

**METHODEN DER LICHTBASIERTEN KOMMU-
NIKATION ZWISCHEN AUTOMATISIERTEN
FAHRZEUGEN UND SCHWÄCHEREN
VERKEHRSTEILNEHMERN**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Maximilian Baumann

geboren am und in: 09.06.1992, Speyer

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Dezember 2024

Hauptreferent: Prof. Dr. Cornelius Neumann

Korreferent: Prof. Dr. Christoph Stiller

„Ich bin ...“

„Mich interessiert nicht, wer du bist. Du bist neu hier. Ich kümmere mich um die Neuen. Belassen wir es vorerst dabei.“

I DANKSAGUNG

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen voran Prof. Cornelius Neumann, an dessen Lehrstuhl ich die Arbeit anfertigen konnte. Für die Möglichkeit zur Promotion sowie die fachlichen Diskussionen und Alltagsgespräche danke ich besonders.

Bei Prof. Christoph Stiller möchte ich mich herzlich für die Übernahme des Korreferats bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinen Kollegen am Lichttechnischen Institut, sowohl den ehemaligen als auch den aktuellen. Für die Bereicherung des Alltags im Büro danke ich ganz besonders Asu Rayamajhi, Leonhard Dudzik und Jan Feßler. Mit euch hatte und habe ich stets kompetente Ansprechpartner und Menschen, mit denen man über alles quatschen kann.

Dr. Klaus Trampert danke ich für das stetige Hinterfragen meiner Vorgehensweise und die kritischen Diskussionen. Diese haben einen sehr großen Teil zu dieser Arbeit beigetragen. Tino Weiß danke ich, dass ich immer mit Objekten zur Messung und Redebedarf vorbeikommen durfte, auch wenn es der Terminplan nicht zugelassen hätte.

Bei meinen ehemaligen Kollegen möchte ich mich bedanken, dass sie mich so herzlich hier am LTI aufgenommen und zur Promotion

Danksagung

ermutigt haben. Dabei besonders erwähnen möchte ich Dr. Melanie Helmer, Dr. Patric Jahn und Dr. Markus Katona.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Studenten und HIWIs bedanken, die wertvollen Input für die Arbeit geliefert haben und die auch außerhalb des Instituts die Motivation stets hochhalten konnten.

Dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie danke ich für die Finanzierung im Rahmen des Verbundprojektes *INITIATIVE* (FKZ 19A21008D).

Der Firma Hyundai Mobis Co., Ltd. danke ich die Finanzierung der beiden durchgeführten Projekte.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Bei meinen Eltern Christiane und Kurt, die mir das Studium ermöglicht haben und mich seit jeher unterstützen. Meinem Bruder Sebastian danke ich für die gemeinsame Studienzeit und die vielen Gespräche fachbezogen sowie fachfremd.

Der größte Dank gebührt meiner Frau Jessica, die immer für mich da ist und mich stets dazu ermutigt, das Beste aus mir herauszuholen. Ohne sie hätte ich die Promotion nicht abschließen können. Unserem Sohn Mattheo danke ich für sein strahlendes Lächeln.

II INHALTSVERZEICHNIS

I	Danksagung	IV
II	Inhaltsverzeichnis.....	VII
	Kapitel 1	11
1	Einleitung	11
	1.1 Motivation	11
	1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit.....	15
	1.3 INITIATIVE	16
	Kapitel 2	21
2	Grundlagen	21
	2.1 § 11 Abs. 3 StVO.....	21
	2.2 Kommunikation	24
	2.3 Einführung autonomer Fahrzeuge	26
	2.4 Wahrnehmung	28
	Kapitel 3	33
3	Stand der Technik.....	33
	3.1 Kommunikation im Strassenverkehr	33
	3.2 Lichtbasierte Kommunikation	37
	3.3 Andere Forschungsvorhaben.....	40
	Kapitel 4	43
4	Methodik	43

Inhaltsverzeichnis

4.1	Begrifflichkeiten.....	44
4.2	Formulierung der Problemstellung	47
4.3	Pattsituation	50
4.4	Szenen aus dem Strassenverkehr zur Bearbeitung	56
4.5	Robustheit der Kommunikation.....	61
4.6	Informationsüberflutung.....	67
4.7	Cyan nach SAE J3134	69
Kapitel 5		73
5	Untersuchung HMI-Systeme	73
5.1	Symbolprojektion	73
5.2	Displaykommunikation.....	101
5.3	Lichtband.....	123
5.4	Signalleuchte	129
Kapitel 6		151
6	Diskussion	151
6.1	Gestaltung der Kommunikation	152
6.2	Anforderungen an eine lichtbasierte Kommunikationseinrichtung und Handlungsempfehlungen	156
Kapitel 7		161
7	Fazit	161
7.1	Zusammenfassung	161
7.2	Ausblick	165

Inhaltsverzeichnis

III	Literatur	166
IV	Abbildungsverzeichnis.....	177
V	Tabellenverzeichnis	186
VI	Veröffentlichungen	187
VII	Betreute Arbeiten.....	189
VIII	Anhang.....	191
	Anhang A: Abkürzungen und Formelzeichen.....	191
	A.1 Abkürzungen.....	191
	A.2 Formelzeichen	193
	Anhang B: Fragebogen und Ergebnis-	
	diagramme.....	195
	B.1 Symbolprojektion –	
	Symbolvergleich.....	195
	Anhang C: Auswertung statistischer	
	Untersuchungen.....	199
	C.1 Symbolgrösse.....	199
	C.2 Symbolhelligkeit.....	202
	C.3 Cyanleuchte	203

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Durch die stetige Weiterentwicklung automatisierter Fahrzeuge und der damit verbundenen Forschung, nehmen bereits heute Fahrzeuge mit autonomen Fahrfunktionen am Straßenverkehr teil. Erste technische Umsetzungen umfassen zum Beispiel Fahrzeuge im Bereich Güter- und Personentransport [1], [2], [3], [4]. Dabei wird zwischen Fahrzeugen verschiedener Automationsstufen unterschieden. Automationsstufen beschreiben den Grad der Automation, in dem sich das Fahrzeug befindet [5].

Diese Stufen wurden durch die SAE International (ehemals Society of Automotive Engineers) in der Norm J3013 definiert. Beginnend bei der „Stufe 0“, die herkömmliche, manuell geführte Fahrzeuge ohne jegliche Fahrerassistenzsysteme beinhaltet bis zu „Stufe 5“, in der das Fahrzeug ohne menschliches Eingreifen alle Funktionen einschließlich der Fahraufgabe übernimmt, vgl. Abbildung 1.1.



SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION™

Learn more here: sae.org/standards/content/J3016_202104

Copyright © 2021 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed AS-IS provided that SAE International is acknowledged as the source of the content.

	SAE LEVEL 0™	SAE LEVEL 1™	SAE LEVEL 2™	SAE LEVEL 3™	SAE LEVEL 4™	SAE LEVEL 5™
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in "the driver's seat"		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	

Copyright © 2021 SAE International.

	These are driver support features			These are automated driving features		
What do these features do?	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met		This feature can drive the vehicle under all conditions
Example Features	<ul style="list-style-type: none"> • automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering OR • adaptive cruise control 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering AND • adaptive cruise control at the same time 	• traffic jam chauffeur	<ul style="list-style-type: none"> • local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed 	• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

Abbildung 1.1: Übersicht der durch die SAE in der J3016 definierten Stufen der Automation.

Somit entfällt spätestens ab Stufe 4 der Zusammenhang, dass die Person hinter dem Lenkrad das Fahrzeug führt und für dessen Manöver verantwortlich ist. Diese kann sich während der Fahrt nun anderen Tätigkeiten, wie zum Beispiel dem Lesen eines Buches oder der Bedienung eines Smartphones widmen. Eine aktive Teilnahme dieser Person am Straßenverkehr ist folglich obsolet und sie fungiert tatsächlich nur noch als Fahrgast.

An dieser Stelle zeigt sich ein Problem, das auch von vielen Forschende gesehen wird, denn im Straßenverkehr wird zwischen den Verkehrsteilnehmern immer wieder kommuniziert. Dies umfasst

einerseits die technische Kommunikation, wie beispielsweise über die Signalfunktionen am Fahrzeug und andererseits die Kommunikation der Verkehrsteilnehmer untereinander, beispielsweise durch Gesten [6], [7], [8]. Durch den Entfall der fahrzeugführenden Person kann diese Kommunikation nicht mehr wie bisher stattfinden.

Im Straßenverkehr kann es aber zu Situationen kommen, in denen eine Kommunikation unerlässlich ist, beispielsweise wenn die Vorfahrt nicht mehr eindeutig geregelt ist, also in sogenannten Pattsituationen. Beispiele hierfür sind eine gleichrangige 4-Wege-Kreuzung, an der alle Verkehrsteilnehmer geradeaus fahren möchten oder eine durch Hindernisse beidseitig verengte Fahrbahn. In der Regel verständigen sich die Verkehrsteilnehmer dann untereinander, wer zuerst fahren darf, um die Situation zu lösen.

Im zukünftigen Mischverkehr kann sich unter den Teilnehmern auch ein oder mehrere automatisierte Fahrzeuge befinden. Versuchen die verbleibenden manuellen Verkehrsteilnehmer sich nun mit dem automatisierten Fahrzeug zu verständigen, kann es zu unklaren Situationen oder Verwirrung kommen. Auch Situationen, aus denen eine Gefahr für die Beteiligten entsteht, sind nicht auszuschließen. Dies ist der Fall, wenn sich mehrere Verkehrsteilnehmer aufgrund des ausbleibenden Feedbacks die Vorfahrt nehmen und entscheiden loszufahren.

Aus diesem Grund ist es notwendig, dass zukünftig eine technische Einrichtung am autonomen Fahrzeug diese Funktion übernimmt und als Schnittstelle zwischen autonomen Fahrzeug und Mensch agiert.

Vielversprechende Konzepte einer solchen Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl. Human Machine Interface – HMI) setzen hierbei auf eine lichtbasierte Kommunikation. Dies bedeutet, dass das autonome Fahrzeug Nachrichten visuell wahrnehmbar darstellen kann. Diese Konzepte verwenden beispielsweise die Darstellung von Mustern oder Animationen auf Lichtstreifen am Fahrzeug oder Symbole, die auf Displays am Fahrzeug dargestellt oder auf der Fahrbahn projiziert werden, vgl. Abbildung 1.2.



Abbildung 1.2: Beispiel für eine lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle an einem Fahrzeug [9].

Je nach Technologie ist es somit möglich, beliebige Formen, Farben und Animation zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern zu nutzen.

In vielen Forschungsvorhaben wird daher aktuell intensiv daran gearbeitet, die Kommunikation der Zukunft zwischen autonomen Fahrzeugen und nicht-autonomen Verkehrsteilnehmern zu gestalten [10], [11]. Ziel der Kommunikation ist es einerseits, sich in besonders unübersichtlichen Verkehrslagen miteinander zu verständigen um eine Lösung der Situation herbeizuführen und andererseits auch, durch eine Vermenschlichung der autonomen Fahrzeuge, das Vertrauen in diese zu steigern [12].

1.2 ZIEL UND AUFBAU DER ARBEIT

Bereits bestehende Ansätze einer lichtbasierten Kommunikation sollen in dieser Arbeit analysiert und kritisch hinterfragt werden. Ausgehend von zuvor definierten Situationen im Straßenverkehr, werden verschiedene Technologien betrachtet, die durch die Darstellung von Nachrichten die Situation lösen bzw. die adressierten Empfänger zu einer vorgesehenen Reaktion bewegen.

Zunächst wird zum Verständnis der notwendigen Grundlagen das Thema Kommunikation im Kontext des Straßenverkehrs näher betrachtet. Davon ausgehend wird die lichtbasierte Kommunikation im Allgemeinen und anschließend anhand anderer Forschungsvorhaben analysiert.

Weiter wird im methodischen Teil der Arbeit die Notwendigkeit der Kommunikation hinterfragt und analysiert, um schließlich die Problemstellung allgemeingültig zu formulieren.

Durch die tiefere Definition einer Pattsituation ist ferner eine Grundlage vorhanden, anhand derer exemplarische Szenen aus dem Straßenverkehr ausgewählt werden, die durch eine Kommunikation mit Licht zu lösen sind. Ziel ist es, sowohl statische als auch dynamische Szenen sowie den Einfluss einer Störung auf die Kommunikation zu untersuchen.

In diesem Zug wird das Risiko der Ablenkung durch eine lichtbasierte Kommunikation betrachtet sowie die durch die SAE verabschiedete Empfehlung J3134 als Grundlage für die im darauffolgenden Kapitel untersuchten Technologien angeführt.

