Über die Umsetzung einer gerichteten Signalleuchte für automatisierte Fahrzeuge auf Basis einer asphärischen Fläche

Jan-Henning Willrodt[1], Sebastian Döhler[2], Jörg Wallaschek[3]

[1]Institut für automobile Lichttechnik und Mechatronik (L-LAB), Rixbecker Str. 75, 59552 Lippstadt

[2]Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiß-Promenade 2, 07745 Jena

[3]Institut für Dynamik und Schwingungen (IDS), Appelstr. 11, 30167 Hannover

1 Abstract

In der Zukunft werden automatisierte Fahrzeuge am Straßenverkehr teilnehmen. Dabei entfällt nicht nur die Fahraufgabe für den Fahrzeugführer, sondern auch die Möglichkeit für andere Verkehrsteilnehmer, mit dem Fahrer zu kommunizieren. Heutzutage wird besonders der Blickkontakt als eindeutig adressierte Detektionsrückmeldung durch andere Verkehrsteilnehmer interpretiert. Spezielle Lichtfunktionen könnten dennoch Kommunikation mit automatisierten Fahrzeugen ermöglichen. Der vorliegende Beitrag beschreibt Ergebnisse von Untersuchungen zur Umsetzbarkeit gerichteter farbiger Signalleuchten an automatisierten Fahrzeugen auf Basis der adressierten Strahlaufweitung.

2 Motivation

Mit der Möglichkeit, sich in Zukunft mit automatisierten Fahrzeugen durch den Straßenverkehr bewegen zu können, entfällt die Fahraufgabe, die zuvor durch den Fahrzeugführer übernommen wurde. Da sich diese jedoch nicht allein auf die Längs- und Querführung des Fahrzeugs beschränkt, sondern besonders im Niedergeschwindigkeitsbereich (innerstädtischen Verkehr) [1] auch die aktive nonverbale Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern oder Radfahrern umfasst, muss dieser Teil der Fahraufgabe zukünftig ebenfalls von automatisierten Fahrzeugen übernommen werden. Die Integration solcher Fahrzeuge in den Straßenverkehr wird daher neue Kommunikationssysteme erfordern. In einer Studie [2]

konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Detektionsrückmeldung sowie die Übermittlung der Botschaft des Vorfahrtsverzichts durch automatisierte Fahrzeuge an umstehende Personen transportiert werden muss. Weiterhin wurden hier repräsentative Verkehrssituationen beschrieben, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Neben der Verwendung von Displays und Projektionen [3] kommen unterschiedliche Technologien bei der Übermittlung von Botschaften zum Einsatz, wie z.B. das Imitieren von Augen am Fahrzeug [4] oder die Verwendung von Lichtsignalen, wodurch eine besonders intuitive Interaktion ermöglicht werden soll [5]. Eine technische Besonderheit ergibt sich aus der Forderung, dabei eine hochauflösend gerichtete und somit eindeutige Kommunikation sicherzustellen: das Licht einer entsprechenden Signalleuchte darf nur in dem Raumwinkel wahrgenommen werden, in dem sich die zu adressierende Person befindet (Fig. 1). Nur durch ein gerichtetes Signal kann eine Detektionsrückmeldung eindeutig transportiert werden. Optional kann durch zeitgleiches Adressieren von Raumwinkeln, in denen keine Detektion erfolgt ist, aktiv eine Warnung, beispielsweise durch das Aussenden von rotem Licht, kommuniziert werden. Die lichttechnische Herausforderung besteht also darin, das Lichtmodul so zu gestalten, dass ein möglichst großer Bereich der Umgebung separat voneinander adressiert werden kann. Dabei müssen jedoch Bauraumrestriktionen beachtet werden. Der vorliegende Beitrag beschreibt nach der Festlegung lichttechnischer Anforderungen die Ergebnisse von Untersuchungen zur Umsetzbarkeit farbiger Signalleuchten an automatisierten Fahrzeugen auf Basis von asphärischen Zylinderlinsen.

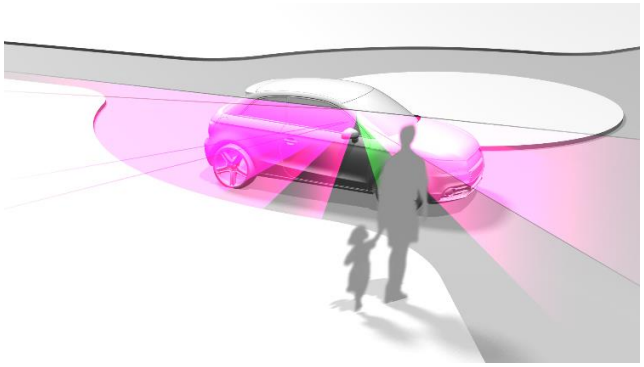

Fig. 1: Prinzip einer gerichteten Signalleuchte zur eindeutigen Kommunikation einer Detektionsrückmeldung

3 Lichttechnische Anforderungen an eine farbige Signalleuchte

In diesem Kapitel werden sowohl Fragestellungen bezüglich des Designs der Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) als auch technische Anforderungen diskutiert.

3.1 Positionierung

Da das Kommunikationsmodul die nonverbale Kommunikation des Fahrzeugführers ersetzen soll, ist dies an dem Ort zu platzieren, an dem eine Kontaktaufnahme durch den Fahrzeugführer erwartet werden würde. In diesen Bereich blickt ein potentieller Adressat mit einem erhöhten Maß an Aufmerksamkeit [6]. Für an der Fahrzeugseite befindliche Verkehrsteilnehmer stellt dies der Bereich um die B-Säule und für Entgegenkommende der Bereich des Rückspiegels an der Windschutzscheibe dar. Hinter dem Fahrzeug befindliche Adressaten blicken durch die Rückscheibe in Richtung des Fahrersitzes. Somit ergeben sich vier Lichtmodule, um eine Rundumkommunikation zu gewährleisten.

