Fläche auf dem Sensor, wie es für Kantenemitter zu erwarten ist. Bei jedem untersuchten Betriebsstrom ist die von diesen Dioden beleuchtete Fläche kleiner als der Mikrospiegel (Bewertungskriterium der Strahlbreite: $D4\sigma$). Das Strahlprofil der roten Diode hingegen ist deutlich asymmetrisch.

Bild 7 zeigt das von dem aufgebauten Prototyp erzeugte Bild auf eine Abblendlichtverteilung projiziert. Um die notwendige Beleuchtungsstärke für die Sichtbarkeit von scannend erzeugten Symbolen bestimmen zu können, muss auch immer die Umgebungsbeleuchtung berücksichtigt werden. Khanh und Huhn [11] geben einen Zusammenhang zwischen benötigter Leuchtdichte einer Projektion und der Umgebung an, der sich in eine Beleuchtungsstärke überführen lässt. Bei Umgebungsbeleuchtungen von bis zu 50 lx (Dämmerung) ergeben sich so erforderliche Beleuchtungsstärken von etwa 3 lx und bei Sonnenaufgang/-untergang (ca. 700 lx) etwa 30 lx. Für die Erzeugung der Symbole in Bild 7 wurden Laserleistungen von 110 mW für blau, 67 mW für grün und 112 mW für rot am Scannerausgang eingestellt.

Daraus ergibt sich ein Lichtstrom von 52 lm. Um diesen in eine Beleuchtungsstärke umzurechnen, wird die Annahme getroffen, dass der Lichtstrom gleichmäßig über der abgescannten Fläche verteilt wird. Dadurch ergibt sich bei einer ansteuerbaren Fläche von $9\ \text{m}^2$ für den eingestellten weißen Farbort eine mögliche Beleuchtungsstärke von 5,8 lx, was bereits jetzt eine Erkennbarkeit in verhältnismäßig dunklen Umgebungen gewährleistet.

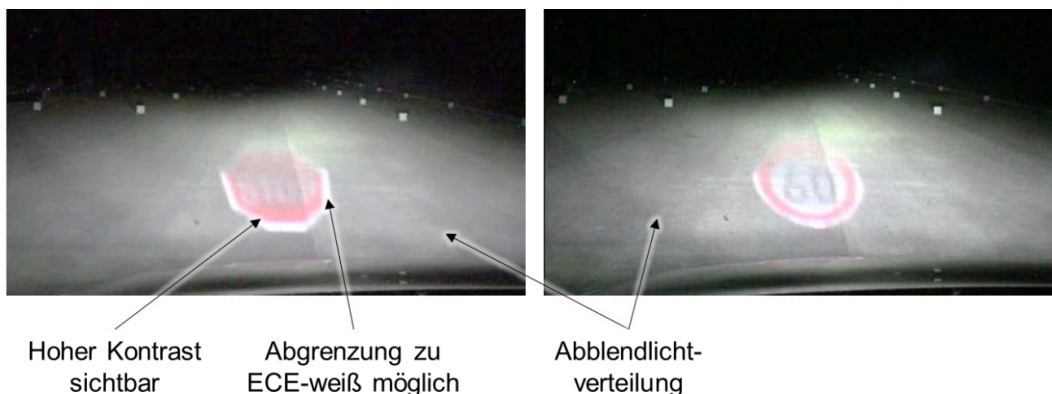


Bild 7: Scannend erzeugtes Bild auf eine Abblendlichtverteilung projiziert [8]

Bei jeder nahezu monochromatischen Lichtquelle treten Interferenzeffekte auf, so auch bei dem hier vorgestellten Laserscanner. Typischerweise entstehen stochastische Specklemuster, sowohl auf entsprechend beleuchteten, nicht idealglatten Oberflächen als auch im menschlichen Auge.

Damit sich ein intensives Specklemuster herausbilden kann, darf der Weglängenunterschied der Lichtstrahlen, die einen Punkt auf der Netzhaut beleuchten, nicht größer sein als die Kohärenzlänge des Lichts. Diese liegt bei der eingesetzten blauen Diode bei etwa 90 µm. Bedingt durch die Rauheit der Straße, welche die 90 µm bei weitem übersteigt, erzeugt der Scanneraufbau unter realen Betriebsbedingungen keine störend ausgeprägten Speckles.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand eines Demonstratoraufbaus wurde das System eines scannenden RGB-Lasermoduls erläutert und untersucht. Dabei konnte die prinzipielle Eignung der verwendeten Technologie für die Informationsprojektion gezeigt werden. Es können hohe Kontraste in einem großen Farbraum erzeugt werden und somit kann eine gute Sichtbarkeit der projizierten Daten gewährleistet werden. Mit Laserleistungen im Milliwatt-Bereich konnte bereits eine Abblendlichtverteilung mit ausreichend großen und kontrastreichen Symbolen überlagert werden (Bild 7). Herausforderungen für die Weiterentwicklung der Technologie liegen zum einen auf der optischen Seite in der Erhöhung der Laserleistung, um die Sichtbarkeit der dargestellten Informationen auch bei Tageslicht zu ermöglichen, sowie in der Vergrößerung der Ansteuerungsgeschwindigkeit um eine höhere Auflösung zu erreichen. Zum anderen müssen aber auch Aspekte wie Augensicherheit und allgemeine Auswirkungen derartiger Systeme auf die Verkehrssicherheit näher betrachtet werden, um eine Zulassungsfähigkeit anstreben zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Werkstetter, Mario; Weber, Stefan; Hirth, Florian; Amann, Christian: *Laserlicht im BMW I8 - Ansteuerung und E/E-Integration*. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (2014), Nr. 04/2014, S. 26-30.
- [2] Weber, Stefan; Buck, Alexander; Amann, Christian: *Laserlicht im BMW I8 - Design, Systemintegration und Test*. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (2014), Nr. 09/2014, S. 60-65.
- [3] Lehner-Ilsanker, Tanja: *Der Audi R8 LMX - erstes Serienmodell der Welt mit Laser-Fernlicht*. Pressemitteilung, 2014.

- [4] Fries, Benedikt; Gut, Carsten; Laudénbach, Thomas; Mühlmeier, Martin: *Laserlicht für den Rennwagen Audi R18 E-Tron Quattro*. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 116 (2014), Nr. 6, S. 38-42.
- [5] OSRAM OS, *Data sheet PL-TB450B preliminary*, June 12, 2013.
- [6] OSRAM OS, *Data sheet PLP 520 preliminary*, September 30, 2013.
- [7] ARIMA Lasers, *Data sheet ADL63V0-BTP*, September, 2014.
- [8] Roth, Joscha; Wallaschek, Jörg; Kloppenburg, Gerolf; Lachmayer, Roland; Meyer, Benjamin; Thomschke, Sebastian: *RGB-Laser Scanning Module for Onroad Projection*. In: Khanh, Tran Quoc (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. - ISBN 978-3-8316-4482-7, S. 385-394.
- [9] Kloppenburg, Gerolf; Wolf, Alexander; Lachmayer, Roland: *High-resolution vehicle headlamps: technologies and scanning prototype*. *Adv. Opt. Techn.* 2016.
- [10] Roth, Joscha; Meyer, Benjamin; Thomschke, Sebastian: *Laser Scanning Unit for Light Symbol Projection*. In: *Vision 2014 -Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*; Versailles, France; SIA Proceedings
- [11] Khanh, Tran Quoc; Huhn, Wolfgang: *Sichtverbesserungssysteme*. In Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer Vieweg, 2015. - ISBN 978-3-658-05734-3.