Im Kapitel HMI Systeme erfolgt eine systematische Untersuchung einzelner HMI-Systeme hinsichtlich der Funktionalität in verschiedenen Situationen und der Anwendbarkeit im Straßenverkehr.

Abschließend werden alle Erkenntnisse zusammengefasst und auf die Verwertbarkeit überprüft. Eine Handlungsempfehlung für die Gestaltung der lichtbasierten Kommunikation im Straßenverkehr ist zum Schluss zu formulieren.

1.3 INITIATIVE

Die in dieser Arbeit präsentierten Untersuchungen fanden teils im Verbundprojekt INITIATIVE statt. Das Akronym INITIATIVE steht für „*INtelligente Mensch-Technik KommunIkATion im gemischten VERkehr*“. An dem durch das Bundesministerium für Wirtschaft und

Energie (BMW i, mittlerweile Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz – BMWK) geförderte Verbundprojekt mit dem Förderkennzeichen 19A21008D [13] haben die folgenden Partner teilgenommen: HELLA GmbH & Co. KGaA, WIVW- Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH, Electric Special Photonicsysteme (ESPS) GmbH, version1 GmbH, Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB), Universität des Saarlandes – Institut für Rechtsinformatik (UdS) und vom Karlsruher Institut für Technologie das Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (KIT-IRS) und das Lichttechnische Institut (KIT-LTI).

Im Kontext der Automatisierung des Straßenverkehrs ist eine zunehmende Integration von Fahrzeugen mit immer höherem Automatisierungsgrad zu erwarten. Die Kommunikation zwischen hochautomatisierten Verkehrsteilnehmern (Autonomous Vehicles bzw. AV) und schwächeren Verkehrsteilnehmern (Vulnerable Road User bzw. VRU), wie Fußgängern, Radfahrern und auch nicht automatisierten Fahrzeugen, spielt dabei eine zentrale Rolle. Nur ein situationsangepasster, intelligenter Kommunikationsprozess, der alle relevanten Teilnehmer einbezieht, kann dabei eine erfolgreiche Integration zukünftiger automatisierter Fahrzeuge in den Mischverkehr gewährleisten. Diese Integration ist wiederum entscheidend für die gesellschaftliche Akzeptanz automatisierter Fahrfunktionen und Fahrzeugen im Straßenverkehr.

Die intelligente Interaktion zwischen Mensch und Maschine trägt ferner zur Erhöhung der Verkehrssicherheit bei und dürfte die Akzeptanz weiter steigern. Das Gesamtziel des Projekts INITIATIVE

besteht darin, eine KI-gestützte, intelligente Interaktion zwischen AVs und VRUs zu realisieren. Dabei werden Verhaltensweisen situationsabhängig erfasst, Intentionen auf Seiten der AVs und VRUs erkannt und eine darauf abgestimmte Kommunikation zwischen den beteiligten Verkehrsteilnehmern ermöglicht. Das AV soll die Interaktion der Insassen – im manuellen Betrieb die Rolle des Fahrers – substituieren und sich nahtlos in den Verkehr integrieren. Im Rahmen des geförderten Projekts werden drei zentrale Problemstellungen zur Realisierung dieser Interaktion und des Kommunikationsprozesses bearbeitet, vgl. Abbildung 1.3.

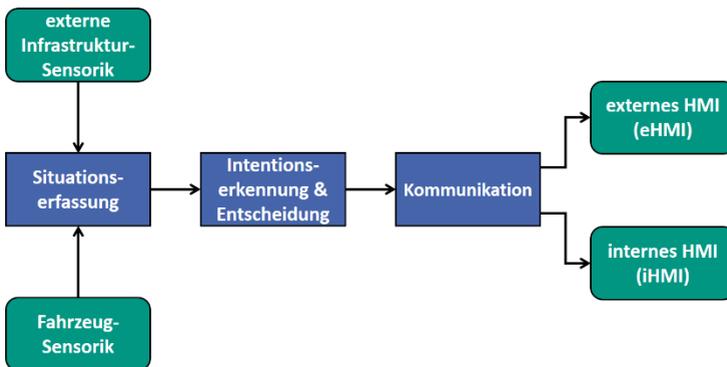


Abbildung 1.3: Struktureller Aufbau der gesamten Verarbeitungskette im Projekt INITIATIVE von Situationserfassung, Entscheidungsprozess und Kommunikation durch Anzeige nach Innen bzw. Außen.

Im Einzelnen geht es dabei um die folgenden Problemstellungen:

Situationserfassung: Zum einen muss die jeweilige Verkehrssituation erfasst und relevante Interaktionsteilnehmer identifiziert werden. Im fließenden Verkehr soll dabei eine bedarfsgerechte Interaktion stringent nur mit den jeweils beteiligten Teilnehmern erfolgen.

Intentionserkennung und Entscheidungsfindung: Zum anderen muss eine Erkennung der Intention des jeweils anderen Verkehrsteilnehmers sowohl aufseiten des AV als auch aufseiten der VRUs realisiert werden. Nur so können bedarfsgerechte Entscheidungen auf Seiten des AVs – und damit der Maschine – getroffen und eine entsprechende Interaktion zwischen den Verkehrsteilnehmern realisiert werden.

Kommunikation: Darauf aufbauend muss eine eindeutige und verständliche Kommunikation zwischen den Teilnehmern durchgeführt werden. Diese erfolgt vom AV in Richtung der VRUs als externe Mensch-Maschine-Schnittstelle (external Human Machine Interface – eHMI) sowie in Richtung der Insassen des AVs als interne Mensch-Maschine-Schnittstelle (internal Human Machine Interface – iHMI).

Kapitel 2

GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel sind grundlegende Begriffe, die zum Verständnis der Arbeit notwendig sind, angeführt und näher erläutert. Dabei von besonderer Bedeutung sind Grundlagen über geltende Regelungen im Straßenverkehr sowie den Bereich der Kommunikation, die Einführung autonomer Fahrzeuge und die menschliche Wahrnehmung.

2.1 § 11 ABS. 3 StVO

In der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) der Bundesrepublik Deutschland befinden sich die wichtigsten Regelungen und Vorschriften zur Teilnahme am Straßenverkehr. Diese Rechtsverordnung umfasst Regelungen für alle Teilnehmer am Straßenverkehr auf öffentlichen Straßen und Wegen sowie Plätzen im öffentlichen Raum. Leitgedanke dabei ist stets die gegenseitige Rücksichtnahme, welche auch durch den § 1 StVO formuliert ist [13]. Weitere Regelungen umfassen Vorschriften zur Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer, Abstand der Verkehrsteilnehmer zueinander oder der Nutzung des Straßenraumes [14], [15], [16]. Es wird außerdem geregelt, welcher Verkehrsteilnehmer in einer bestimmten Situation Vorfahrt hat [17]. Die Vorfahrtsregelung erfolgt aus den örtlichen Gegebenheiten, z.B. Kreuzung mit gleichberechtigten Wegen oder Vorfahrtsstraßen oder

zusätzlichen Einrichtungen, wie Verkehrszeichen oder Lichtsignalanlagen [19]. Grundsätzlich ist auch die Regelung des Verkehrs an Kreuzungen durch Polizeibeamte möglich [20]. Deren Anweisung geht dabei allen anderen Regelungen vor.

An Kreuzungen, die nicht nur durch die allgemeine Vorfahrtsregel geregelt sind, gibt es keine Situation, in der die Vorfahrtslage nicht eindeutig geklärt ist. Der Verkehr fließt normal, es kann zu keiner Pattsituation kommen.

Anders ist dies allerdings bei Verkehrslagen, die in § 11 StVO geregelt sind, den sogenannten **Besonderen Verkehrslagen** [20]. Von besonderem Interesse ist in diesem Fall dabei der Absatz 3, in dem explizit eine Situation beschrieben wird, in der ein Verkehrsteilnehmer auf seine Vorfahrt verzichten muss, wenn die Verkehrslage es erfordert.

Konkret könnte dies eine Situation an einer Kreuzung sein, an der alle Wege gleichberechtigt sind, siehe Abbildung 2.4 links. Somit gilt die allgemeine Vorfahrtsregel. Nähert sich nun zur gleichen Zeit von jedem Weg ein Fahrzeug, müssten alle warten, da sie jeweils von rechts einen anderen vorfahrtsberechtigten Verkehrsteilnehmer hätten. Der Verkehr würde in dieser Situation zum Erliegen kommen.

Ein anderes Beispiel ist eine Straße, die beidseitig durch parkende Fahrzeuge oder etwa eine Baustelle verengt ist, siehe Abbildung 2.4 rechts. Nähern sich nun von beiden Seiten Fahrzeuge, müssten beide aufgrund des Hindernisses auf ihrer Fahrbahn anhalten und warten. Auch hier wäre ein Stillstand des Verkehrs die Folge.

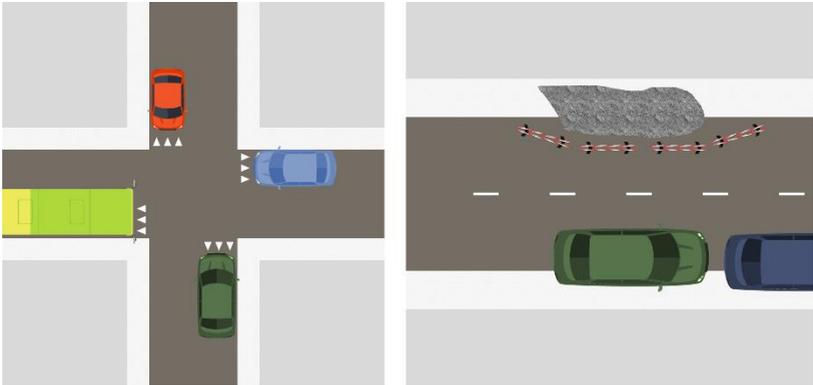


Abbildung 2.4: Besondere Verkehrslage mit Beispielen „Kreuzung mit vier Wegen“ (links) und „Engstelle“ (rechts).

Zur Vermeidung einer solchen Situation schreibt § 11 Abs. 3 StVO vor, dass in solch einem Fall ein Verkehrsteilnehmer auf seine Vorfahrt verzichten muss. Weiter regelt die Vorschrift, dass auf einen Verzicht nur vertraut werden darf, wenn eine Verständigung mit dem Verzichtenden erfolgt. Verständigen meint hier eine Absprache, welche eine Kommunikation zwischen zwei oder mehreren Verkehrsteilnehmern darstellt.

Der Begriff der Kommunikation wird daher an dieser Stelle zunächst allgemein eingeführt und später direkt im Kontext Straßenverkehr noch einmal untersucht.

2.2 KOMMUNIKATION

Der zuvor genannte § 11 Abs. 3 StVO fordert eine Verständigung der beteiligten Verkehrsteilnehmer. In diesem Kontext ist mit Verständigung eine Absprache durch Kommunikation der beteiligten Verkehrsteilnehmer gemeint. Zum besseren Verständnis soll daher zunächst eine allgemein gültige Betrachtung der Kommunikation erfolgen.

Kommunikation im Allgemeinen bedeutet das Austauschen oder Übertragen von Informationen über eines oder mehrere bestimmte Medien. Kommunikation kann sowohl verbal als auch nonverbal erfolgen [22], [23].

Zur Beschreibung eines Kommunikationsvorganges wurden verschiedene Möglichkeiten entwickelt. Eine sehr bekannte ist das sogenannte Sender Empfänger Modell von Shannon und Weaver [24]. Dies beschreibt die Übertragung eine Information in Form eines Signals vom Sender, über den Kommunikationskanal zu einem Empfänger, wie in Abbildung 2.5 zu sehen.

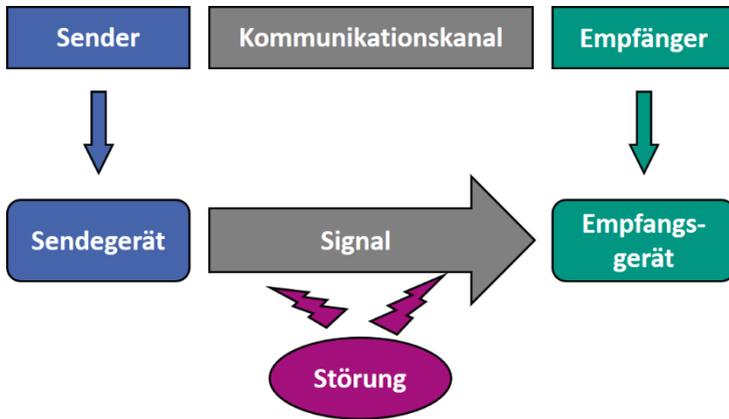


Abbildung 2.5: Vereinfachte Darstellung des Kommunikationsmodells nach Shannon und Weaver.