3.2 Gesamtöffnungswinkel

Um die nichtadressierbaren Bereiche um das Fahrzeug möglichst gering zu halten, ist pro Lichtmodul ein minimaler Gesamtöffnungswinkel $\propto_h$ einzuhalten (Fig 2, links). In BAIER [7] wird der Sicherheitsabstand zwischen Fahrbahn und Radweg auf $s_{min} = 0{,}75\ \mathrm{m}$ gesetzt. Dies kann als lateraler Mindestabstand zwischen Radfahrer und dem automatisierten Fahrzeug gesetzt werden, bis zu dem eine Kommunikation stattfinden muss.

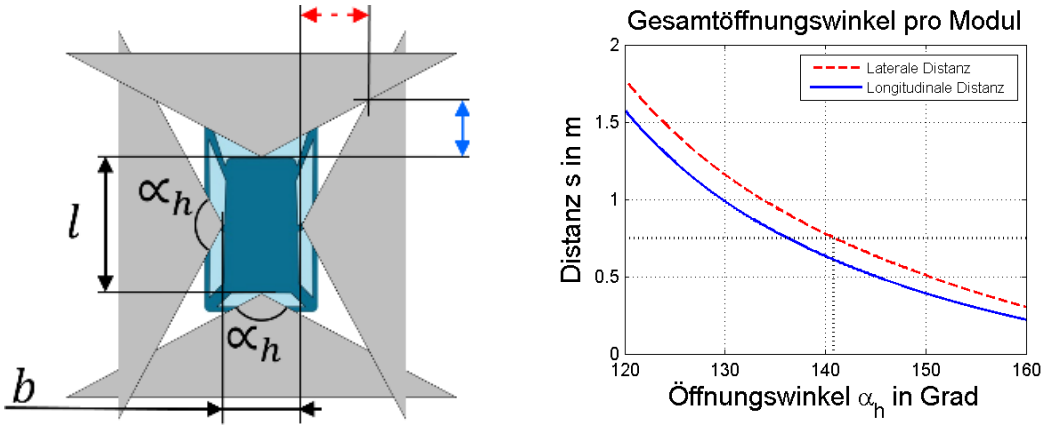

Fig. 2: Positionierung der Lichtmodule und daraus resultierende Gesamtöffnungswinkel

Durchschnittliche Fahrzeugdimensionen können SCHUSTER ET AL. [8] entnommen werden. Davon ausgehend, dass eine Platzierung am Rückspiegel in der Windschutzscheibe etwa zwei Meter hinter dem Fahrzeuggrill liegt, lässt sich der Abstand zwischen Lichtmodul Frontscheibe und Lichtmodul Heckscheibe auf $l = 3\ \mathrm{m}$ festlegen. Der Abstand zwischen den seitlichen Lichtmodulen beträgt $b = 1{,}9\ \mathrm{m}$ [8]. Dies führt zu einem Öffnungswinkel pro Modul von $\propto_h = 141°$ (Fig. 2, rechts). Um sowohl einen großen Radfahrer als auch ein kleines Kind in der Entfernung s_{min} adressieren zu können, wird vertikal der Winkel $\propto_v = 90°$ festgelegt.

3.3 Adressierentfernung und Öffnungswinkel pro diskretem Kanal

In WILLRODT UND WALLASCHEK [2] wird eine Verkehrssituation beschrieben, in der ein abbiegendes Fahrzeug den Verkehrsweg eines geradeaus fahrenden Radfahrers schneidet (Unfalltypen 232 und 243 [9]). Diese Situation wurde in der Studie nicht nur als besonders gefährlich eingestuft, sondern weist auch die größten Entfernungen zwischen Kommunikationsmodul und Adressaten auf. Hier benötigt ein vorfahrtberechtigter Radfahrer eine Detektionsrückmeldung durch das Fahrzeug, um den Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten. 95% der Radfahrer, welche den Unfalltypen 232 und 243 zum Opfer fallen, hatten Geschwindigkeiten von $v_{0,rad} \leq 25\ \mathrm{km/h}$ [10]. Davon ausgehend, dass der Radfahrer dem abbiegenden Fahrzeug entgegenkommt und eine Detektionsrückmeldung mindestens drei Sekunden vor einer möglichen Kollision kommuniziert werden sollte, folgt eine maximale Kommunikationsdistanz von $s_{max} = 25\ \mathrm{m}$. In JÜRGENS ET AL. [11] wird die Breite eines Kopfes von $a_{min} \leq 0{,}16\ \mathrm{m}$ für 95% sowie eine Schulterbreite der schmalsten 5% der Bevölkerung von $a_{max} \leq 0{,}32\ \mathrm{m}$ festgelegt. Um ein eindeutiges Adressieren gewährleisten zu können, muss im Bereich von s_{min} bis s_{max} mithilfe diskreter Leuchtkanäle mit je einem horizontalen Kanalöffnungswinkel von $\propto_{h,ch}$ ein adressierender, horizontaler Öffnungswinkel in den Grenzen von a_{min} und a_{max} ausgeleuchtet werden. Je schmaler ein Kanal abstrahlt, desto präziser kann die Kanalbreite adaptiert werden, desto mehr Kanäle *k* werden aber auch benötigt. Um die Anforderungen zu erfüllen, ergibt sich pro Kanal ein maximaler horizontaler Öffnungswinkel von $\propto_{h,ch} = 0{,}244°$ (Fig. 3). Eine Überlappung benachbarter Kanäle um 50% kann diesen horizontalen Öffnungswinkel um den Faktor zwei vergrößern. Dabei ist der Grad der Kanalüberlappung abhängig vom gewählten Adressierungselement und hat keinen Einfluss auf die in Kapitel 4 beschriebene Optik.

