

Lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Fußgänger im automatisierten Straßenverkehr: Was muss sie leisten und wie könnte sie aussehen?

*Baumann, Maximilian; Helmer, Melanie; Neumann, Cornelius
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI)
Engesserstraße 13, Geb. 30.34, 76131 Karlsruhe
Tel. 0721 608-45459, maximilian.baumann@kit.edu, www.lti.kit.edu*

Abstract

Der Scheinwerfer der Zukunft kann weitaus mehr, als die Fahrbahn im nächtlichen Straßenverkehr auszuleuchten. Scheinwerfer, wie das „Digital Light“ [1] oder das „Digital Light SSL | HD“ von Hella [2] mit ca. einer Million Pixel bzw. mehr als 30.000 Pixel pro Modul, können beispielsweise dazu verwendet werden Formen oder Symbole auf die Fahrbahn zu projizieren. Diese Projektionen können zur Darstellung von Informationen auf der Fahrbahn genutzt werden oder um mit anderen Verkehrsteilnehmern zu kommunizieren.

Im automatisierten Verkehr der Zukunft wird durch den Entfall des Fahrers als Bezug zum Fahrzeug eine neue Kommunikationsschnittstelle für Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger oder Fahrradfahrer benötigt. Eine projektionsbasierte Kommunikationsschnittstelle könnte hier zum Einsatz kommen.

Problematisch ist die Verwendung projizierter Information jedoch bei Tageslicht oder schlechter Witterung. In solchen Situationen sind andere Technologien, wie einzelne Leuchten [3] oder Displays am Fahrzeug [4], für den Aufbau einer Kommunikationsschnittstelle denkbar.

Wie genau die Schnittstelle aussehen sollte, damit die Wahrnehmbarkeit und die intuitive Verständlichkeit für den oder die Adressaten gewährleistet werden kann, wird im Rahmen dieses Beitrags vorgestellt.



1 Motivation

Die in der Zukunft zunehmende Anzahl autonom fahrender Fahrzeuge bringt viele Herausforderungen mit sich. Die Aufmerksamkeit des Fahrers widmet sich nun nicht zwangsläufig mehr dem Verkehrsgeschehen, sodass dessen Blick nicht immer auf der Fahrbahn sein muss. Problematisch wird dies in Situationen, in denen der Fahrer mit anderen Verkehrsteilnehmern interagieren muss. Dies ist beispielsweise an einem Fußgängerüberweg der Fall an welchem ein Fußgänger die Fahrbahn queren möchte. Üblicherweise verlangsamt der Fahrer hier die Geschwindigkeit des Fahrzeuges bis zum Stillstand, der Fußgänger nimmt Blickkontakt mit ihm auf, um sich zu vergewissern, dass dieser ihn passieren lässt. Anschließend kann dieser die Fahrbahn überqueren und das Fahrzeug weiterfahren. Entfällt die Möglichkeit jedoch, mit dem Fahrer zu kommunizieren und zu interagieren, muss eine neue Mensch-Maschine-Schnittstelle geschaffen werden, um solche Situationen auch zukünftig lösen zu können. Die Kommunikation zwischen zwei Fahrzeugen kann über verschiedene Car2X-Technologien realisiert werden. Für die Kommunikation mit schwächeren Verkehrsteilnehmern wie Fahrradfahrern und Fußgänger bietet sich der Einsatz einer lichtbasierten Schnittstelle an, da visuell Information auf verschiedener Art und Weise präsentiert werden kann.

2 Stand der Technik

Lichtbasierte Kommunikationsschnittstellen finden bereits seit geraumer Zeit Anwendung im und am Automobil. Signalleuchten wie der Fahrtrichtungsanzeiger informieren andere Verkehrsteilnehmer über die Absichten des Fahrers und zeigen die Änderung der Fahrtrichtung über das Aufleuchten der jeweiligen Signalleuchte an.

Durch die stetige Entwicklung von hochauflösenden Scheinwerfern ist es nun ebenfalls möglich Formen und Symbole auf die Fahrbahn zu projizieren.

Als Beispiel für eine projektionsbasierte Assistenz ist hier zunächst das sogenannte Baustellenlicht anzuführen, welches zwei Linien vor das Fahrzeug projiziert [5]. Der Fahrer des Egofahrzeuges wird somit bei seiner Fahraufgabe unterstützt, da die Linien die Breite des Fahrzeuges auf der Fahrbahn anzeigen und somit helfen, sicher durch Engstellen zu manövrieren, vgl. Abbildung 1 (links).

Ebenso können Hindernisse auf der Fahrbahn frühzeitig durch entsprechende Sensorik detektiert und dem Fahrer über die Projektion zweier diagonalen Linien markiert werden, zu sehen in Abbildung 1 (rechts).