Senderseitig wird unterschieden zwischen dem Sender und dem Sendegerät. Der Sender selbst bezeichnet dabei die Instanz, welche die zu übertragende Nachricht formt und die Entscheidung trifft, zu senden. Die Nachricht wird dann über das Sendegerät auf den Kommunikationskanal gegeben. Je nach Ausführung kann es sich dabei beispielsweise um ein Funkgerät oder eine technische Anzeige handeln.

Der Kommunikationskanal stellt das Medium dar, über das die Nachricht übertragen wird. Dabei kann es sich im einfachsten Fall um Luft handeln, die eine direkte Übertragung von beispielsweise Schall auf kurzen Distanzen ermöglicht, aber auch größere Distanzen können kabelgebunden überwunden werden.

Die Übertragung der Nachricht kann durch äußere Einflüsse gestört werden. Diese Störung kann die Nachricht verfälschen, sodass diese

unvollständig oder verändert den Empfänger erreicht. Die Nachricht kann jedoch auch vollständig verloren gehen. Beispiele für solche Störungen werden in Kapitel 4.5 angeführt und näher beschrieben.

Die Seite des Empfängers besteht ebenfalls aus einem Empfangsgerät und dem Empfänger selbst. Das Empfangsgerät nimmt die gesendete Nachricht über den Kommunikationskanal auf und stellt diese für den Empfänger verständlich dar.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Übertragung ist, dass sowohl Sender als auch Empfänger über ein einheitliches Alphabet verfügen. Mit Alphabet ist eine Menge gemeinsamer Codes gemeint, die ermöglichen, dass die, durch den Sender gesendete Botschaft, vom Empfänger verstanden und korrekt interpretiert wird.

2.3 EINFÜHRUNG AUTONOMER FAHRZEUGE

Bereits heute sind autonome Fahrzeuge Bestandteil im Straßenverkehr. Zwar ist der Anteil der Fahrzeuge, die ohne menschliches Zutun selbstständig unterwegs sind, momentan noch marginal, es ist jedoch erwartbar, dass dieser Anteil zukünftig stark wachsen wird.

Die stetige Forschung und technologische Entwicklung auf dem Gebiet der autonom fahrenden Fahrzeuge, aber auch die Gestaltung neuer Gesetze ermöglichen bereits heute das autonome Fahren im öffentlichen Verkehrsraum [2021 Bundesregierung]. Konkret ist

gemeint, dass autonome Fahrzeuge der Stufe 4 in festgelegten Betriebsbereichen bundesweit im öffentlichen Verkehrsraum fahren dürfen.

Mit Stufe 4 ist hierbei der Autonomiegrad gemeint, der durch die SAE in der 2014 erstveröffentlichten SAE J3016 definiert wird [SAE J3016]. Die Automatisierungsstufen, auch Level genannt, sind in **Tabelle 2.1** dargestellt.

Tabelle 2.1: Automatisierungsstufen, definiert durch die SAE J3016. Beginnend bei Level 0 „Keine Automation“ bis Level 5 „Vollautomatisierung“

SAE Level	Name	Umgebungsbeobachtung
Level 0	Keine Automation	Fahrer
Level 1	Assistenzsysteme	Fahrer
Level 2	Teilautomatisierung	Fahrer
Level 3	Bedingte Automatisierung	System
Level 4	Hochautomatisierung	System
Level 5	Vollautomatisierung	System

Insgesamt werden durch die SAE sechs verschiedene Level definiert. Mit aufsteigendem Level werden zunehmend mehr Aufgaben, die vormals dem Fahrer zugeordnet waren, durch das System übernommen. Bereits ab Level 2, der Teilautomatisierung, ist eine vollständige Längs- und Querführung durch das System möglich.

Ab Level 3 werden alle relevanten Fahraufgaben, inklusive der Umgebungsbeobachtung durch das System übernommen. Der menschliche Fahrer muss jedoch nach Aufforderung eingreifen und die Führung des Fahrzeuges übernehmen. Dies kann beispielsweise in unübersichtlichen oder sicherheitskritischen Situationen notwendig sein.

Mit Erreichung der Hochautomatisierung in Level 4 fährt das Fahrzeug vollkommen selbstständig, ein Eingreifen durch einen menschlichen Fahrer wird nicht mehr erwartet. Dieser kann sich somit während der Fahrt anderen Tätigkeiten widmen und muss dem Verkehrsgeschehen nicht mehr aktiv zugewandt sein.

In der vorliegenden Arbeit sind mit autonomen Fahrzeugen ausschließlich Fahrzeug mit Automatisierungsstufe 4 und höher gemeint und von Interesse.

2.4 WAHRNEHMUNG

Eine weitere wichtige Grundlage ist die Wahrnehmung, Entscheidend für die Wahrnehmung eines Objektes sind dabei der Kontrast und der Sehwinkel, den das Objekt im Gesichtsfeld des Beobachters einnimmt.

2.4.1 KONTRAST

Als Kontrast wird der Unterschied zwischen hellen und dunklen Flächen bezeichnet [25], [26]. Grundlage für die Berechnung des Kontrastes ist dabei ein Verhältnis der Leuchtdichte der zu bewertenden Flächen. Der Kontrast ist eine dimensionslose Größe und kann je nach Berechnung einen unterschiedlich großen Wertebereich annehmen.

Für die weitere Betrachtung während dieser Arbeit sind zwei Definitionen des Kontrastes notwendig und werden im Folgenden genauer erläutert.

2.4.1.1 KONTRAST NACH WEBER

Zur Bewertung der Sichtbarkeit eines Objektes in einem Umfeld wird häufig der sogenannte Weber-Kontrast verwendet. Dieser berechnet sich analog (2.1) aus dem Verhältnis der Leuchtdichten des Objektes L_O und des Umfeldes L_U .

$$K_W = \frac{L_O - L_U}{L_U} \quad (2.1)$$

Bedingt durch die Definition des Weber-Kontrastes ergibt sich ein Wertebereich von $0 \leq K_W < \infty$. Für Leuchtdichten von Objekt und Umfeld gleicher Größenordnung ergeben sich somit sehr kleine Kontrastwerte, für sehr große Objektleuchtdichten bzw. sehr kleine Umfeldleuchtdichten ergeben sich hohe Kontraste. Bei einer

theoretischen Umfeldleuchtdichte von 0 wäre der Weber-Kontrast unendlich groß.

Diese Definition des Kontrastes eignet sich zur Betrachtung homogener Objekte in einem nahezu homogenen Umfeld. Auch der Vergleich verschiedener Objekte im selben Umfeld ist möglich.

Sollen jedoch verschiedene Objekte vor unterschiedlichen Hintergründen betrachtet und verglichen werden, ist der Weber-Kontrast eher ungeeignet. Durch den ungewichteten Einfluss der Umfeldleuchtdichte variieren die resultierenden Kontraste sehr stark, sofern sich Objekt- und Umfeldleuchtdichte in ähnlicher Größenordnung befinden.

Für diese Vergleiche ist der Michelson-Kontrast daher besser geeignet.

2.4.1.2 KONTRAST NACH MICHELSON

Der Michelson-Kontrast, auch Interferenzkontrast oder Modulation genannt, beschreibt das normierte Verhältnis von Objektleuchtdichte L_O zu Umfeldleuchtdichte L_U wie folgt:

$$K_M = \frac{L_O - L_U}{L_O + L_U} \quad (2.2)$$

Durch diese Definition des Kontrastes ist der Wertbereich begrenzt von $0 \leq K_M \leq 1$. Dies erlaubt den Vergleich verschiedener Objekte in

Umgebungen unterschiedlicher Leuchtdichten anhand einer normierten Skala.

2.4.2 SEHWINKEL

Der Sehwinkel α bezeichnet den Winkel, der von zwei Geraden aufgespannt wird, die das Auge mit je einem zweier gegenüberliegender Randpunkte eines Objektes oder einer Fläche verbindet, wie in Abbildung 2.6 zu sehen [27].

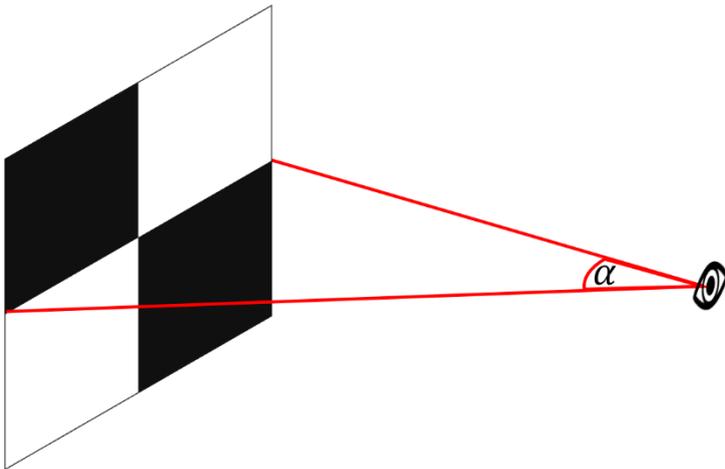


Abbildung 2.6: Horizontaler Sehwinkel α , den ein Objekt im Gesichtsfeld eines Beobachters einnimmt.

Der Sehwinkel erlaubt eine entfernungsunabhängige Beschreibung der Beziehung zwischen Objekt und Beobachter. Über den Sehwinkel

Wahrnehmung

sind bestimmte Mindestwinkel zu definieren, die notwendig sind, damit ein Objekt für einen Beobachter sicht- bzw. wahrnehmbar ist.

Kapitel 3

STAND DER TECHNIK

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik gegeben. Dies bezieht sich einerseits auf Methoden und Technologien der Kommunikation im Straßenverkehr, andererseits auch auf Entwicklungen aus dem Bereich der lichtbasierten Kommunikation, die in den vergangenen Jahren erfolgreich in den Markt eingeführt wurden.

Des Weiteren werden einige exemplarische Forschungsvorhaben vorgestellt, die sich mit der Thematik der lichtbasierten Kommunikation beschäftigen. Einige der Vorhaben sind bereits abgeschlossen, weitere zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch in Bearbeitung.

3.1 KOMMUNIKATION IM STRASSENVERKEHR

Kommunikation, sowohl verbal als auch nonverbal, ist ein fester Bestandteil im Straßenverkehr. Zur Informationsübertragung wird Sprache bzw. Gestik verwendet [6]. Die verbale Kommunikation beschränkt sich meist auf Situationen zwischen Fußgängern oder gegebenenfalls noch auf Interaktionen mit Fahrradfahrern.

Dem entgegen steht die nonverbale Kommunikation, die alle Formen der Kommunikation umfasst, welche nicht auf eine sprachliche Informationsvermittlung gestützt sind. Die Informationsübertragung kann dabei über alle Sinne erfolgen. So ist beispielsweise eine Kommunikation über Töne, z.B. die Hupe, Bilder und Zeichen, aber auch über Gestiken und Körperhaltung möglich [28].

Bedingt durch die Position des Fahrzeugführers im geschlossenen Fahrzeug, wird mit diesem überwiegend nonverbal kommuniziert beziehungsweise kommuniziert dieser nonverbal mit anderen Verkehrsteilnehmern. Es wird unterschieden zwischen direkter und indirekter Kommunikation.

Die direkte Kommunikation umfasst alle Aktionen und Handlungen die von einem Sender, hier dem Fahrer, getätigt werden, um eine Botschaft an einen Empfänger zu geben. Ein Beispiel für eine direkte Kommunikation ist eine Handgeste, wie in Abbildung 3.7 gezeigt.

Der Fahrer signalisiert ihm durch die Handgeste, dass er dem Empfänger die Vorfahrt überlässt und wartet, bis dieser gequert hat.



Abbildung 3.7: Handgeste als Zeichen, dass der Fahrer auf die eigene Vorfahrt verzichtet und querendem Verkehr das Passieren ermöglicht [29].

Die indirekte Kommunikation hingegen erfolgt, ohne dass dies durch den Sender aktiv herbeigeführt wird. Als Beispiel für eine indirekte Kommunikation ist hierbei die Fahrbewegung eines Verkehrsteilnehmers mit einer bestimmten Geschwindigkeit anzusehen. Diese zeigt einem externen Verkehrsteilnehmer an, dass sich das Fahrzeug bewegt und zum Beispiel das Überqueren der Fahrbahn vor diesem Fahrzeug nicht ratsam ist. Demgegenüber kann die Verringerung der Geschwindigkeit eines Fahrzeuges kommunizieren, dass das Fahrzeug zeitnahe zum Stillstand kommen kann und ein Überqueren der Fahrbahn ermöglicht wird.

Ein anderes Beispiel ist der Blickkontakt zwischen zwei Verkehrsteilnehmern. Dieser versichert beiden gegenseitig, dass der jeweils andere ihn erkannt und zur Kenntnis genommen hat.