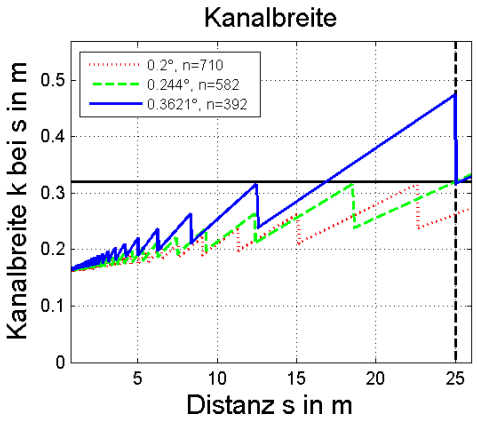

Fig. 3: Adressierende Kanalbreite k als Funktion von Distanz und Kanalöffnungswinkel

3.4 Erkennbarkeit der Signalleuchte

Eine besondere Anforderung an eine Signalleuchte wird an ihre Erkennbarkeit gestellt. So muss ihr Licht bei strahlend hellem Sonnenschein, also bei Umgebungsleuchtdichten von bis zu $L_U = 10^3 \ldots 10^4\ \mathrm{cd/m^2}$ [12] deutlich erkennbar sein. Nach GERDES [13] kann ein Verkehrsteilnehmer ein Lichtzeichen nur dann wahrnehmen, wenn sich die Leuchtdichte des Lichtzeichens um einen Mindestwert von der Umgebungsleuchtdichte unterscheidet. Dieser Schwellwert des Unterschieds zur Umgebungsleuchtdichte wird als Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_S bezeichnet und folgt für $L_U = \mathrm{konst.}$ dem Verlauf von Fig. 4, links. Der Sehwinkel $\propto$ beschreibt dabei den Winkel, den der Durchmesser einer betrachteten Kreisfläche bis zur Pupille P des Betrachters aufspannt (Fig. 4, rechts).

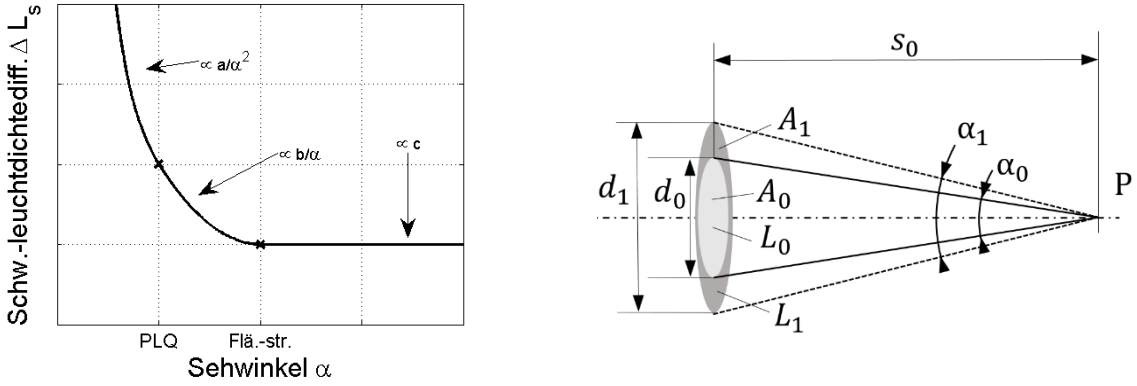

Fig. 4: Schwellenleuchtdichtedifferenzen (links) und Sehwinkel (rechts)

Für große leuchtende Flächen, also Flächenstrahler (in Fig. 4 abgekürzt mit Flä.-str.), ist die Schwellenleuchtdichtedifferenz sehwinkelunabhängig, es gilt das WEBER-FECHNER-Gesetz. Die Bedingung für eine ausreichende Erkennbarkeit lässt sich also über eine Mindestleuchtdichte ausdrücken und dient als Grundlage für die Auslegung herkömmlicher Signalleuchten wie der Heckleuchte [14]. Mit kleiner werdendem Sehwinkel $\propto$ steigt die Schwellenleuchtdichtedifferenz an. Sobald die Ausbreitung der leuchtenden Fläche unterhalb des Auflösungsvermögens des Auges liegt, wird die leuchtende Fläche als Punktlichtquelle (in Fig. 4 PLQ) wahrgenommen. Die Schwellenleuchtdichtedifferenz folgt nun dem RICCO'schen Gesetz. Dies besagt, dass für gleiche Erkennbarkeiten das Produkt aus leuchtender Fläche A und der Leuchtdichte, also die Lichtstärke I, konstant sein muss. Eine Verdoppelung der leuchtenden Fläche A_0 auf A_1 (Fig. 4, rechts) erlaubt beispielsweise ein Halbieren der Leuchtdichte. Für konstante Betrachtungsentfernungen s_0 kann also eine Mindestlichtstärke I_0 als Maß für ausreichende Erkennbarkeit gewählt werden. Der Sehwinkel $\propto$ ist jedoch neben dem Durchmesser der leuchtenden Fläche auch von der Be-

trachtungsentfernung s abhängig. So kann für verschiedene Größen bei verschiedenen Betrachtungsentfernungen der gleiche Sehwinkel resultieren (Fig. 5). Demnach sind die Flächen A_0 und A_2 aus ihren unterschiedlichen Entfernungen s_0 und s_2 bei senkrechtem Betrachten gleich gut erkennbar, sofern der Betrag ihrer Leuchtdichten identisch ist (Gl. 1).

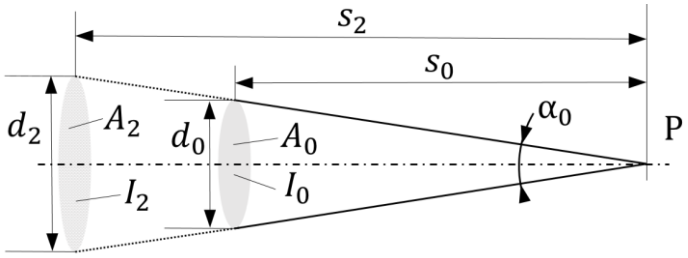

Fig. 5: Sehwinkel ∝ als Funktion von Durchmesser und Betrachtungsentfernung

$$\Delta L_S = f(\propto) \tag{1}$$

$$L_0 = L_2 = \frac{I_0}{A_0} = \frac{I_2}{A_2} \tag{2}$$

Wurde für den Betrachtungsabstand s_0 eine Mindestlichtstärke I_0 ermittelt, die für konstante Erkennbarkeit gewählt wird, so gilt Gl. 3.

$$I_0 = \text{konst.} = A_0 \cdot L_0 \tag{3}$$

Für die Größe der leuchtenden Fläche lässt sich Gl. 4 verwenden.