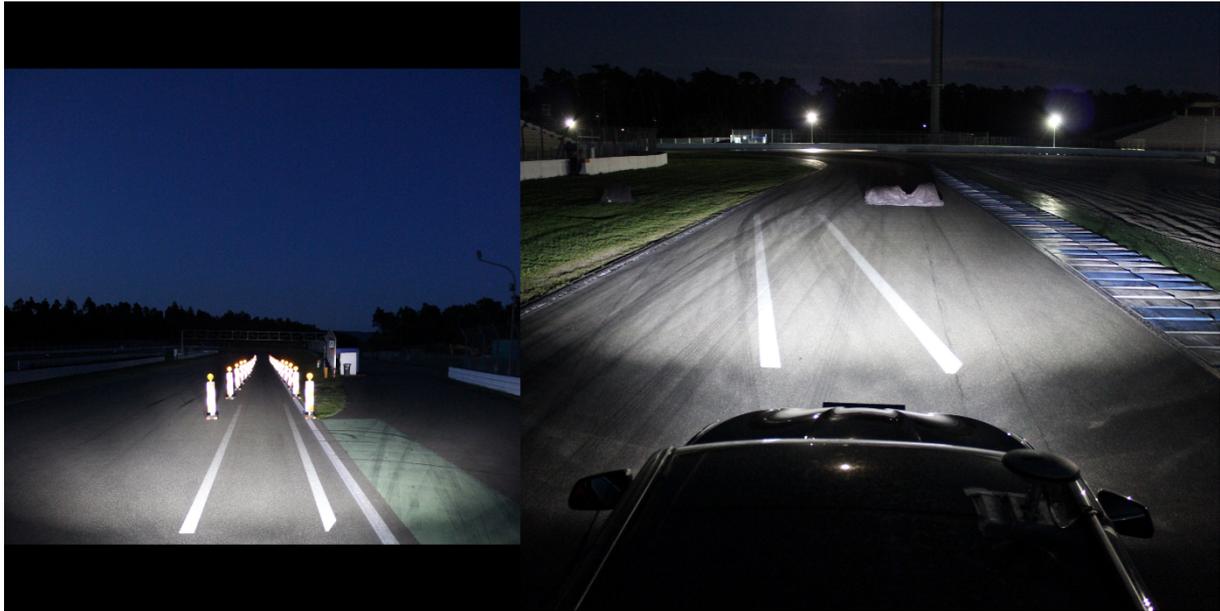


Abbildung 1 Darstellung der Fahrzeugbreite über zwei projizierte Linien auf der Fahrbahn zur Unterstützung des Fahrers in Engstellen (links) und Richtungsanzeige zur Umfahrung von Hindernissen (rechts) [5]

Diese Lichtfunktion ist entweder über ein Blendensystem oder durch Verwendung eines LED-Matrix Scheinwerfers umsetzbar. Zur Erzeugung eines Musters werden bestimmte Bereiche der Lichtverteilung zu- bzw. abgeschaltet.

Mit weiter steigender Anzahl steuerbarer Lichtquellen und somit schaltbarer Bereiche in der Lichtverteilung wird von Pixeln und einer Auflösung des Scheinwerfers gesprochen. Moderne Scheinwerfer-Module können dabei eine Auflösung von über 30.000 Pixel erreichen [2], das Digital Light von Mercedes Benz sogar bis zu 1 Million Pixel pro Scheinwerfer [1].

Durch diese hohe Anzahl zur Verfügung stehender Pixel können nicht nur Linien und einfache Formen auf die Fahrbahn projiziert werden, sondern auch komplexere Geometrien und verschiedene Symbole zur Kommunikation mit dem Fahrer. Ebenso ist hier die Möglichkeit zur Kommunikation mit anderen, externen Verkehrsteilnehmern gegeben. Das projizierte Symbol könnte in dem eingangs gebrachten Beispiel dem Fußgänger die Bestätigung kommunizieren, dass dieser gefahrlos die Straße passieren kann, wie in Abbildung 2 zu sehen.

Über diese Kommunikationsschnittstelle ist weiter die projektionsbasierte Darstellung von Informationen, Hinweisen aber auch Warnungen möglich.