Dies kann in Situationen an einem Fußgängerüberweg (FGÜ) zwischen Fußgängern und Auto- oder auch Fahrradfahrern zum Tragen kommen.

Voraussetzung für diese Art der Kommunikation im Straßenverkehr ist jedoch, dass Sender und Empfänger in visuellem Kontakt stehen. Der Empfänger muss somit nahezu freie Sicht auf das Sendegerät haben. Gerade jedoch bei Sonnenschein kann es zu Reflexionen auf der Windschutzscheibe eines Fahrzeuges kommen, sodass der Fahrer und damit auch dessen Blick oder Gesten nicht zu sehen sind.

Ebenso ist die Kommunikation über Gesten und/oder Blickkontakt in den Abend- oder Nachtstunden oftmals gestört bzw. nicht mehr möglich, siehe Kapitel 4.5.

Eine Möglichkeit zur Lösung dieses Problems ist der Wechsel des Sendegeräts und somit die Kommunikationsform. Statt dem Geben von Handzeichen benutzen Autofahrer in den Abend- und Nachtstunden häufig die Lichthupe, um anderen beispielsweise zu signalisieren, dass diese fahren sollen oder auch, um sich zu bedanken [28]. Als Lichthupe wird das ein- oder mehrmalige kurzes Aufblenden des Fernlichtes bezeichnet [30]. Die bestehenden lichttechnischen Einrichtungen am Fahrzeug werden somit durch menschliches Zutun um bestimmte Funktionen erweitert, die geeignet sind, einfache Nachrichten zu versenden.

Standardmäßig sind viele verschiedene lichttechnische Einrichtungen am Fahrzeug zur Kommunikation verschiedener Zustände bzw. Fahrabsichten verbaut. Diese lichtbasierte Kommunikation wird im

Folgenden daher kurz angeführt und hinsichtlich der Möglichkeiten zur Darstellung verschiedener Nachrichten betrachtet.

3.2 LICHTBASIERTE KOMMUNIKATION

Die am Fahrzeug bereits verbauten lichttechnischen Einrichtung sind hinsichtlich ihrer Funktion in zwei Kategorien zu unterscheiden:

- i. **SEHEN** – Ausleuchtung der Fahrbahn: Die Scheinwerfer des Fahrzeuges beleuchten die Fahrbahn für ausreichende Sicht bei Dunkelheit.
- ii. **GESEHEN WERDEN** – Aufmerksamkeit erregen: Durch Signalfunktionen des Fahrzeuges ist das Fahrzeug von anderen Verkehrsteilnehmern gut zu sehen. Des Weiteren werden andere darüber informiert, wie sich das Fahrzeug aktuell verhält bzw. verhalten wird.

Am Beispiel der Signalfunktionen wird schnell ersichtlich, dass im Straßenverkehr bereits mit Licht kommuniziert wird. Durch die verbauten Leuchten lassen sich verschiedene Nachrichten an andere Verkehrsteilnehmer übermitteln, wie in Abbildung 3.8: dargestellt.



Abbildung 3.8: Darstellung einer Heckleuchte. Zu erkennen sind die verschiedenen Signalfunktionen, u. A. Schlusslicht, Bremslicht, Fahrtrichtungsanzeiger [31].

Diese Nachrichten dienen anderen Verkehrsteilnehmern als Information, welche Manöver und damit verbundene Zustandsänderungen vom Fahrzeug in naher Zukunft zu erwarten sind. Bei aufleuchtenden Bremsleuchten verzögert das Fahrzeug und die Geschwindigkeit kann bis zum Stillstand verringert werden. Durch den Fahrtrichtungsanzeiger wird indiziert, dass das Fahrzeug abbiegen oder die Spur wechseln möchte.

Das Besondere an dieser Art der Kommunikation ist, dass andere Verkehrsteilnehmer die dadurch vermittelten Informationen sehr schnell erfassen und verstehen können. Auch ohne verkehrstechnische Erziehung, in beispielsweise Grund- oder Fahrschule, sind viele Verkehrsteilnehmer in der Lage, die Signale korrekt zu interpretieren. Da durch Farbe, Geometrie und Helligkeit unterscheidbar, ist die

Erscheinung der Signalfunktion eindeutig. Ein ausreichender Kontrast zur Umgebung gewährleistet in vielen Situationen die Erkennbarkeit auf große Entfernung.

Auf die Begrifflichkeiten der verschiedenen Kontraste wird in Kapitel 4.1 genauer eingegangen. Die folgende **Tabelle 3.2** gibt eine Übersicht der in der Heckleuchte verbauten Signalfunktionen. Die durch die einzelnen Signalfunktionen kommunizierte Nachricht wird hier bewusst aus Sicht des Fahrzeuges („Ich-Perspektive“) formuliert.

Tabelle 3.2: Übersicht der Signalfunktionen am Fahrzeug mit zugehöriger Nachricht

Signalfunktion	Nachricht	Kontrast
Schlusslicht	„Ich bin hier“	Ort, Farbe
Bremslicht	„Ich werden langsamer“ oder „Ich halte an“	Ort, Farbe, Zeit
Fahrtrichtungs- anzeiger	„Ich werde meine Richtung ändern“	Ort, Farbe, Zeit
Rückfahrlicht	„Achtung, ich fahre rückwärts (auf dich zu)“	Ort, Farbe
Nebelschluss- leuchte	„Ich bin (plötzlich) hier“	Ort, Farbe

Die Möglichkeit, bestehende lichttechnische Einrichtungen am Fahrzeug für weitere Nachrichten zu nutzen oder sogar neue Kommunikationsleuchten am Fahrzeug zu implementieren, wird durch viele verschiedene Forschungsarbeiten untersucht.

Nachfolgend wird ein kurzer Auszug über ausgewählte Forschungsvorhaben, die sich explizit mit dem Thema lichtbasierte Kommunikation am autonomen Fahrzeug befassen, gegeben.

3.3 ANDERE FORSCHUNGSVORHABEN

Das Thema lichtbasierte Kommunikation wurde beziehungsweise wird bereits ausführlich in anderen Forschungsvorhaben behandelt. Diesen Projekten ist überwiegend gemein, dass sie lichtbasierte Kommunikation zur Lösung einer spezifischen Problemstellung verwenden, zum Beispiel Kommunikation mit Fußgänger, der die Straße überqueren möchte, oder sie die Kommunikation unter idealisierten Bedingungen im Labor oder Simulator untersuchen.

Das Projekt „interACT“, welches im Jahr 2020 erfolgreich zum Abschluss kam, legt den Fokus auf die Entwicklung von Lösungen für eine sichere, kooperative und den Erwartungen entsprechende Interaktion zwischen automatisierten Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern sowie den Fahrern der AVs selbst [10]. Auf Grundlage bestehender Interaktion zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern sollen unter anderem Modelle abgeleitet werden, die eine Integration autonomer Fahrzeug in den Straßenverkehr problemlos ermöglichen. Dazu gehören auch die Kommunikationsaspekte mit anderen Verkehrsteilnehmern, die über neuartige Mensch-Maschine-Schnittstellen umgesetzt werden sollen.

Das Projekt „@CITY“ beschäftigt sich explizit mit dem automatisierten Fahren im urbanen Raum, vgl. Abbildung 3.9 [11].



Abbildung 3.9: Exemplarische Szene aus dem @City-Projekt, dass die Interaktion zwischen AV und Fußgänger an einem Fußgängerüberweg zeigt [11].

Dabei wird vor allem Wert auf Sicherheit, Effizienz und Komfort für alle Verkehrsteilnehmer gelegt. Es sollen neue automatisierte Fahr-funktionen für die Anwendung im innerstädtischen Bereich entwickelt werden, insbesondere für komplexe Verkehrsknotenpunkte unter Berücksichtigung aller potenziellen Teilnehmern.

Die Kommunikation des AVs mit dem Insassen steht dabei ebenfalls im Fokus. Die Entscheidungen, die das autonome Fahrzeug auf Grundlage verschiedener Informationsquellen trifft, sollen dem Insassen kontinuierlich übermittelt werden, um über die Fahrplanung

zu informieren und unnötige Nutzereingriffe zu vermeiden. Eine Insassenüberwachung findet nicht statt.

Aus diesem Grund darf der Insasse auf dem Fahrersitz, ehemals Fahrer, explizit nicht mit anderen Verkehrsteilnehmern über Gesten etc. kommunizieren. Eine gegensätzliche Kommunikation von Insasse und der Mensch-Maschine-Schnittstelle des autonomen Fahrzeuges wäre in bestimmten Situationen sogar sicherheitskritisch und ist daher unbedingt zu verhindern.

Kapitel 4

METHODIK

In diesem Kapitel werden die methodischen Ansätze vorgestellt, die für die weitere Bearbeitung Anwendung finden. Dabei sollen zunächst notwendige Begrifflichkeiten eingeführt und die Notwendigkeit der Kommunikation im Straßenverkehr begründet werden. Daran anschließend erfolgt die Formulierung der Problemstellung, die sich durch die Einführung autonomer Fahrzeuge in den Straßenverkehr ergibt. Bezugnehmend auf § 11 Abs. 3 StVO erfolgt sodann eine Beschreibung besonderer Verkehrslagen in Form von Pattsituationen.

Es werden konkrete Situation aus dem Straßenverkehr angeführt, die im nächsten Kapitel Anwendung finden. Nach einer Betrachtung der Robustheit der Kommunikation und der Frage was passiert, wenn es zu viel Kommunikation bzw. Information innerhalb einer Situation gibt, schließt das Kapitel mit einer Übersicht zur Farbe „Cyan“ als Markierung bzw. Statusanzeige des autonomen Fahrstatus automatisierter Fahrzeuge.

4.1 BEGRIFFLICHKEITEN

Damit eine mit Licht codierte Information überhaupt durch einen Beobachter wahrnehmbar ist, müssen bestimmte Kriterien erfüllt sein. Die Information muss sich eindeutig von der Umgebung abheben, sodass ein Erkennen und Verarbeiten möglich ist. Der in Kapitel 2.4.1 eingeführte Kontrast beschreibt einen Leuchtdichtenunterschied zweier leuchtender Flächen. Diese können sowohl beleuchtet als auch selbstleuchtend sein.

Für die folgende Verwendung wird der Begriff des Kontrastes noch erweitert, um die für die Wahrnehmung notwendigen Voraussetzungen besser erklären zu können.

Der zuvor eingeführte Kontrast, beschreibbar durch beispielsweise Weber oder Michelson, wird im Folgenden als **örtlicher Kontrast** bezeichnet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Kontrast durch einen Leuchtdichteunterschied zweier räumlich getrennter Flächen zustande kommt. Diese sind stets benachbart, können jedoch eine unterschiedliche Ausdehnung aufweisen. Der Kontrast ist zu einem festen Zeitpunkt sichtbar. Beispiele für einen örtlichen Kontrast sind Leuchtende Piktogramme auf einheitlichem Hintergrund oder die Streifen eines Fußgängerüberwegs, zu sehen in Abbildung 4.10.



Abbildung 4.10: Kontrast an einem Fußgängerüberweg durch weiße Streifen auf dunklem Asphalt [32].

Weiter ist es möglich, einen Kontrast über die Variation der Leuchtdichte über die Zeit zu erzeugen. Dieser wird nachfolgend als **zeitlicher Kontrast** bezeichnet. Der Kontrast ist über der Zeitachse sichtbar, was beispielsweise in Animationen Anwendung findet.

Der letzte zu nennende Kontrast ist der sogenannte **Farbkontrast**. Dieser entsteht durch Verwendung zweier Flächen unterschiedlicher Farbe. Durch den Schweizer Kunsthistoriker Johannes Itten wurden insgesamt sieben unterschiedliche Farbkontraste definiert, die die jeweiligen Eigenschaften des Farbkontrastes noch einmal genauer unterscheiden [33]. So zum Beispiel der Komplementärkontrast, der Quantitätskontrast und der Buntkontrast.

Für die weitere Beschreibung ist diese Feinunterscheidung jedoch nicht notwendig und es genügt die eingangs gegebene Definition. Beispiele für einen Farbkontrast finden sich in der Anwendung bei sogenannten Sicherheitszeichen, wie zu sehen in Abbildung 4.11 zu finden in der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A1.3 [34].



Abbildung 4.11: Sicherheitszeichen Rettungsweg/Notausgang mit Richtungspfeil. Durch die Verwendung eines Farbkontrastes mit Weiß auf Grün ist dieses weithin gut sichtbar [34].

Ebenso ist die Kombination zweier oder aller Kontrastarten denkbar, um einen gut wahrnehmbaren Reiz zu erzeugen.