$$\tan\left(\frac{\propto}{2}\right) = \frac{d}{2s}$$

$$A_i = \frac{\pi}{4} \cdot (2s)^2 \cdot \tan^2\left(\frac{\propto}{2}\right) \qquad \text{mit} \propto << 1$$

$$A_i = \frac{\pi}{4} \cdot \propto^2 \cdot {s_i}^2 \tag{4}$$

Aus Gl. 2 und Gl. 4 sowie der Vereinfachung mittels des photometrischen Entfernungsgesetzes für Punktlichtquellen ergibt sich folgender formaler Zusammenhang nach Gl. 5, woraus sich mit ${s_0}^2 = \text{konst.}$ Gl. 6 aufstellen lässt. Das RICCO'sche Gesetz zeigt, dass im Arbeitsbereich s für gleiche Erkennbarkeit die Beleuchtungsstärke E konstant ist.

$$I_0 = \text{konst.} = \frac{I_2}{{s_2}^2} \cdot {s_0}^2 = E \cdot {s_0}^2 \tag{5}$$

$$E = \text{konst.} = \frac{I_i}{{s_i}^2} \tag{6}$$

Eine leuchtende Fläche A_0 im Abstand s_0 erzielt also die gleiche Beleuchtungsstärke E am Ort P wie eine leuchtende Fläche A_2 im Abstand s_2 und stellt hier wie erwartet das Kriterium für ausreichende Erkennbarkeit im gesamten Arbeitsbereich s dar. Weitere Erläuterungen können BAER ET AL [15] entnommen werden.

3.4.1 Erkennbarkeitsstudie zum Einfluss der geometrischen Form

Die Literatur stellt Untersuchungen zu Erkennbarkeiten von runden Signalleuchten bereit. Genannt seien hier nur GERDES [13], ADRIAN [16] oder JAINSKI [12]. Sie zeigen für Punktlichtquellen, dass eine Vergrößerung der leuchtenden Kreisfläche bei gleicher Erkennbarkeit eine Verringerung der Leuchtdichte erlaubt. Dies führt zu der Hypothese, dass ein Rechteck R mit einer Breite b_r unterhalb des Auflösungsvermögens des Auges durch seine Höhe h_r oberhalb des Auflösungsvermögens des Auges Einfluss auf den Sehwinkel $\propto$ nehmen und somit in Bereiche niedrigerer Schwellenleuchtdichtedifferenzen gelangen kann. Gleichzeitig würde für konstante Lichtstärke somit eine Vergrößerung des Sehwinkels $\propto$ nicht gleichermaßen zu einer Verringerung der Leuchtdichte führen, wie es der Fall bei einer runden Geometrie wäre. Das Rechteck R sollte also bei gleicher Lichtstärke besser erkennbar sein als eine Punktlichtquelle P1 mit dem Durchmesser b_r. Um auszuschließen, dass eine verbesserte Erkennbarkeit von R gegenüber P1 auf eine vergrößerte leuchtende Fläche zurückzuführen ist, sollte R ebenfalls besser als eine weitere Punktlichtquelle P2 mit Flächeninhalt A_R erkennbar sein. Dies wurde in einer Studie mit 21 Probanden und den Blenden für R, P1 und P2 (Tab. 1) untersucht. Die Blendquelle mit Farbfilter konnte durch Veränderung der Betriebsspannung variable Leuchtdichten und somit konstante Lichtstärken I_0 bereitstellen. Die notwendige Lichtstärke von grünen Punktlichtquellen liegt oberhalb derjenigen für rote Punktlichtquellen [12]. Zur Abdeckung des Worst Cases wurde der Versuch mit grünem Farbfilter in der Maximalentfernung $s_{max} = 25\ \mathrm{m}$ und bei strahlendem Sonnenschein durchgeführt ($L_U \approx 0{,}5 * 10^3$).

Tab.1: Verwendete Blendengeometrien

P1: kleiner Kreis	**R**: großes Rechteck	**P2**: großer Kreis
$d_{P1} = b_R =$ 5 mm A_{P1} = 19,6349 mm² $I_{P1} = I_0$	b_R = 5 mm, h_R = 21,45 mm A_R = 107 mm² $I_R = I_0$	d_{P2} = 11,68 mm $A_{P2} = A_R$ = 107 mm² $I_{P2} = I_0$

Die Probanden sollten nun für verschiedene Blenden und Lichtstärken bewerten, ob und wie gut die Lichtsignale erkennbar sind. Dabei wurde angemerkt, dass die Lichtquelle auch in ausgeschaltetem Zustand gezeigt wird.

3.4.2 Ergebnisse der Erkennbarkeitsstudie zum Einfluss der geometrischen Form

Es zeigt sich, dass für die Form R bereits bei Lichtstärken von $I = 0{,}22\ \mathrm{cd}$ etwa 95% der Probanden ein Lichtsignal wahrnimmt (Fig. 6, links). Die Erkennbarkeit wurde dabei auf einer Skala von sehr schwer erkennbar (1) bis sehr gut erkennbar (9) mit den zwei niedrigsten Stufen, also als sehr schlecht erkennbar, bewertet. Bei Verwendung der Lichtstärke von $I = 1{,}55\ \mathrm{cd}$ werden sämtliche Geometrien von allen Probanden erkannt. Die Güte der Erkennbarkeit ist für Lichtstärken ab $I = 3\ \mathrm{cd}$ mit Erkennbarkeitsstufen oberhalb von 5 bewertet (Fig. 6, rechts). Eine vertikale Aufweitung der Geometrie einer leuchtenden Fläche kann also positiven Einfluss auf ihre Erkennbarkeit nehmen, indem die Erkennbarkeitsschwelle gesenkt wird. Weiterhin ist festzuhalten, dass eine Signalleuchte mit der Lichtaustrittsfläche einer Punktlichtquelle eine Lichtstärke von $I_0 = 3\ \mathrm{cd}$ aufweisen muss, um auf $s_0 = 25\mathrm{m}$ auch bei Umgebungsleuchtdichten eines sonnigen Tages ausreichend erkennbar zu bleiben. Dies führt mittels Gl. 5 zu einer Beleuchtungsstärke $E = 0{,}005\ \mathrm{lx}$, die an der Pupille P eines Adressaten im Arbeitsbereich von s_{min} bis s_{max} mindestens erzielt werden muss.