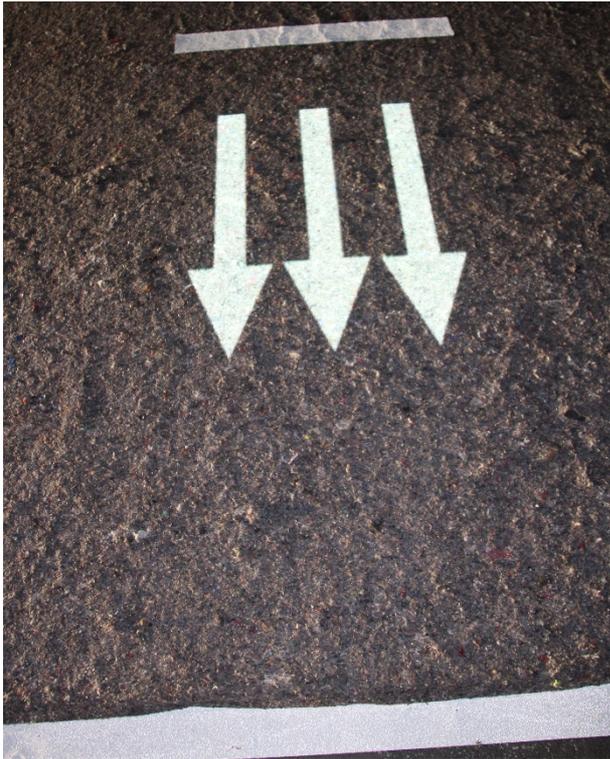


Abbildung 2 Projektion von Pfeilen zur Anzeige für einen Fußgänger, dass dieser die Straße nicht überqueren soll

Diese Art der Kommunikation mit einem anderen Verkehrsteilnehmer kann durch einen Kommunikationsvorgang beschrieben werden. Zur genaueren Beschreibung und Analyse dieser Kommunikationsvorgänge muss diese Art der Informationsübertragung genauer untersucht werden. Im folgenden Kapitel wird deshalb zur Analyse verschiedener Schnittstellen zunächst das Kommunikationsmodell betrachtet und Zusammenhänge aus der Informationstheorie untersucht.

3 Analyse der Kommunikationsschnittstellen

Die bisher genannten Kommunikationsschnittstellen sollen hinsichtlich ihrem Funktionsprinzip, der Anwendbarkeit und der Erkennbarkeit untersucht werden. Zur Vereinfachung der Betrachtung, wird hier das Kommunikationsmodell von Shannon und Weaver eingeführt [6]. Dieses beschreibt die Kommunikation anhand des sogenannten Sender-Empfänger-Modells, zu sehen in in Abbildung 3.

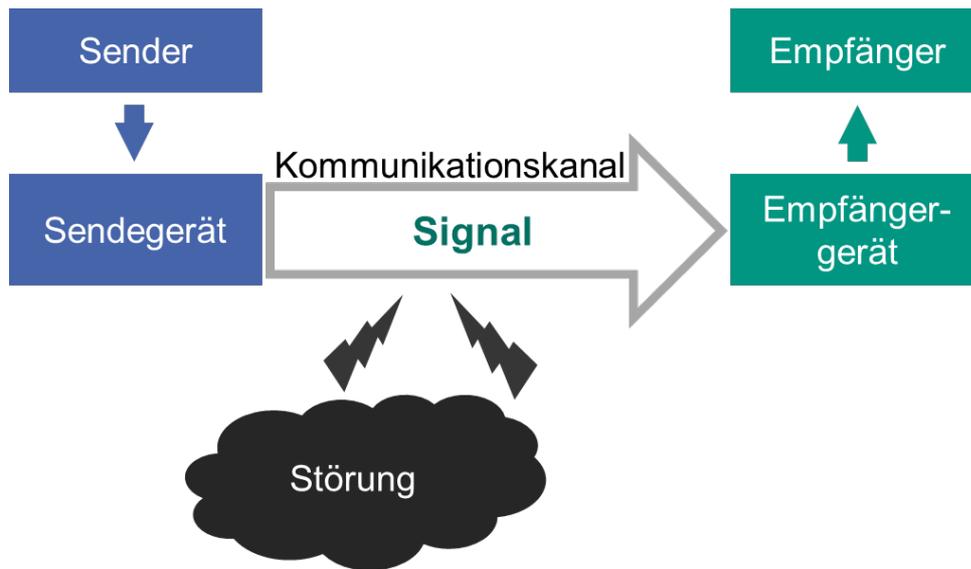


Abbildung 3 Sender-Empfänger-Modell nach Shannon und Weaver zur Beschreibung eines Kommunikationsvorgangs

Der Sender einer Nachricht gibt diese an das Sendegerät. Die Nachricht wird daraufhin als Signal über den Kommunikationskanal versendet. Der Kommunikationskanal kann dabei kabelgebunden oder kabellos sein. Das Empfängergerät erhält die Nachricht und gibt diese an den Empfänger weiter. Störungen von außen auf den Kommunikationskanal können dazu führen, dass die Nachricht nur teilweise oder gar nicht mehr empfangen und folglich auch nicht (korrekt) interpretiert werden kann. Dieses Modell ist zusätzlich, um den Aspekt des sogenannten Übersprechens zu ergänzen. In der Nachrichtentechnik beschreibt dies ein unbeabsichtigtes Senden an einen nicht adressierten Empfänger.