Diese Reize, in Form von Signalen oder bildhaften Darstellung, sind im weiteren Verlauf nutzbar, um eine wahrnehmbare Kommunikation mit Licht zu gestalten. Die Frage, warum Kommunikation

überhaupt notwendig ist und wie dies zur Problemstellung führt, wird in den kommenden Abschnitten behandelt.

4.2 FORMULIERUNG DER PROBLEMSTELLUNG

Kommunikation ist, wie bereits angesprochen, ein wichtiger Bestandteil des Straßenverkehrs (vergleiche Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2). Diese beschränkt sich nicht nur auf die in § 11 Abs. 3 StVO beschriebenen besonderen Verkehrslagen, sondern allgemein auf beliebige Interaktionen im Straßenverkehr.

Kommunikation wird auch weiterhin ein wichtiger Bestandteil im Verkehrsgeschehen bleiben. Durch die in der StVO geforderte gegenseitige Rücksichtnahme und einem Verhalten, dass andere weder schädigt noch gefährdet, ist die Kommunikation fest im Straßenverkehr verankert. Ohne beispielsweise die Manöverankündigung durch die Fahrtrichtungsanzeiger oder die Bremsleuchten, wären Gefahrensituationen im Straßenverkehr deutlich häufiger, da diese Informationen für die eigene Manöverplanung essenziell sind.

Was sich allerdings zukünftig ein Stück weit verändern wird, ist der Empfänger bzw. der Sender mit dem kommuniziert wird. Auch die Verantwortlichkeiten, genauer gesagt die Beziehung zwischen Fahrzeugführendem und Fahrzeug, wird sich in Teilen verändern.

Im bisherigen Verkehrsgeschehen ist stets eindeutig gewesen, dass die Person am Lenkrad eines Fahrzeuges dieses auch führt. Somit ist

diese fahrzeugführende Person auch für die Kommunikation verantwortlich bzw. wird als Kommunikationspartner wahrgenommen.

Mit der Einführung autonomer Fahrzeuge ist diese Eindeutigkeit nicht mehr in jeder Situation gegeben. Zwar kann sich an der Fahrerposition weiterhin eine Person befinden, diese ist nun allerdings nicht mehr zwangsläufig für die Fahrmanöver und das Verhalten des Fahrzeuges verantwortlich.

Die Person könnte am Lesen und ihre Aufmerksamkeit im Fahrzeuginnenraum sein, beispielhaft zu sehen in Abbildung 4.12.



Abbildung 4.12: Die Aufmerksamkeit der Person im autonomen befindet sich nicht mehr zwangsläufig im Außenraum, sondern bspw. auf dem Smartphone [35].

Weitaus ungünstiger gestaltet sich jedoch die Situation, wenn die Aufmerksamkeit im Außenraum ist und die Person von anderen

Verkehrsteilnehmern als offensichtlicher Fahrer wahrgenommen wird. Es wird eine Kommunikation erwartet, die nicht stattfindet, da die Maschine das Fahrzeug führt.

Aus diesem Grund ist es notwendig, eine Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Mensch und Maschine zu schaffen. Die Maschine muss im Mischverkehr die Kommunikation übernehmen und in Interaktion mit anderen, nicht autonomen Verkehrsteilnehmern treten. Dies soll helfen, Missverständnisse zu vermeiden, Problemsituationen zu lösen und kann einen Beitrag zur Aufrechterhaltung oder sogar Steigerung des Verkehrsflusses leisten.

Die Kommunikation muss wahrnehmbar und verständlich sein. Sie soll unabhängig von äußeren Gegebenheiten wie Tageszeit oder Witterung funktionieren. Funktionieren bedeutet in diesem Fall, dass die Information möglichst unverfälscht den Empfänger erreicht und bei diesem die vorgesehene Reaktion auslöst.

Zur Ableitung von Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle werden in Kapitel 5 verschiedene Ausführungen untersucht und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit als HMI-System evaluiert.

Die in § 11 Abs. 3 StVO beschriebenen besonderen Verkehrslagen werden häufig auch als Pattsituationen bezeichnet. Was unter einer Pattsituation zu verstehen ist und was diese charakterisiert, behandelt der folgende Abschnitts.

4.3 PATTSITUATION

Zunächst erfolgt die Definition und Beschreibung einer sogenannten Pattsituation. Dies dient als Grundlage für spätere Kapitel, in denen eine Pattsituation im Straßenverkehr die Ausgangslage für lichtbasierte Kommunikation ist. Die Notwendigkeit der Kommunikation im Straßenverkehr wurde bereits in mehreren Forschungsarbeiten untersucht und wird auch von der Straßenverkehrs-Ordnung gefordert.

4.3.1 DIE 5 PHASEN EINER PATTSITUATION

Jede Pattsituation lässt sich in unterschiedliche Phasen unterteilen. Die Dauer und Erscheinung jeder Phase können dabei in Abhängigkeit der jeweiligen Situation variieren. Die Phasen ergeben sich aus Beobachtung und Beschreibung verschiedener Situationen im Straßenverkehr. Die fünf Phasen werden wie folgt definiert:

- Entstehung
- Erkennung
- Verhandlung
- Reaktion
- Auflösung

Diese Phasen werden nacheinander durchlaufen, sodass diese als Abfolge anzusehen sind. Je nach Ausgangssituation im Straßenverkehr und Verhalten der jeweiligen Verkehrsteilnehmer ist es jedoch auch möglich, dass bestimmte Phasen sich wiederholen, bis eine Auflösung des Patts erreicht wird.

Die folgende Abbildung 4.13 stellt die fünf Phasen sowie deren Zusammenhang und Abfolge vorab grafisch dar.

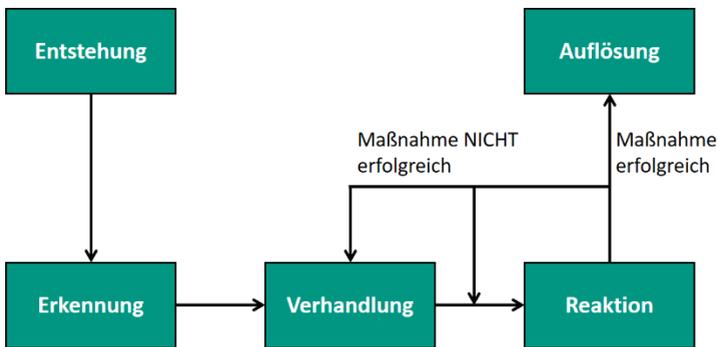


Abbildung 4.13: Ablauf der fünf Phasen einer Pattsituation von Entstehung bis Auflösung. Im Falle nicht erfolgreicher Maßnahmen können mehrere Iterationsschritte bis zur Auflösung durchlaufen werden.

- i. **Entstehung:** Während der Entstehung einer Pattsituation ist deren unmittelbares Bevorstehen den Teilnehmern noch nicht bewusst. Diese führen ihr geplantes Vorhaben unabhängig der äußeren Rahmenbedingungen durch. Durch zeitliche oder örtliche Gegebenheiten ist eine Durchführung des geplanten Vorhabens aber nicht mehr länger möglich. Der Vorgang kommt zum Erliegen.

- ii. **Erkennung:** Während dieser Phase entsteht bei allen Teilnehmern der Situation das Bewusstsein, dass das jeweilige, bisher geplante Manöver nicht durchgeführt werden kann. Diese Erkennung kann sowohl bei einem Menschen, als auch bei einer Maschine stattfinden. Die Erkennung des Vorhandenseins einer Pattsituation ist Grundlage für die nächste Phase.

- iii. **Verhandlung:** In dieser Phase versuchen ein oder mehrere Teilnehmer der Situation diese durch Interaktion und Verständigung zu lösen. Es ist notwendig, dass mindestens ein Teilnehmer von seinem bisher geplanten Manöver abweicht und zu Gunsten der anderen Teilnehmer verzichtet. Dieser Verzicht ist nun den anderen Teilnehmern mitzuteilen, d.h. zu kommunizieren. Ebenfalls ist es jedoch auch möglich, dass einer der Teilnehmer einfach losfährt und sich somit die Vorfahrt nimmt. In diesem Fall wäre der Patt ebenfalls aufgelöst.

- iv. **Reaktion:** In der Reaktionsphase wird das Ergebnis der Verhandlung den anderen Teilnehmern angezeigt bzw. dessen Durchführung eingeleitet. Anhand dieser Reaktion wird ersichtlich, ob die Maßnahmen erfolgreich und geeignet sind, die Pattsituation aufzulösen. Hierbei gibt es drei mögliche Optionen, zwischen denen unterschieden wird:
 - a. Die Verhandlung war NICHT erfolgreich, eine neue Möglichkeit zur Auflösung muss durch einen oder mehrere Teilnehmer gefunden werden.

- b. Die Reaktion war NICHT erfolgreich. Das Ergebnis der Verhandlung stellt zwar eine geeignete Möglichkeit zur Auflösung des Patts dar, die Reaktion kann/wird jedoch nicht durch die anderen Beteiligten aufgefasst und verstanden.
- c. Die in Verhandlung und Reaktion getroffenen Maßnahmen waren erfolgreich und führen die Pattsituation in die letzte Phase.
- v. **Auflösung:** Die letzte Phase einer Pattsituation ist die Auflösung. Alle Teilnehmer können ihr neu geplantes Manöver weiter ausführen.

Zur Verdeutlichung der zuvor vorgestellten Phasen einer Pattsituation wird im Folgenden eine beispielhafte Szene aus dem Straßenverkehr dargestellt.

Es handelt sich um eine, wie in Abbildung 4.14 dargestellte, unregelte Kreuzung im Verkehrsraum mit vier Wegen.

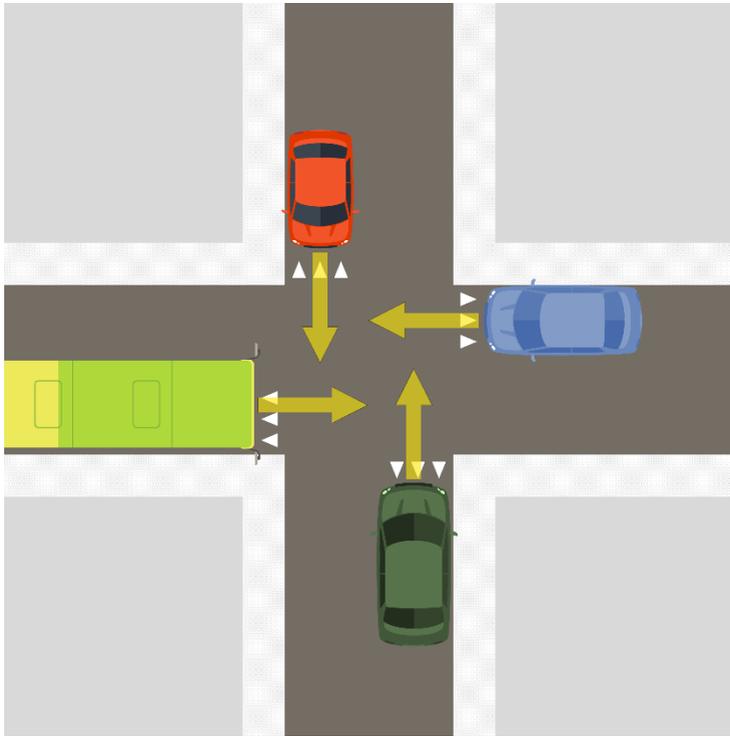


Abbildung 4.14: Ungeregelte Kreuzung mit vier Wegen. Jeder Verkehrsteilnehmer ist gleichberechtigt hinsichtlich der geltenden Vorfahrtsregeln.

Ungeregelt bedeutet hier, dass der Verkehrsfluss nicht durch zusätzliche Verkehrszeichen oder Lichtzeichenanlagen geregelt ist. Die allgemeine Vorfahrtsregel nach § 8 Abs. 1 StVO besagt, dass derjenige Verkehrsteilnehmer Vorfahrt hat, der von rechts kommt. Kommen nun allerdings aus allen vier Richtungen gleichzeitig Verkehrsteilnehmer, die die Kreuzung geradeaus passieren möchten, so wird eine

Pattsituation entstehen. Die Beteiligten erkennen dies und verlangsamen bis zum Stillstand. Diese Art des Stillstandes, der durch bestehende Regeln und Routinen nicht auflösbar ist, wird in der Informatik auch Deadlock genannt. Ein externer Trigger ist notwendig, um diesen Deadlock zu lösen.

Am Beispiel des Straßenverkehrs könnte dies ein Verkehrsteilnehmer sein, der auf seine Vorfahrt verzichtet und diese einem anderen überlässt. Diesen Verzicht würde er durch Gesten oder das Betätigen der Lichthupe seines Fahrzeuges anzeigen. Die anderen Verkehrsteilnehmer können dann sukzessive beginnen los zu fahren und die Kreuzung zu räumen, bis der Verzichtende selbst seine Fahrt fortsetzen kann. Die Maßnahme war erfolgreich.