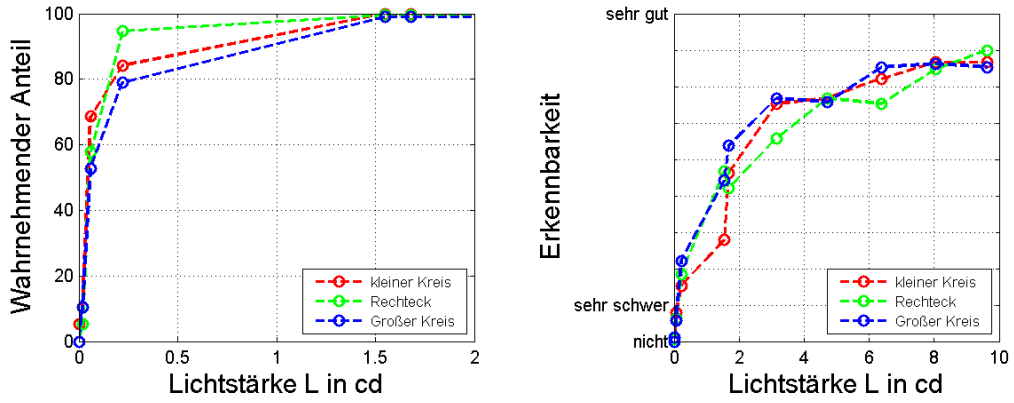

Fig. 6: Einfluss der Geometrie auf Erkennbarkeit bei konstanter Lichtstärke

4 Lichttechnische Umsetzung

Die lichttechnische Umsetzung erfolgt durch Kombination von Lichtquelle, Adressierungselement und Auskoppeloptik. Das Adressierungselement lässt dabei das

Licht derart in die Auskoppeloptik einkoppeln, dass es in einem gewünschten Raumwinkel abgestrahlt wird. Das lichttechnische System hat auf einem horizontalen Öffnungswinkel von $\propto_h = 141°$ sowie einem vertikalen Öffnungswinkel von $\propto_v = 90°$ Licht bereitzustellen (vgl. 3.2). Dabei soll ein Adressierungselement den vertikalen Öffnungswinkel $\propto_v$ über $k = 582$ nebeneinander angeordnete Einzelkanäle mit einem jeweiligen horizontalen Öffnungswinkel von $\propto_{h,ch} = 0{,}244°$ aufspannen. Dies ergibt einen zu bedienenden Raumwinkel von

$$\Omega_{ges} = 4 \cdot arcsin\left\{sin\left(\frac{\alpha_h}{2}\right) \cdot sin\left(\frac{\alpha_v}{2}\right)\right\} = 0{,}9324\pi \cdot sr.$$

4.1 Auskoppeloptik

Die einzelnen Kanäle müssen scharf voneinander abgegrenzt werden, damit eine Adressierung nur im gewünschten Raumwinkel erfolgt. Ein abbildendes System könnte dies nur über eine Vielzahl an Linsen realisieren, dafür aber ein diffus abstrahlendes Adressierungselement tolerieren. Im umgekehrten Prinzip, wenn Licht zur Aufnahme von Fotos aus einem großen Raumwinkel eingefangen wird, kommen in sogenannten Weitwinkelobjektiven oft über zehn Linsen zum Einsatz [17]. Zu untersuchen ist daher die nichtabbildende lichttechnische Umsetzbarkeit unter Verwendung von asphärischen Flächen.

4.1.1 Realisierung einer homogenen horizontalen Abstrahlcharakteristik

Um eine zielgerichtete, horizontale Abstrahlcharakteristik der Leuchtkanäle zu erhalten, muss parallel austretendes Licht am Adressierungselement vorausgesetzt werden. Das Funktionsprinzip basiert darauf, dass dieses parallele Licht auf eine asphärische Grenzfläche einer ersten Linse trifft, die in Abhängigkeit der eintreffenden horizontalen Strahlhöhe (Position in x) Licht in einen bestimmten horizontalen Raumwinkel θ_H ablenkt (Fig. 7, oben). Aufgrund der fehlenden optischen Funktion in einer Ebene der Zylinderlinse hat diese in der Vertikalen keinen Einfluss. Um durch die Ablenkung eine homogene Verteilung, Breite und Lichtstärke der Leuchtkanäle bereitzustellen, ist die Fläche so auszulegen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Strahlhöhe *x* und horizontalem Ablenkwinkel θ_H nach Gl. 7 gilt. Die Variable x_{max} beschreibt dabei die maximal mögliche Strahlhöhe, die zu einer maximalen horizontalen Ablenkung von $\theta_{H,max}$ führt.

$$\theta_H = \frac{x}{x_{max}} \cdot \theta_{H,max} \tag{7}$$

Die erste Linse endet an der Stelle des Fokuspunkts (Fig. 7, oben).

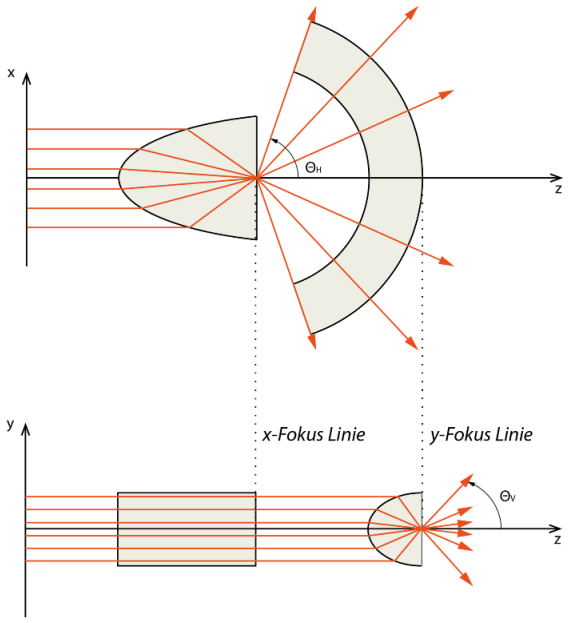

Fig. 7: Prinzip der Funktionsteilung für horizontale und vertikale Aufweitung über ein Zweilinsensystem unter der Voraussetzung parallel einfallender Lichtstrahlen