Eine Übertragung dieses Modells auf die projektionsbasierte Kommunikation mit einem externen Verkehrsteilnehmer ergibt die Analogien in Tabelle 1:

	Projektion eines Symbols
Sender	Fahrer des Ego-fahrzeuges/Sensorik
Sendegerät	Projektionsscheinwerfer
Kommunikationskanal	Luft zwischen Nachricht und Empfänger
Empfängergerät	Fahrbahn zur Darstellung der Projektion
Empfänger	Fahrer des Egofahrzeuges/Externer Verkehrs-teilnehmer
Störung	Tageslicht/Nasse Fahrbahn/Witterung/Störobjekt

Tabelle 1 Klassifizierung der projektionsbasierten Kommunikationsschnittstelle anhand des Sender-Empfänger-Modells

Als Sender der Nachricht kann hier die Sensorik des Egofahrzeuges angenommen werden. In einigen Situationen ist es sicherlich möglich den Fahrer des Egofahrzeuges anzunehmen, sofern dieser die Möglichkeit hat, direkt auf das Sendegerät zuzugreifen. Das Sendegerät ist charakterisierend für die vorgestellte Kommunikationsschnittstelle.

Der Kommunikationskanal ist der direkte Übertragungsweg zwischen Sendegerät und dem Auge des Empfängers. Hier können mögliche Störungen durch äußere Einflüsse auftreten. Eine Beeinträchtigung der Sichtbarkeit der Nachricht kann beispielsweise durch bedingt schlechte Witterung, zu hohe Umfeldhelligkeiten oder eine nasse Fahrbahn werden.

Nach erfolgreicher Übertragung wird die Nachricht durch das Empfänger aufgenommen und durch den Empfänger verarbeitet. Die Verarbeitung und Interpretation der Nachricht erfolgt anschließend durch den Empfänger und hängt von sehr vielen Einflussfaktoren ab. Als Beispiele können das Alter, der kulturelle oder der ethnische Hintergrund angeführt werden. Dies muss bei der Gestaltung der Nachricht berücksichtigt werden, wird aber im Rahmen dieses Papers jedoch nicht behandelt.

3.1 Adressierbarkeit

Die Adressierbarkeit ist von entscheidender Wichtigkeit für die erfolgreiche Übertragung einer Nachricht. Diese ist direkt durch den Aufbau des Sendegerätes beeinflusst. Je nach Art der Übertragung, wird hier zwischen folgenden Kommunikationsformen, wie in Abbildung 4 zu sehen, unterschieden:

Unicast: Eine Nachricht wird gezielt an einen Empfänger adressiert und gesendet.

Multicast: Eine Nachricht wird gezielt an mehrere Empfänger adressiert und gesendet.

Broadcast: Eine Nachricht wird an alle möglichen Empfänger gesendet.

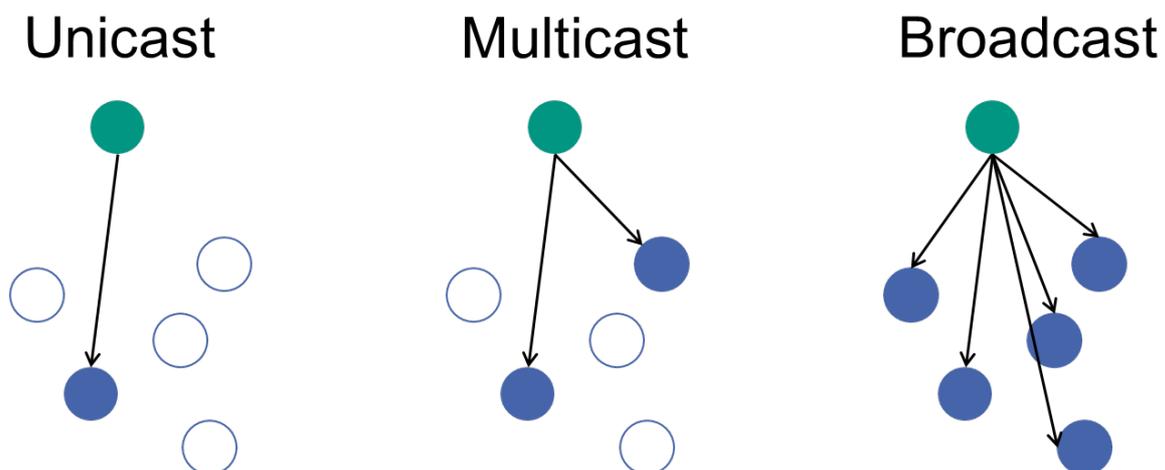


Abbildung 4 Darstellung der verschiedenen Kommunikationsformen Unicast (links), Multicast (mitte) und Broadcast (rechts)

Die Folgen einer nicht eindeutigen Adressierung können weitreichend sein. In einer von Geßner durchgeführten Studie wurde untersucht, inwieweit sich nicht adressierte Probanden durch die Projektion eines Navigationspfeils auf der Fahrbahn angesprochen fühlten [7]. Mehrere Probanden nahmen innerhalb dieser Studie an, dass der Abbiegepfeil für sie projiziert wurde, obwohl dieser nicht Ihnen galt. Ein unbeabsichtigtes Fahrmanöver eines nicht adressierten Empfängers war hier die Folge. Das Empfangen einer Nachricht durch einen nicht angesprochenen Empfänger wird in der Nachrichtentechnik als Übersprechen bezeichnet [8].