Wird die Anzeige des Verzichts allerdings nicht durch die anderen Beteiligten verstanden, wäre die Maßnahme nicht erfolgreich und die Verhandlung müsste erneut stattfinden.

Im Folgenden werden weitere Szenen aus dem Straßenverkehr vorgestellt, die für die weitere Bearbeitung im Rahmen von Untersuchungen Anwendung finden.

4.4 SZENEN AUS DEM STRASSENVERKEHR ZUR BEARBEITUNG

Für die weitere Bearbeitung werden deshalb exemplarische Szenen aus dem Straßenverkehr ausgewählt, anhand derer die Problem-

stellung aufgezeigt und potenzielle Lösungsansätze untersucht werden können.

Es handelt sich dabei um Szenen aus dem urbanen Straßenverkehr. Diese Eingrenzung auf den innerstädtischen Verkehrsraum erfolgt aus diversen Gründen.

Nach § 3 Abs. 3 Satz 1 StVO gilt, sofern nicht extra geregelt, dass die Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeuges 50 km/h nicht überschreiten darf [14]. In dicht besiedelten Wohngebieten, vor Schulen, Altenheimen etc. kann diese Höchstgeschwindigkeit weiter begrenzt werden, z.B. auf 30 km/h oder sogar auf Schrittgeschwindigkeit in verkehrsberuhigten Bereichen. Bereits heute werden in immer mehr Städten und Gemeinden Verkehrswege auf Tempo-30-Zonen umgestellt. Dies geschieht aus diversen Gründen, zum einen aus Lärmschutzgründen, aber auch aus Gründen der Verkehrssicherheit [36], [37]. Eine Verringerung des Durchsatzes ist dadurch nicht absehbar.

Es ist daher zu erwarten, dass sich im innerstädtischen Gebiet eine Geschwindigkeit von 30 km/h als neuer Standard etablieren wird. Aus diesem Grund wird für die weitere Betrachtung innerstädtischer, dynamischer Szenen eine Bewegungsgeschwindigkeit von maximal 30 km/h angenommen.

Bei einer Fahrt mit 30 km/h wird pro Sekunde eine Strecke von ca. 8,33 m zurückgelegt. Üblicherweise beträgt der Abstand zum vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer ca. 1-2 s [38]. Die StVO sieht, zumindest für Pkw, keinen definierten Mindestabstand vor. In § 4 Abs. 1 StVO heißt es lediglich, dass der Abstand ausreichend groß

gewählt sein muss, dass im Falle eines plötzlichen Bremsvorgangs dahinter gehalten werden kann [15].

Die 1-2 s Regelung hat sich in der Praxis etabliert, da ein Fahrzeug im Falle einer plötzlichen Bremsung noch ausreichend Zeit hat, um zum Stillstand zu kommen. Bei Annahme dieser Zeiten ergibt sich eine Strecke von ~8,5-20 m zwischen zwei Fahrzeugen, auf denen kommuniziert werden kann. Für folgende Betrachtungen werden daher 20 m als maximale Distanz zwischen Sender und Empfänger angenommen, die Dauer einer Nachricht entsprechend auf maximal 2 s limitiert.

4.4.1 DYNAMISCHE SZENEN

Für die Betrachtung einer dynamischen Szene wird eine Straße mit Fußgängerüberweg herangezogen. Diese bietet den Vorteil, dass aufgrund der Geometrie das kommunizierende Fahrzeug bereits von weitem erkennbar ist und auch lichttechnische Darstellungen mit zeitlicher Abfolge, im Folgenden Animation genannt, untersuchbar sind.

Das Fahrzeug fährt von der linken Seite an und kann einen Fußgänger adressieren, der sich am Fußgängerüberweg befindet, vgl. Abbildung 4.15.

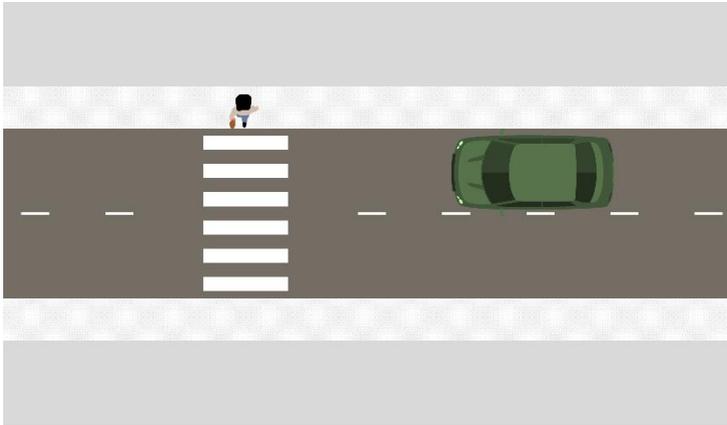


Abbildung 4.15: Gerade Straße, an der ein Passant am Fußgängerüberweg wartet und diese überqueren möchte.

Fahrzeuge müssen nach § 26 Abs. 1 StVO Fußgängern oder Fahrern von Roll-/Krankenfahrstühlen mit erkennbarer Querungsintention das gefahrlose Überqueren ermöglichen [39]. Sie dürfen nur mit reduzierter Geschwindigkeit an den Fußgängerüberweg anfahren und müssen, wenn notwendig, davor anhalten.

Insofern ist die Verkehrslage hier stets eindeutig geregelt und eine Pattsituation unwahrscheinlich. Dennoch bietet diese Szene ein hohes Potenzial für den Einsatz einer lichtbasierten Kommunikation. Ein überwiegender Anteil der Personen, die an einem FGÜ warten und diesen überqueren möchten, suchen vor der Überquerung den Kontakt zu einem sich nähernden Fahrzeug [40]. Durch die Anzeige vorab, dass das Fahrzeug den Wartenden erkannt hat und passieren lässt, kann eine Zeitersparnis und eine Aufrechterhaltung des

Verkehrsflusses erreicht werden. Des Weiteren ist diese Maßnahme geeignet, das Vertrauen in autonome Fahrzeuge zu steigern.

4.4.2 STATISCHE SZENEN

Für die Betrachtung einer statischen Szene wird eine Vorfahrtsstraße mit einmündender Seitenstraße genutzt. Durch die Regelung der StVO hat der sich auf dieser Straße befindliche Verkehrsteilnehmer, zu sehen in Abbildung 4.16, auch dann vor anderen Vorfahrt, wenn dieser abbiegt, sofern kein Gegenverkehr vorhanden ist.

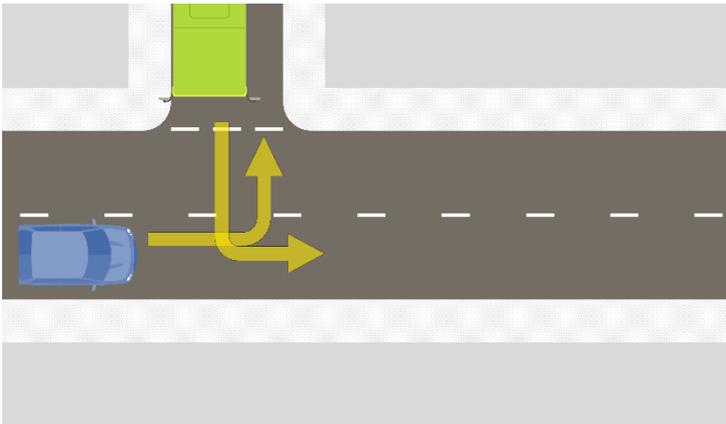


Abbildung 4.16: Vorfahrtsstraße mit einmündender Seitenstraße. Der von rechts kommende Verkehrsteilnehmer hat auch beim Abbiegevorgang Vorfahrt.

Befindet sich in dieser, meist engeren, Seitenstraße nun ein größeres Fahrzeug, wie ein Bus oder Abfallsammelfahrzeug, oder die Straße ist durch beidseitig parkende Fahrzeuge verengt, kann das Einfahren aufgrund der Platzverhältnisse erschwert sein.

Ein Verzicht auf die eigene Vorfahrt zu Gunsten des in der Seitenstraße wartenden Fahrzeuges löst diese Problemsituation. Dieser Verzicht muss ebenfalls kommuniziert werden.

Damit eine Kommunikation die Problemsituation allerdings lösen kann, muss diese vor allem wahrnehmbar und robust gegen äußere Einflüsse sein. Diese Robustheit verhindert, dass der Inhalt einer Nachricht verändert oder gänzlich verloren geht.

4.5 ROBUSTHEIT DER KOMMUNIKATION

Voraussetzung für die erfolgreiche Auflösung einer besonderen Verkehrslage ist, dass die Kommunikation zur Lösung die adressierten Empfänger erreicht. Die Kommunikation kann durch eine Störung beeinflusst und die Nachricht somit unvollständig, verfälscht oder gar nicht den Empfänger erreichen. Störungen können sowohl technische Defekte als auch umweltbedingt sein. Im Folgenden wird zwischen drei Arten der Störung unterschieden.

4.5.1 STÖRUNG DES SENDERS

Faktoren, die das Senden einer Nachricht erschweren, verfälschen oder gänzlich verhindern, werden unter dem Begriff Störung des Senders zusammengefasst. Die korrekte Erfassung durch einen Empfänger ist nicht möglich.

Senderseitige Störungen können beispielsweise technische Defekte des Sendegerätes sein, wie der Ausfall eines Scheinwerfers. Weiterhin sind auch Umwelteinflüsse, die den Empfang einer Nachricht erschweren oder verhindern dieser Kategorie zuzuordnen. Durch Sonnenlicht verursachte Reflexionen auf der Windschutzscheibe, zu sehen in Abbildung 4.17, überstrahlen den im Fahrzeug befindlichen Insassen. Gesten, die der Fahrer an einen anderen Teilnehmer adressieren möchte, sind nicht mehr erkennbar.



Abbildung 4.17: Störung des Senders verursacht durch Reflexionen auf der Windschutzscheibe eines Fahrzeuges. Durch den Insassen getätigte Gesten dringen nicht mehr sichtbar nach außen.

Auch Reflexionen auf lichttechnischen Einrichtungen am Fahrzeug, wie Scheinwerfer oder pixelbasierten Anzeigen (vgl. Kapitel 5.2, auch Phantomlicht genannt) oder Verschmutzung dieser, stellen eine Störung des Senders dar, die das Erkennen der Nachricht beeinträchtigen oder verhindern.

Bei der Auslegung der Kommunikation sind diese Störungen zu berücksichtigen und Maßnahmen zu treffen, um den Einfluss der Störung zu reduzieren.

4.5.2 STÖRUNG DES KANALS

Als Störung des Kanals werden alle Einflüsse bezeichnet, die den Übertragungsweg zwischen Sender und Empfänger betreffen. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Objekte, die die Sicht auf den Sender bzw. das Sendegerät versperren. Dies können sowohl statische Objekte, wie stehende und/oder parkende Fahrzeuge oder ortsfeste Bebauung, als auch dynamische Objekte, wie der fließende Verkehr sein, vgl. Abbildung 4.18. Auch Witterung, wie Nebel oder Schneefall stellen eine Störung des Kanals dar.



Abbildung 4.18: Störung des Kanals verursacht durch ein vorbeifahrendes Fahrzeug. Dies verursacht eine kurzzeitige, aber vollständige Verdeckung des kommunizierenden Fahrzeuges.

Durch diese Störungen ist eine teilweise bis vollständige Verdeckung oder Verfälschung der Nachricht möglich.

Die Störung des Kanals kann bei der Auslegung der Kommunikationseinrichtung, beispielsweise durch eine geschickte Anbauposition, berücksichtigt werden.

4.5.3 STÖRUNG DES EMPFÄNGERS

Die letzte Art der Störung bezieht sich auf den Empfänger, an den die Nachricht adressiert ist. Da für diese Arbeit ausschließlich die Kommunikation mit einem menschlichen Empfänger betrachtet wird, sind technische Empfänger, vor allem Kameras, nicht von Interesse.

Eine Störung des menschlichen Empfängers bezeichnet Einflüsse, die das Wahrnehmen der Nachricht erschweren oder verhindern. Hier ist die Verschmutzung der Windschutzscheibe, vgl. Abbildung 4.19, ein praxisrelevantes Beispiel.



Abbildung 4.19: Störung des Empfängers durch Schmutz auf der Windschutzscheibe.

Ist durch eine robuste Auslegung der Kommunikation sichergestellt, dass die Nachricht den Empfänger erreicht, kann mit diesem kommuniziert werden. Es sei erwähnt, dass hier mehrere verschiedene Kommunikationsformen möglich sind.