4.1.2 Auslegung der vertikalen Abstrahlcharakterisik

Eine nachgeschaltete zweite Linse lenkt in Abhängigkeit der vertikalen Strahlhöhe (Position in y) das Licht in einen vertikalen Raumwinkel θ_V ab (Fig. 7, unten). Sofern die zweite Grenzfläche der ersten Linse durch die Fokusebene verläuft, kann der Einfluss auf die horizontale Ablenkung durch die zweite Linse stark reduziert werden, da diese in ihrer Funktionsebene nahezu aplanatisch zum Fokuspunkt angeordnet ist. Eine Fehlerbetrachtung wird in Kapitel 5 vorgenommen. Die nachgeschaltete zweite Linse (vertikale Aufweitungsoptik) kann in ihrer ersten Grenzfläche ebenfalls asphärisch und derart ausgelegt werden, dass eine lineare Ablenkung in der Vertikalen in Abhängigkeit der Strahlhöhe in *y* erzielt wird (Fig. 8, links).

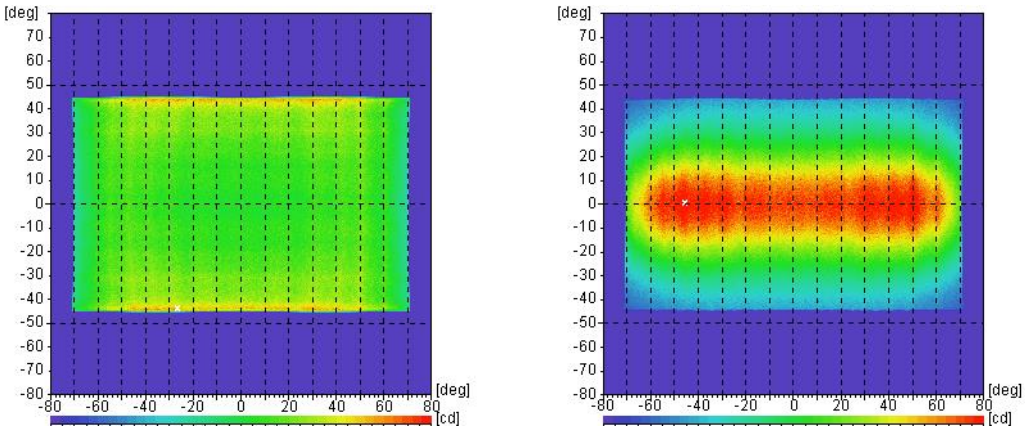

Fig. 8: Lichtstärkeverteilung für asphärische (links) und sphärische (rechts) Aufweitung

Da jedoch Adressierungen in die Ferne in betragsmäßig kleinen vertikalen Winkeln θ_V vorliegen und die Beleuchtungsstärke über den Arbeitsbereich s für gleiche Erkennbarkeit konstant sein muss, kann die Lichtstärke für steigende vertikale Ablenkungswinkel abnehmen. Dies wird durch eine sphärisch ausgelegte Grenzfläche der zweiten Optik erreicht (Fig. 8, rechts) und ist außerdem kostengünstiger herstellbar. Die relativen Lichtstärkeunterschiede sind für einen jeweils konstanten Gesamtlichtstrom gezeigt.

Für die in Fig. 8 gezeigten Lichtstärkeverteilungen sieht der Betrachter lediglich an der Stelle das Lichtmodul leuchten, an der Licht direkt in Richtung seiner Pupille gesendet wird. Da jeder Bereich der Austrittsfläche dabei für einen eigenen Abstrahlwinkel in der Vertikalen und Horizontalen zuständig ist, ist diese Größe der leuchtenden Fläche sehr gering. Um diese zu vergrößern, kann die letzte Grenzfläche der zweiten Linse als vertikal streuende Oberfläche ausgelegt werden (Fig. 9) und anstelle eines Punktes eine Punktlinie darstellen.

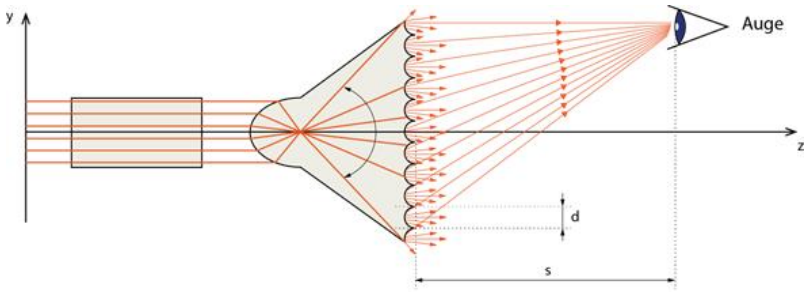

Fig. 9: Vergrößerung der durch den Betrachter sichtbaren Fläche durch vertikale Streuung

Diese Maßnahme kann bei konstanter Lichtstärke zu einer früheren Erkennbarkeit führen (vgl. Kap. 3.4.2), hat jedoch auch Einfluss auf die Lichtstärkeverteilung (Fig. 10).

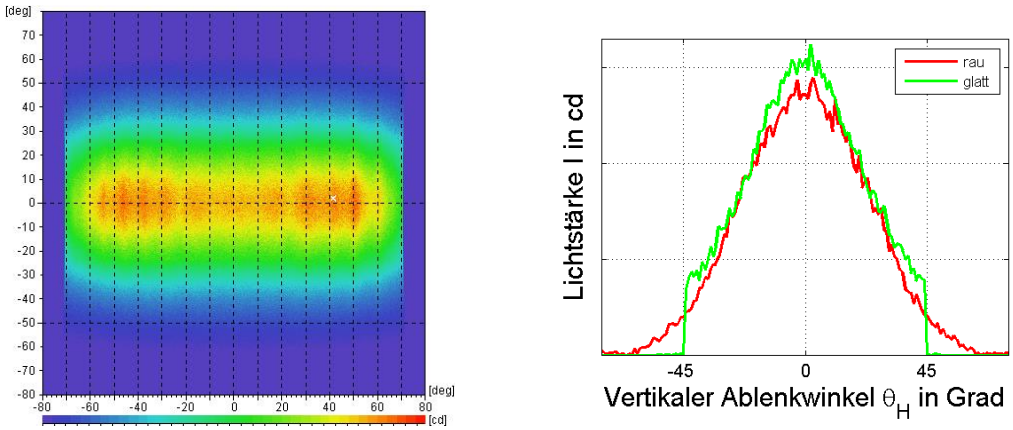

Fig. 10: Veränderung der Lichtstärkeverteilung durch streuende Grenzfläche

Die vertikal streuende Oberfläche verwischt den zuvor steilen Abfall der Lichtstärke außerhalb der Bereiche von $\theta_v = \pm 45\,°$ und zeigt dadurch geringere Maximalwerte als die