Um ein Übersprechen zu vermeiden muss sichergestellt sein, dass eine Nachricht nur von dem Empfänger lesbar ist, für den diese auch bestimmt war.

3.2 Informationsgehalt

Zur weiteren Beschreibung wird der Informationsgehalt eingeführt. Der Informationsgehalt einer Nachricht aus der Informationstheorie ist eine Größe die angibt, wie viel Information durch eine Nachricht transportiert wurde [6]. Der Informationsgehalt $I(x)$ eines Zeichens x mit der Auftrittswahrscheinlichkeit $p(x)$ wird wie folgt berechnet:

$$I(x) = \log_a \left(\frac{1}{p_x} \right) = \log_a(1) - \log_a(p_x) = -\log_a(p_x) \quad (1)$$

Die Mächtigkeit a des Alphabets beschreibt die Anzahl der möglichen Zustände einer Nachrichtenquelle. Im Folgenden wird a über die Anzahl verschiedener Nachrichten beschrieben, die ein System darstellen kann. Für die gerichtete Signalleuchte ist ein Wert von $a = 2$ anzunehmen unter der Voraussetzung, dass eine positive Detektionsrückmeldung mit „grün“ angezeigt wird, eine negative mit „rot“.

Für die Darstellung der Symbole auf Displays aus der Studie von Reschke wird $a = 30$ gesetzt, dies entspricht der Anzahl der verwendeten Symbole. Die Anzahl verschiedener Verkehrszeichen in der Bundesrepublik Deutschland beträgt aktuell mehr als 500 verschiedene Zeichen und Schilder.

Der resultierende Informationsgehalt eines Zeichens mit Auftrittswahrscheinlichkeiten im Bereich $0 \leq p_x \leq 1$ für die angenommenen Werte für a ist Abbildung 5 zu entnehmen.

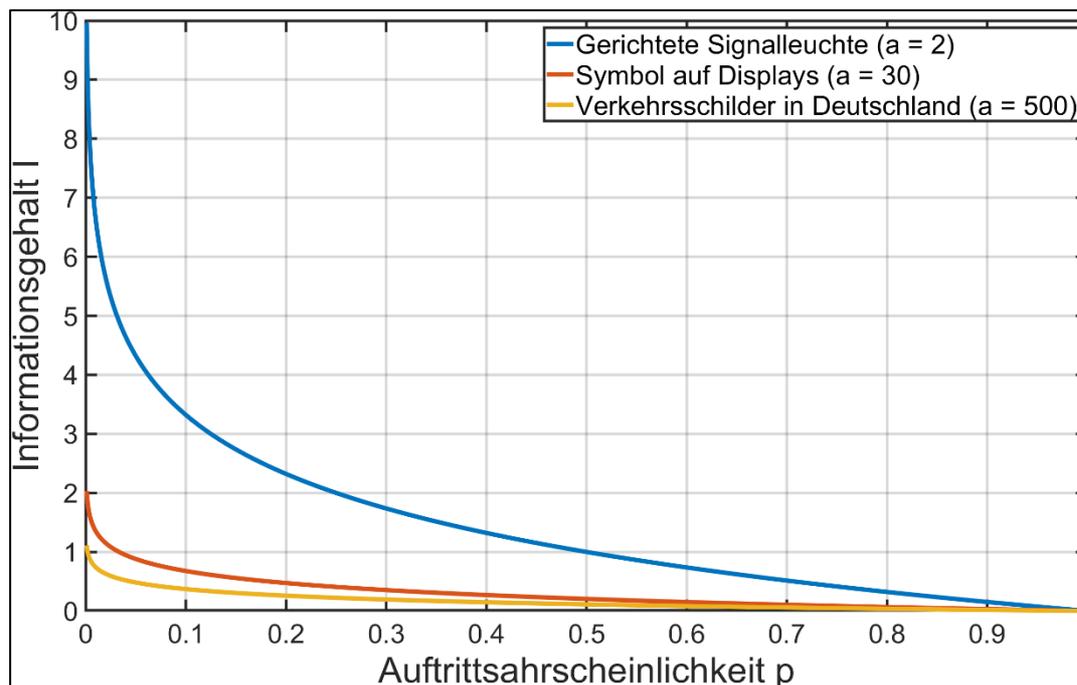


Abbildung 5 Informationsgehalt einer Nachricht x in Abhängigkeit der Auftrittswahrscheinlichkeit p und der Mächtigkeit des Alphabets a

Abbildung 5 zeigt eindrücklich, dass je höher die Auftrittswahrscheinlichkeit eines Zeichens bzw. Symbols ist, desto niedriger ist dessen Informationsgehalt. Weiter ist zu sehen, dass je höher die Anzahl möglicher Zeichen, desto geringer ist der Informationsgehalt selbst bei niedriger Auftrittswahrscheinlichkeit. Die sich hieraus ergebende Frage ist, ob für eine erfolgreiche Kommunikation viele verschiedene Symbole notwendig sind oder ob ein geringer Zeichensatz hier nicht vorteilhafter wäre.