Möchte zum Beispiel ein Sender mit einem bestimmten Empfänger kommunizieren, wird dies als Unicast bezeichnet, die Kommunikation mit mehreren bestimmten Empfängern als Multicast und ein Aussenden einer Nachricht an alle vorhandenen Empfänger als Broadcast.

Ebenso ist es weiterhin möglich, dass mehrere Sender gleichzeitig gezielt (adressiert) oder unbeabsichtigt einen Empfänger ansprechen.

Das unbeabsichtigte Ansprechen eines Empfängers wird in der Nachrichtentechnik als Übersprechen bezeichnet.

Mögliche resultierende Auswirkungen sind Ablenkung oder eine Informationsüberflutung.

4.6 INFORMATIONSÜBERFLUTUNG

Von einer Informationsüberflutung oder -flut wird gesprochen, wenn sehr viele Informationen oder Eindrücke gleichzeitig oder kurz nacheinander auf eine Person bzw. Empfänger eintreffen [41], [42]. Eine von George A. Miller in den 1950er-Jahren durchgeführte Studie kommt zu dem Ergebnis, dass das menschliche Gehirn im Schnitt bis zu sieben Informationen gleichzeitig aufnehmen und verarbeiten kann [43]. Aktuelle Forschung geht mittlerweile allerdings von geringeren Zahlen aus [44].

Dies ist bei der Auslegung einer lichtbasierten Kommunikation zu berücksichtigen. Bei der Annahme, dass im zukünftigen autonomen Mischverkehr mehrere Autos gleichzeitig versuchen mit unterschiedlichen oder denselben Empfängern zu kommunizieren, kann dies in einer Informationsflut resultieren.

Zur Verdeutlichung kann beispielhaft eine Szene des New Yorker Time Square angeführt werden, vgl. Abbildung 4.20.



Abbildung 4.20: Szene des Time Square in New York City. Durch sehr viel Reklame und Werbeanzeigen herrscht eine Informationsüberflutung. Die Information der einzelnen Anzeigen gehen in der Fülle der Anzeigen unter [45].

Dies stellt sehr gut dar, was eine Fülle an Informationen und Reizen bewirken kann. Eine Information, die vielleicht wichtig für die Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses oder ähnlichem wichtig wäre, geht unter anderen Informationen unter. Diese anderen, verzichtbaren Informationen können beispielsweise die Anzeige von Temperaturen unter 4 °C oder ein „Bedanken“ sein.

Es ist daher wichtig darauf zu achten, welche Informationen bzw. Nachrichten tatsächlich zu kommunizieren sind und wie diese gestaltet sein sollten. Um eine Überflutung zu meiden sollten Signale nur in notwendigen Situationen abgegeben und dann einfach und intuitiv erfassbar sein.

4.7 CYAN NACH SAE J3134

Die SAE International, ehemals Society of Automotive Engineers, entschied auf Grundlage diverser vorheriger Studien, dass autonome Fahrzeuge zukünftig durch ein farbiges Markierungslicht gekennzeichnet sein sollen [46]. Die Empfehlung J3134 schlägt für dieses Markierungslicht die Farbe Cyan vor.

Cyan unterscheidet sich von allen bisher im KFZ verwendeten Signalfarben und erweist sich als leicht erkennbar.

Da die meisten Bereiche des Farbdigramms bereits für andere Lichtfunktionen reserviert sind, Rot für Heckleuchten, Blau für die Kennleuchten von Einsatzfahrzeugen, ergab sich Cyan, da dieser Bereich bisher noch nicht belegt ist.

Die SAE definierte darauf den in Abbildung 4.21 eingezeichneten Bereich als zulässig für die Gestaltung eines Markierungslichtes für Fahrzeuge im autonomen Fahrmodus.

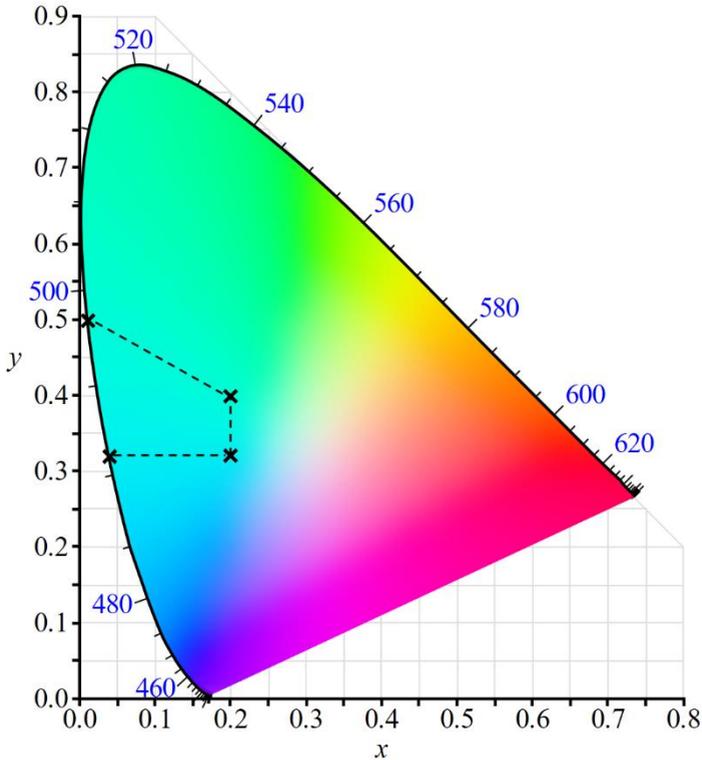


Abbildung 4.21: CIE Normfarbtafel mit eingezeichnetem Gamut für Cyan gemäß SAE.

Seit der Veröffentlichung der J3134 wird Cyan daher in weiten Teilen der Welt als „Farbe autonomer Fahrzeuge“ angesehen und bevorzugt in Untersuchungen verwendet [47], [48], [49]. Dabei ist die Verwendung von Cyan nicht ausschließlich darauf beschränkt, den autonomen Fahrmodus anzuzeigen, sondern wird ebenfalls als Kommunikationsfarbe bei autonomen Fahrzeugen genutzt.

So erfolgt die Darstellung von Inhalten auf den verschiedensten HMI-Systemen, wie beispielsweise auf Displays oder Lichtbändern häufig in Cyan, um den autonomen Charakter des kommunizierenden Fahrzeuges noch einmal hervorzuheben.

Im folgenden Kapitel werden vier unterschiedliche HMI-Systeme betrachtet und hinsichtlich ihrer Verwendung im autonomen Mischverkehr untersucht.

Kapitel 5

UNTERSUCHUNG HMI-SYSTEME

Im Rahmen dieses Kapitel werden eigene, experimentelle Untersuchungen an HMI-Systemen präsentiert.

5.1 SYMBOLPROJEKTION

Durch die stetige Entwicklung im Bereich der Scheinwerfer gibt es Stand heute serienmäßig Scheinwerfer auf LED-Basis (Light Emitting Diode – LED) als sogenannte Matrix-Scheinwerfer. Der Lichtstrom wird nicht mehr durch eine einzelne Lichtquelle erzeugt und über Optiken als Lichtverteilung auf die Straße projiziert, sondern vielmehr wird diese aus mehreren, räumliche getrennten LED-Chips erzeugt, zusammengesetzt und dann über eine Optik auf die Straße projiziert [50], [51].

Mit der Verwendung von Scheinwerfern mit mehreren 100-1000 Einzelchips, im Folgenden als Pixel bezeichnet, sind nicht nur standardmäßige Lichtfunktionen, wie Abblendlicht oder Fernlicht erzeugbar. Bei der dynamischen Ansteuerung lassen sich an die Situation angepasste Lichtfunktionen erzeugen, sogenannte adaptive Lichtfunktionen [52]. In Verbindung mit einem Kamera-System können andere Verkehrsteilnehmer detektiert und aus der Lichtverteilung

ausgeblendet werden. Dies ermöglicht ein dauerhaftes Fahren mit Fernlicht, ohne andere zu Blenden und erhöht somit die Sicherheit im Straßenverkehr [53].

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Scheinwerfer mit höherer Auflösung zu nutzen, um den Fahrer bei seiner Aufgabe zu unterstützen. Es konnte bereits in mehreren Arbeiten gezeigt werden, dass experimentelle Lichtfunktionen mit höherer Auflösung den Fahrer unterstützen und dadurch ein erhöhtes Sicherheitsgefühl erzielt werden konnte [54], [55].

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, nicht nur mit dem Fahrer zu kommunizieren, sondern auch andere Verkehrsteilnehmer anzusprechen. Somit könnten diesen Informationen zur Verfügung gestellt werden, die das Fahrzeug mit seiner Sensorik erfasst hat [55], [56].

Von übergeordneter Bedeutung ist jedoch die Kommunikation in sicherheitskritischen Situationen, in denen eine unmittelbare Gefahr auftreten kann. Als Beispiel wird hier die Überquerung der Straße angeführt.

Ein VRU möchte die Straße an einer Stelle ohne Fußgängerüberqueren. Von links nähert sich ein autonomes Fahrzeug, das den Fußgänger und dessen Intention zur queren erkennt. Das Fahrzeug kann sich nun entscheiden, die Geschwindigkeit zu reduzieren und den Fußgänger überqueren zu lassen oder dies nicht zu tun und die Fahrt fortzusetzen. Beide Entscheidungen sollen über die Projektion eines Symbols im Sichtbereich des Fußgängers kommuniziert werden. Dieses Szenario wird im Rahmen einer Probandenstudie untersucht.

5.1.1 STUDIENDESIGN

Die Studie wird als statische Probandenstudie im Lichtkanal des Lichttechnischen Instituts durchgeführt, was eine Untersuchung unter kontrollierbaren Bedingungen erlaubt. Untersuchungsgegenstand sind dabei die projizierten Symbole, die die Entscheidung des autonomen Fahrzeuges an den Probanden kommunizieren.

Es soll untersucht werden, ob es bestehende, bekannte Symbole gibt, die den Probanden, ohne vorherige Instruktion über deren Bedeutung, zu der angedachten Reaktion führen können.

Als mögliche Reaktion ist vorgesehen, dass der Proband entweder losläuft und die Straße vor dem autonomen Fahrzeug überquert oder stehen bleibt und wartet, bis das autonome Fahrzeuge vorbeigefahren ist. Somit müssen Nachrichten aus zwei Kategorien dargeboten werden, nämlich „Du kannst passieren“ – GEHEN/GO und „Du kannst nicht passieren“ – STEHEN/STOP.

Die Probandenstudie soll eine Situation aus dem innerstädtischen Bereich nachstellen. Da an größeren Straßen mit großer Frequentierung eine Fahrbahnüberquerung ohne FGÜ oder Lichtzeichenanlage (LZA) eher unwahrscheinlich ist, soll die Situation eine Zone 30 nachempfinden. Bei Annahme einer Maximalgeschwindigkeit von $v_{max} = 30 \text{ km/h}$ ergibt sich daher ein Anhalteweg von ca. 10 m. Das Symbol wird in einer Entfernung von 10 m vor dem Fahrzeug auf die Fahrbahn projiziert. Würde der Fußgänger das STOP-Symbol falsch interpretieren und auf die Straße laufen, so hätte das autonome Fahrzeug

noch eine ausreichend große Strecke, um sicher zum Stillstand zu kommen.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.22 dargestellt. Auf der linken Seite des Probanden steht ein Fahrzeug mit eingeschaltetem Abblendlicht. Dieses soll in der Realität, ein sich annäherndes Fahrzeug darstellen. Die Distanz von 10 m erstreckt sich von der Front des Versuchsträgers bis zum Mittelpunkt des projizierten Symbols, welches sich direkt vor dem Probanden befindet.

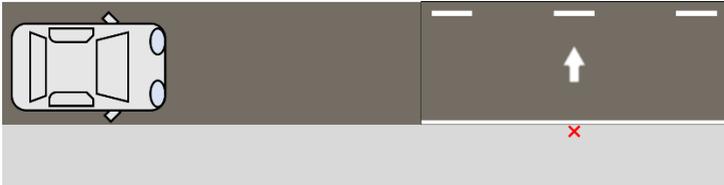


Abbildung 5.22: Exemplarische Darstellung des statischen Versuchsaufbaus. Auf der linken Seite befindet sich das projizierende Fahrzeug, rechts der Proband (x) in dessen Sichtbereich sich das projizierte Symbol befindet.

Da bei der Studie zunächst nicht die Erkennbarkeit, sondern die Aussagekraft der Symbole untersucht wird, werden diese für die Durchführung so hell projiziert, dass der Proband sie eindeutig erkennen kann.