Variante der glatten Grenzfläche (Fig. 10, rechts). Auf die horizontal erzeugten Ablenkwinkel wird jedoch kein Einfluss genommen. Durch ausreichend kurze Abstände der Streuzentren mit $d = 200\,\mu\mathrm{m}$ kann dem Betrachter anstelle einer Punktelinie der Eindruck einer durchgehenden Linie bereitgestellt werden.

4.2 Adressierungselement

Das Adressierungselement sorgt dafür, dass das durch die Lichtquelle bereitgestellte Licht in den Strahlhöhen, die zu einer gewünschten Ablenkung führen, weitergeleitet wird. Das restliche Licht wird absorbiert. Zur Adressierung wird ein Digital-Micromirror-Device (DMD) verwendet. Es zeigt den großen Vorteil, sowohl in der Vertikalen als auch in der Horizontalen ausreichend Pixel auf sehr kleiner Fläche bereitzustellen. Pro Pixel steht ein Mikrospiegel zur Verfügung, der mit +12 Grad und -12 Grad zwei stabile Kippzustände annehmen kann.

4.3 Beleuchtungseinheit und -anordnung

Als Beleuchtungseinheit können fasergekoppelte Laser oder LEDs mit sehr geringen Lichtaustrittsflächen verwendet werden, welche durch einen Kollimator parallelisiert werden. Das Adressierungselement wird dabei von zwei Seiten beleuchtet, wodurch zwei separate Lichtquellen für rot und grün eingekoppelt werden können. Eine Kollimation kann so auf ihre jeweilige Wellenlänge optimiert werden (Fig. 11). Der notwendige Lichtstrom ergibt sich aus dem Gesamtlichtstrom nach dem Adressierungselement, dem Wirkungsgrad des Adressierungselements, der Effizienz der Beleuchtung des Adressierungselements sowie dem Transmissionsgrad der Kollimatorlinse. Um in der Horizontalen *k* Kanäle mit einem jeweiligen Öffnungswinkel von $\propto_{h,ch} = 0{,}244°$ umzusetzen, muss das Adressierungselement auf seiner gesamten Breite ebenfalls *k* äquidistante und einzeln ansteuerbare Leuchtkanäle bereitstellen.

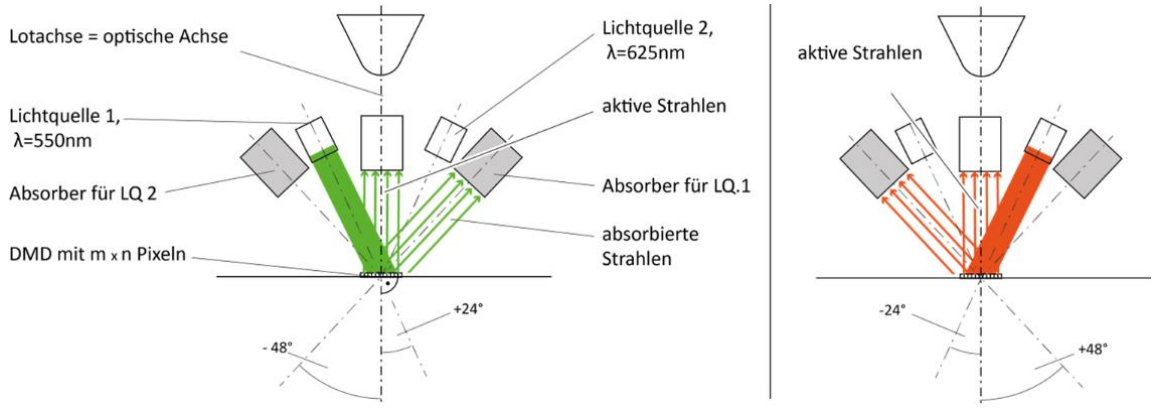

Fig. 11: Konzept zur annähernd parallelen DMD-Beleuchtung mit zwei Farben

4.4 Kanalgüte

Die in einer Spalte angeordneten Spiegel werden jeweils als parallel abstrahlende, leuchtende Fläche simuliert und bilden dabei je einen Leuchtkanal ab. In der Simulation werden acht Kanäle aktiviert. Somit kann die Güte der Kanäle über den gesamten horizontalen Öffnungswinkel beurteilt werden. Die Lichtstärkeverteilung durch die acht Beleuchtungskanäle zeigt Fig. 12 (links). Auf Basis der aktuellen Simulationen sind die adressierten Bereiche im Fernbereich ($\theta_v = 0°$) mit einer Lichtstärke von 3 bis 5,4 cd (Fig. 12, rechts) ausreichend hell, um von anderen Verkehrsteilnehmern erkannt zu werden. Gleichzeitig werden durch Streulicht im nichtadressierten Bereich Lichtstärken von unter 0,03 cd erzielt. Im Randbereich der Kanäle werden Unschärfebereiche festgestellt, die