4 Umsetzungsmöglichkeiten einer lichtbasierten Kommunikationsschnittstelle

Im Folgenden sollen nun bereits durchgeführte Studien und Arbeiten mit den vorgestellten Methoden untersucht werden. Hierbei werden exemplarisch die Möglichkeiten der Kommunikation über Displays sowie über eine gerichtete Signalleuchte betrachtet.

In der ersten Studie, durchgeführt von Reschke, Rabenau et. al. [4] wurden Symbole auf Displays an der Fahrzeugfront präsentiert. In der Studie von Willrodt, Döhler et al. [3] erfolgte die Umsetzung der Kommunikationsschnittstelle als gerichtete Signalleuchte zur Kommunikation mit einzelnen Fußgängern.

4.1 Symboldarstellung auf Displays am Fahrzeug

Die von Reschke, Rabenau et. al. [4] durchgeführte Studie untersucht die Kommunikation zwischen einem automatisierten Fahrzeug und einem Fußgänger.

Den Probanden wurden mehrere Symbole, teilweise mit Animation, auf zwei Displays an der Fahrzeugfront dargeboten, zu sehen in Abbildung 6.



Abbildung 6 Darstellung von Information als Symbol auf an der Fahrzeugfront befestigten Displays [4]

Aufgabe der Probanden hierbei war es, auf die Darbietung verschiedener Symbole zu reagieren. Dies erfolgte in verschiedenen zeitlichen Abschnitten, in denen die Probanden entweder freie Antwort geben konnten, aus bestehenden Antwortmöglichkeiten auswählen sollten oder ein Symbol anhand vorgegebener Kriterien bewerten mussten. Eine Übersicht der präsentierten Symbole ist Abbildung 7 zu entnehmen.

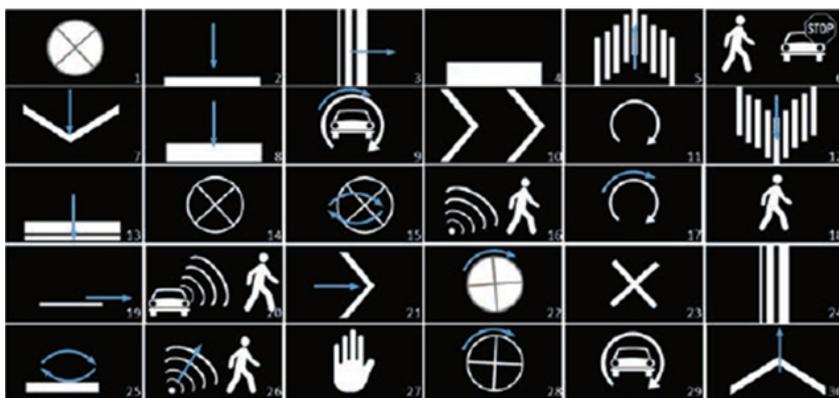


Abbildung 7 Symbolsatz der den Probanden im Rahmen der Studie präsentiert wurde [4]

Der genutzte Symbolsatz weist dabei einfache Formen wie dünne und dicke Balken, aber auch komplexere Formen, wie sich bewegende Pfeile bis hin zu bekannten Symbolen aus dem Straßenverkehr auf. Bedingt durch die Auflösung des Display bieten sich sehr viele Möglichkeiten in der Ausgestaltung der verwendeten Nachricht.

Ebenso ist es möglich, je nach technischem Aufbau der Displays, die Nachricht mit hohen Leuchtdichten und hohem Kontrast darzubieten. Im Vergleich zu einer projektionsbasierten Kommunikationsschnittstelle können Displays je nach technischer Ausführung auch tagsüber erkennbar sein. Ein weiterer Vorteil der Darstellung auf fahrzeugnahen Displays ist, dass die Nachricht stets eindeutig dem Sender zugeordnet werden kann.

Problematisch bei der Verwendung von Displays ist jedoch, dass die Nachricht von jedem Verkehrsteilnehmer empfangen und interpretiert werden kann, der freie Sicht auf das Display hat. Eine gezielte Adressierung der Nachricht ist somit nicht möglich, diese wird als Broad- bzw. Multicast gesendet.

Die Umsetzung der Sichtbarkeit eines Signals nur in bestimmten Bereichen wird in der folgenden Arbeit behandelt.

4.2 Gerichtete Signalleuchte am Fahrzeug

In der Arbeit von Willrodt, Döhler et. al. wird das Szenario des automatisierten Verkehrs in der Zukunft betrachtet. Genauer gesagt Situationen, in denen das Fahrzeug zugunsten eines Fußgängers oder Fahrradfahrers auf seine Vorfahrt verzichtet und diesen Vorrang gewährt. Durch den Entfall des Fahrers, dessen volle Aufmerksamkeit nicht unbedingt der Straße zugewandt ist, muss ein externes HMI am Fahrzeug vorhanden sein, um anderen Verkehrsteilnehmern eine Detektionsrückmeldung zu signalisieren.