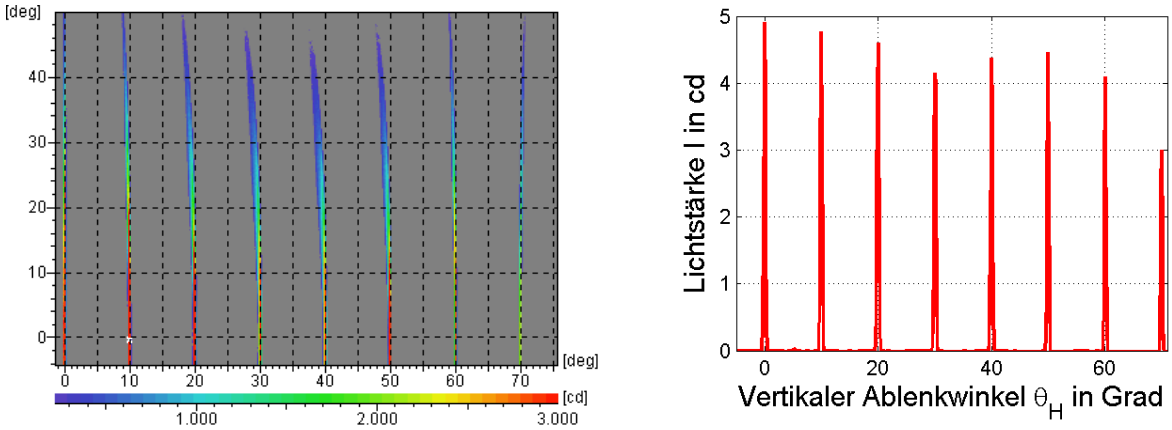

Fig. 12: Lichtstärkeverteilungen der acht Leuchtkanäle. Farbig markiert: $I \geq 0{,}22$ cd

dunkelblau eingefärbt und mit sehr geringen Erkennbarkeitsstufen (Stufen 1 und 2) bewertet wurden. Hellblau gefärbte Lichtstärken ab Werten von 1 cd (Stufen 3 und 4) verursachen eine Vergrößerung des horizontalen Öffnungswinkels des Kanals auf bis zu 0,4 Grad, wobei sich die in rot eingefärbten, deutlich sichtbaren Lichtstärken (ab Stufe 5) auf etwa ein Viertel Grad begrenzen (Fig. 13). Die durchgeführten Probandenstudien zeigten, dass bei der

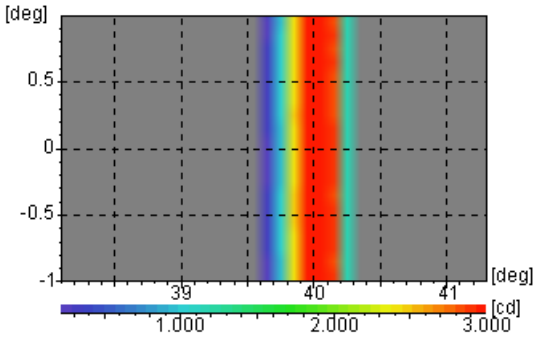

Fig. 13: Ansicht der Randbereiche für einen Kanal bei $\theta_v = 0$. Rot für I > 3cd

Form R das Lichtsignal erst ab einer Lichtstärke von 0,22 cd zuverlässig wahrgenommen wird. Somit kann davon ausgegangen werden, dass das Streulicht nicht wahrgenommen wird. Im Bereich vertikaler Ablenkungswinkel von 45 Grad sinkt die Lichtstärkeverteilung auf etwa 0,5 cd und erzielt dabei noch bis etwa $s = 10$ m die Mindestbeleuchtungsstärke *E*, die für I_0 an der Stelle s_0 erzielt wird.

5 Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass mithilfe des technischen Ansatzes auf Basis von asphärischen Linsen eine Signalleuchte für eine hochauflösend gerichtete und somit eindeutige Kommunikation umsetzbar ist. Das Konzept erfüllt zudem die Anforderungen an den geringen, zur Verfügung stehenden Bauraum.

6 Literaturverzeichnis

[1] B. Färber: Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern. In: *Autonomes Fahren*. Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 127-146

[2] J.-H. Willrodt und J. Wallaschek: Optical based Communication of Autonomous Vehicles with other Traffic Participants. In: *Proceedings of the VISION conference.* Paris, 2016

[3] F. Keferböck und A. Riener: Strategies for Negotiation between Autonomous Vehicles and Pedestrians. In: *Mensch und Computer.* 2015, S. 525-532

[4] N. Pennycooke: AEVITA: designing biomimetic vehicle-to-pedestrian communication protocols for autonomously operating & parking on-road electric vehicles. Massachusetts Institute of Technology, Diss., 2012

[5] BMW Group. Vision Next 100. URL: https://www.next100.bmw/de/topics/bmw-vision-next-100.html. Zuletzt aufgerufen am 23. Juni 2017

[6] Parkhurst, D.; Law, K.; Niebur, E.: Modeling the role of salience in the allocation of overt visual attention. In: Vision research, 42(1), S. 107-123, 2002

[7] Baier, R. et al.: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt 06), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2006

[8] Schuster, A.; Sattler, J.; Hoffmann, S.: Bestimmen der aktuellen Abmessungen differenzierter Personen-Bemessungsfahrzeuge, Westsächsische Hochschule Zwickau. Institut für Verkehrssystemtechnik i. G., 2011

[9] Unfallforschung der Versicherer: Unfalltypen-Katalog. Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltyps, Berlin, 2016

[10] Schreck, B.; Seiniger, P.: Abbiege-Assistenzsystem für Lkw: Grundlagen eines Testverfahrens. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), F104.

[11] Jürgens, H. W.; Matzdorff, I.; Windberg, J.: Internationale anthropometrische Daten als Voraussetzung für die Gestaltung von Arbeitsplätzen und Maschinen. In: Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse 108, 1998

[12] Jainski, P.; Schmidt-Clausen, H.-J.: Über den Einfluss der Schwellenleuchtdichten auf das Erkennen farbiger Signallichter. In: Lichttechnik, 19. Jahrgang Nr. 1/1967

[13] Gerdes, H.-R.: Das Wahrnehmen von Lichtzeichen an der achromatischen und chromatischen Schwelle, Dissertation, Darmstadt, 1974

[14] Ripperger, J.: Lichttechnische Anforderungen an Schluß- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge. Dissertation, Darmstadt, 2001

[15] Baer, R.; Barfuß, M.; Seifert, D.: Beleuchtungstechnik – Grundlagen. LiTG Deutsche Lichttechnik Gesellschaft e.V., 4. Auflage, 2016

[16] Adrian, W.: Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung. In: Lichttechnik, 21. Jahrgang Nr. 1/1969

[17] Laikin, M.: Lens design. CRC Press, Taylor & Francis, 2006, S. 105-118