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt ist dabei die Adressierbarkeit des Signals, also der Detektionsrückmeldung. Die gerichtete Signalleuchte soll nur in dem Winkelbereich erkennbar sein, in dem sich der adressierte Empfänger befindet, wie in Abbildung 8 zu sehen.

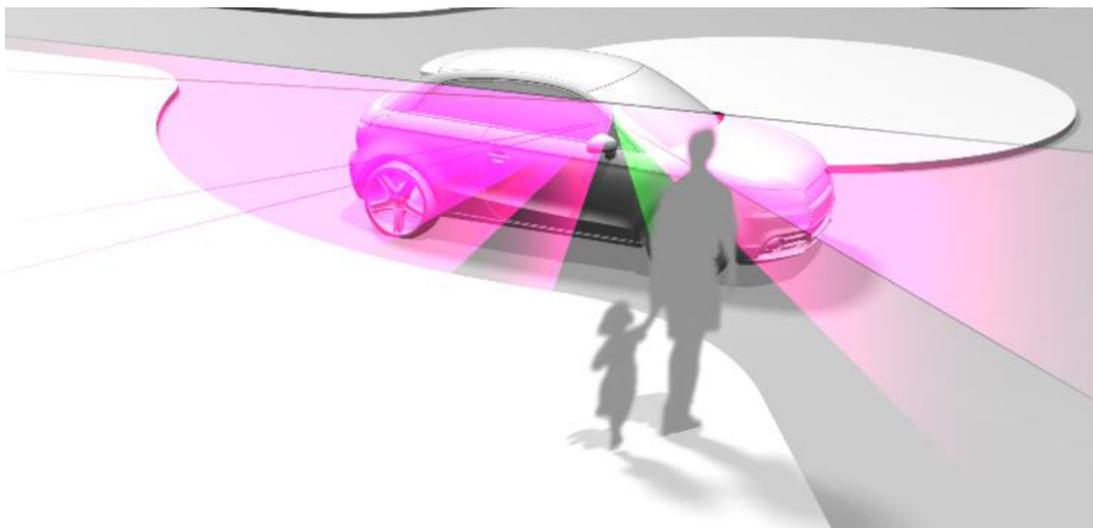


Abbildung 8 Beispielhafte Darstellung einer gerichteten Signalleuchte zur adressierten Kommunikation einer Detektionsrückmeldung [3]

Die Gestaltung der Nachricht erfolgt über eine farbliche Codierung. Die erfolgreiche Detektionsrückmeldung für einen Empfänger wurde durch das Aufleuchten einer grünen Leuchte signalisiert. In den nicht adressierten Winkelbereichen war eine rote Leuchte zu erkennen.

Am Beispiel dieser Arbeit kann der Aspekt der Adressierbarkeit sehr gut erläutert werden. Eine durch das Egofahrzeug gesendete Nachricht wird stets nur durch den adressierten Empfänger als Unicast wahrgenommen, um ein mögliches Übersprechen auf andere Verkehrsteilnehmer zu verhindern.

Abschließend sollen die präsentierten Kommunikationsschnittstellen nochmals anhand des zuvor eingeführten Kommunikationsmodells analysiert werden, Tabelle 2.

	Projektion eines Symbols	Darstellung auf Displays	Gerichtete Signalleuchte
Sender	Fahrer des Ego-fahrzeuges/Sensorik	Fahrer des Ego-fahrzeuges/Sensorik	Fahrer des Ego-fahrzeuges/Sensorik
Sendegerät	Projektions-scheinwerfer	Am Fahrzeug montierte Displays	Signalleuchte mit Richtungs-charakteristik
Kommunikations-kanal	Luft zwischen Nachricht und Empfänger	Luft zwischen Nachricht und Empfänger	Luft zwischen Nachricht und Empfänger
Empfängergerät	Fahrbahn zur Darstellung der Projektion	Augen des Empfängers	Augen des Empfängers
Empfänger	Fahrer des Egofahrzeuges/ Externer Verkehrs-teilnehmer	Externer Verkehrsteilnehmer	Externer Verkehrs-teilnehmer
Störung	Tageslicht/Nasse Fahrbahn/Witterung/Störobjekt	Witterung/ Störobjekt	Witterung/ Störobjekt

Tabelle 2 Klassifizierung externer Kommunikationsschnittstellen anhand des Sender-Empfänger-Modells

5 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass die lichtbasierte Kommunikation, unter Verwendung egal welcher Kommunikationsschnittstelle von vielen Faktoren abhängig ist. Jede der hier vorgestellten Technologien weist verschiedene Vor- und Nachteile auf, die bei der Gestaltung zu berücksichtigen sind.

Dabei sind neben den äußeren Parametern und Umwelteinflüssen wie Umfeldhelligkeit, Witterung und Beschaffenheit der Fahrbahn, auch diese zu berücksichtigen, die durch die jeweilige Technologie bedingt sind.

Problematisch bei der Darstellung von Information über eine Projektion ist sicherlich die starke Abhängigkeit äußerer Einflüsse wie Umfeldhelligkeit, Witterung und der Beschaffenheit der Fahrbahn.

Die Präsentation von Nachrichten und Informationen auf Displays erlaubt es trotz Sonnenschein oder nasser Fahrbahn, Symbole gut erkennbar darzustellen. Nachteilig an dieser Form der Kommunikation ist jedoch, dass der Ort der Darstellung begrenzt ist und die Adressierbarkeit einzelner Empfänger nicht immer gewährleistet ist. Außerdem beschränkt sich diese Schnittstelle auf die Kommunikation mit externen Verkehrsteilnehmern. Eine Kommunikation mit dem Fahrer des Egofahrzeuges ist nicht möglich.

Die von Willrodt vorgestellte gerichtete Signalleuchte bietet den entscheidenden Vorteil, dass die Nachricht gezielt adressiert werden kann. Durch die Darstellung in bestimmten Winkelbereichen ist stets gewährleistet, dass die Nachricht nicht übersprechen kann und fälschlicherweise andere Empfänger erreicht. Bedingt durch den Aufbau der gerichteten Signalleuchte jedoch sind die Darstellungsmöglichkeiten stark eingeschränkt. Im Vergleich zur Projektion und zur Darstellung von Symbolen auf Displays ist hier nur die Präsentation einzelner Pixel in verschiedenen Farben möglich.

6 Ausblick

Für den Aufbau einer effektiven lichtbasierten Kommunikationsschnittstelle ist die Kombination der vorgestellten Technologien als Hybridsystem denkbar. So können bestimmte Nachrichten durch eine gerichtete Signalleuchte einem bestimmten Empfänger übermittelt werden. Im Gegensatz dazu werden bei einer Projektion die Informationen als Broadcast der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt.

Eine mögliche Art der Auslegung wäre die zwischen einem HMI-System für die Kommunikation bei Tag („Tag-HMI“) und für die Kommunikation bei Dämmerung und bei Nacht („Nacht-HMI“).

Für die Darbietung einer höher aufgelösten Nachricht an externe Verkehrsteilnehmer bei Nacht und Dämmerung ist die Projektion als vorteilhaft anzusehen. Zudem ermöglicht diese die Kommunikation mit dem Fahrer des Ego-Fahrzeuges.

Das Tag-HMI ist technologisch so auszulegen, dass dieses auch bei Tageslicht wahrgenommen werden kann. Je nach Komplexität und Umfang der zu übertragenden Nachricht ist die Umsetzung über eine niedrig aufgelöste Signalleuchte möglich oder die Darbietung eines Symbols auf einem Display.

Die vorgestellten Ansätze und Fragestellungen werden innerhalb des BMWi-geförderten Verbundprojektes „INITIATIVE“ mit dem Förderkennzeichen 19A21008D genauer untersucht und bearbeitet.

Literaturangaben

- [1] Mercedes-Benz: DIGITAL LIGHT: Das Licht der Zukunft kommt auf die Straße., 2018. <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/fahrzeuge/personenwagen/mercedes-maybach/digital-light-das-licht-der-zukunft-kommt-auf-die-strasse/>, abgerufen am: 04.01.2019
- [2] HELLA: Unser Digital Light SSL | HD-Lichtsystem: ein neuer Meilenstein der automobilen Lichttechnik | HELLA, 2019. <https://www.hella.com/techworld/de/Lounge/Unser-Digital-Light-SSL-HD-Lichtsystem-ein-neuer-Meilenstein-der-automobilen-Lichttechnik-55548/>, abgerufen am: 26.01.2021
- [3] Willrodt, J.-H., Döhler, S. u. Wallaschek, J.: Über die Umsetzung einer gerichteten Signalleuchte für automatisierte Fahrzeuge auf Basis einer asphärischen Fläche. Tagungsband Lux Junior 2017. 2017
- [4] Reschke, J., Rabenau, P., Hamm, M. u. Neumann, C.: Symbolische Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion. 8. VDI Fachtagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik : Karlsruhe, 05. und 06. Juni 2018, Bd. 2323. VDI-Verlag, Düsseldorf 2018, S. 95–106
- [5] Budanow, M. u. Neumann, C.: Road projections as a new and intuitively understandable human-machine interface. *Advanced Optical Technologies* 8 (2019) 1, S. 77–84
- [6] Shannon, C. E.: A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal* 27 (1948) 3, S. 379–423

- [7] Geßner, T.: Evaluation eines Navigationssystems auf Basis von Bodenprojektion, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2018
- [8] Spătaru, A.: Theorie Der Informationsübertragung. Signale und Störungen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 1973