Die Größe der Symbole wird mit einer maximalen Kantenlänge von 1,50 m x 1,50 m festgelegt. Die Leuchtdichte des Symbols L_S ergibt sich aus der Überlagerung der maximalen Helligkeitsstufe des

Videoprojektors sowie den Leuchtdichten durch die Abblendlichtverteilung des Fahrzeuges und der Umfeldbeleuchtung. Die Projektionseinheit ist an der Decke montiert, da das verwendete Versuchsfahrzeug über keinen Projektor verfügt.

Eine schematische Darstellung der Größe sowie eine Leuchtdichteaufnahme des Symbols sind Abbildung 5.23 sowie Abbildung 5.24 zu entnehmen.

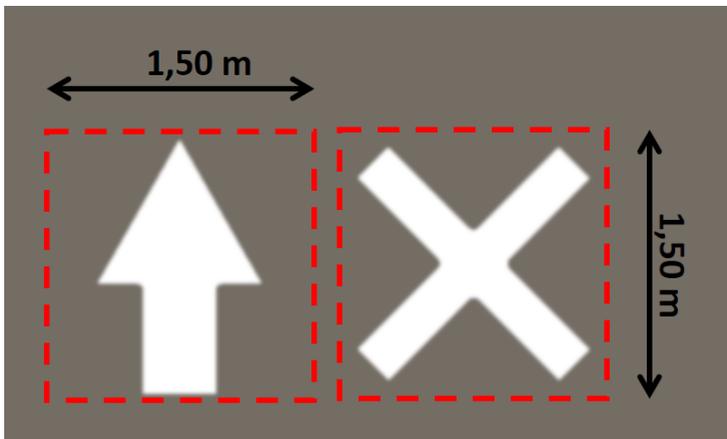


Abbildung 5.23: Die Größe eines Symbols wird so eingestellt, dass dessen maximale Ausdehnung ein umschließendes Quadrat mit Kantenlänge 1,50 m berührt.

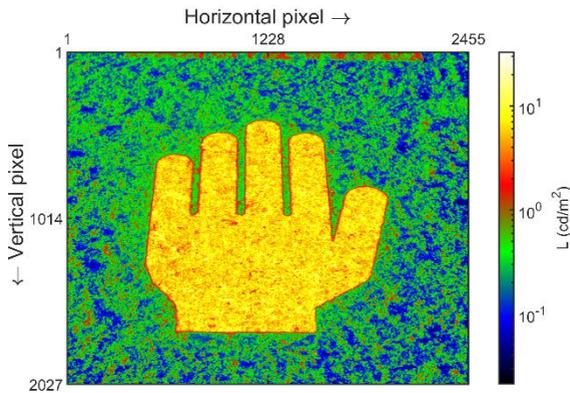


Abbildung 5.24: Leuchtdichteaufnahme des projizierten Symbols in der Versuchsumgebung.

Zusätzlich zu den Symbolen aus den Kategorien STOP und GO werden noch Symbole aus einer dritten Kategorie ergänzt, um die Ratewahrscheinlichkeit zu reduzieren.

Diese Kategorie mit Symbolen ohne konkrete Bedeutung wird RANDOM genannt. In dieser sind Symbole enthalten, die in der *Bildtafel der Verkehrszeichen in der Bundesrepublik Deutschland* abgebildet oder allgemein bekannt sind. Beispiele hierfür sind der Hinweis auf Schnee- oder Eisglätte, auf eine Amphibienwanderung oder ein Piktogramm eines Thermometers [57].

Zusätzlich werden den Probanden einige Symbole animiert dargeboten. Dabei wird zwischen zwei Animationsmustern unterschieden, siehe Abbildung 5.25.

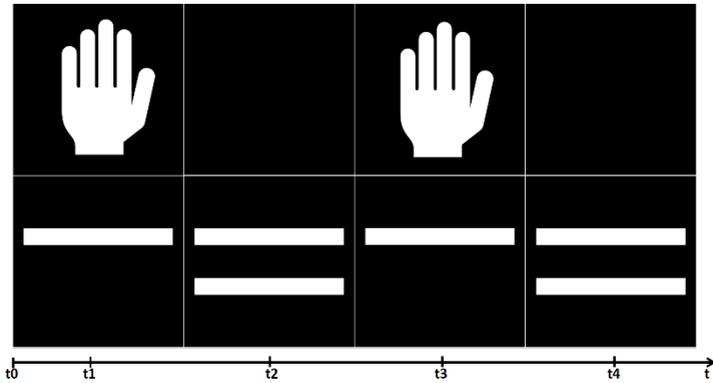


Abbildung 5.25: Animationsabfolge der Symbole. Blinkende Darbietung (oben) und Aufbauende Darbietung (unten).

Nach Auswahl durch ein Expertengremium ergeben sich insgesamt 26 zu untersuchende Symbole, elf Symbole aus der Kategorie STOP, zehn aus der Kategorie GO sowie fünf aus der Kategorie RANDOM, zu sehen in Abbildung 5.26.

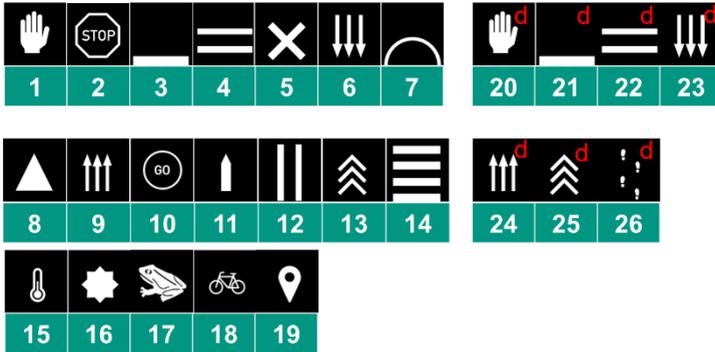


Abbildung 5.26: Übersicht aller untersuchten Symbole getrennt nach Kategorie und Dynamik.

Diese Symbole werden den Probanden in randomisierter Reihenfolge für eine Dauer von 5 s dargeboten. Aufgabe des Probanden ist es, die mögliche Reaktion auf einem Fragebogen mit vordefinierten Antwortmöglichkeiten anzukreuzen. Des Weiteren wird jedes Symbol mit Messwiederholung dargeboten. Aus 26 Symbolen mit je zwei Wiederholungen ergeben sich somit insgesamt 78 Symbolpräsentationen mit Entscheidungen durch den Probanden.

Den Abschluss der Probandenstudie bildet ein Fragebogen mit allgemeinen Fragen zum Thema Automobil und Projektion im Straßenverkehr.

5.1.2 STUDIENDURCHFÜHRUNG

Die Probandenstudie wurde mit insgesamt 64 Teilnehmern, davon 31 weiblich und 33 männlich, im Alter von 18 bis 63 Jahren durchgeführt. Das Durchschnittsalter beträgt ~32 Jahre.

Die Probanden wurden zunächst schriftlich über den Ablauf der Probandenstudie instruiert, siehe Abbildung 5.27.

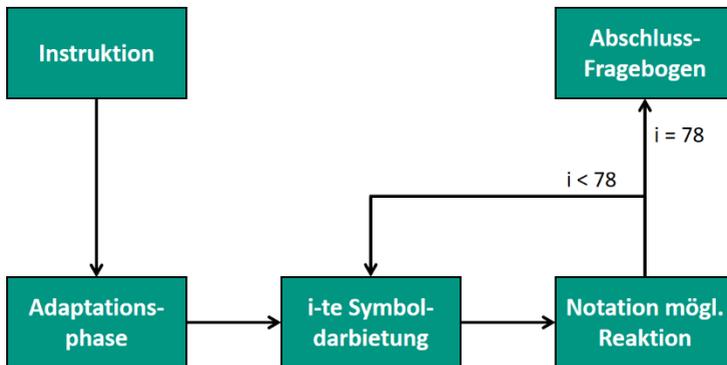


Abbildung 5.27: Ablaufdiagramm der Versuchsdurchführung.

Im Anschluss erfolgt eine Adaptationsphase von circa 20 Minuten, in der sich die Probanden an die dunklere Umgebung adaptierten. Durch das Leuchtdichteniveau sowie der Abblendlichtverteilung und dem Symbol ist diese Zeit ausreichend, damit sich die Augen der Probanden an die mesopischen Lichtverhältnisse anpassen [58], [59].

Nach der Adaptationsphase werden den Probanden in randomisierter Reihenfolge insgesamt 78-mal Symbole präsentiert. Ihre mögliche Reaktion konnten sie auf einem Fragebogen ankreuzen. Auf dem Fragebogen stehen fünf Antwortmöglichkeiten zur Auswahl:

„Wie würden Sie auf dieses Symbol reagieren?“

- Stehen bleiben
- Umdrehen und zurücklaufen
- Weiterlaufen
- Beschleunigen
- Ich weiß nicht, was ich tun soll

Für die Notation der möglichen Reaktion haben die Probanden keine Zeitbegrenzung, werden jedoch angehalten, ihre intuitive Reaktion anzugeben. Eine Mehrfach-Nennung ist nicht möglich.

Den Abschluss der Probandenstudie bildet ein Fragebogen mit allgemeinen Fragen zum Thema Verkehr und Projektion. Die Fragebögen sind dem Anhang B: zu entnehmen.

Nach Abschluss der Studiendurchführung mit den erwachsenen Probanden und der Auswertung der aufgenommenen Daten, wird eine Folgestudie mit Teilnehmern im Alter von 5-8 Jahren durchgeführt. Hintergrund ist, dass diese Art der Kommunikation im besten Fall auch mit Verkehrsteilnehmern funktioniert, die noch nicht verkehrserzogen sind oder Lesen können.

Somit würde dies eine Art der Kommunikation darstellen, die auch für Kleinkinder oder Analphabeten funktioniert. Die Studiendurchführung mit den Kindern sowie die daraus resultierenden Ergebnisse, sind dem Tagungsband der *ISAL2022* zu entnehmen [60].

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Studie mit den erwachsenen Teilnehmern dargestellt.

5.1.3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die aufgenommenen Daten werden nach mehreren Kriterien bewertet. Eine Methode ist hierbei die Berechnung der sogenannten Erkennungsrate (engl. Recognition Rate – RR). Diese gibt an, wie viel Prozent aller Probanden so auf die Darbietung eines Symbols so reagiert haben, wie dies zuvor definiert wurde.

Die Erkennungsrate RR_i wird entsprechend (5.3) berechnet:

$$RR_i = \frac{n_c}{N_t} \quad (5.3)$$

Dabei gibt n_c die Anzahl korrekt gegebener Antwort im Verhältnis zu N_t allen gegebenen Antworten zu einem Symbol i an.

Die STOP-Symbole sind in Abbildung 5.28 dargestellt, die zugehörigen Erkennungsraten in Abbildung 5.29:.

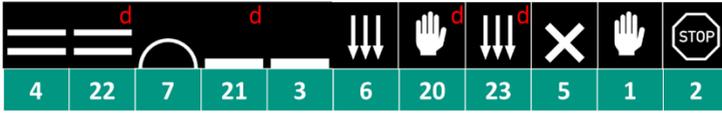


Abbildung 5.28: Übersicht der untersuchten STOP-Symbole, sortiert nach aufsteigenden Erkennungsraten.

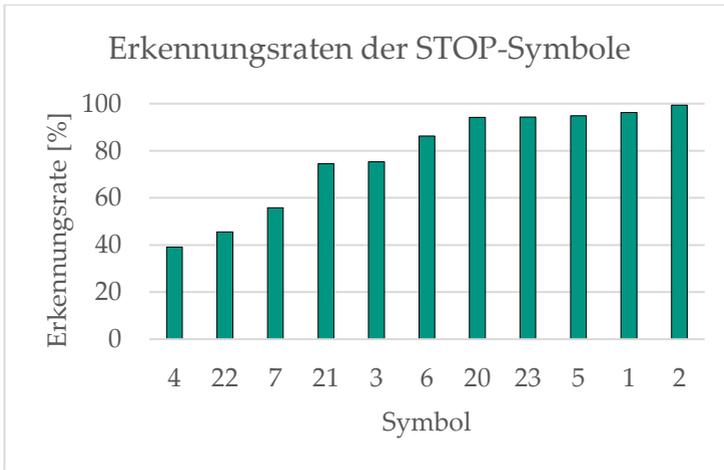


Abbildung 5.29: Erkennungsraten aller STOP-Symbole in aufsteigender Reihenfolge. Die Zahl gibt an, welches Symbol aus der Gesamtmenge aufgetragen ist.

Es lässt sich eindeutig zeigen, dass sich die Erkennungsraten der verschiedenen Symbole stark unterscheiden. Bei Betrachtung der Symbole „4“ und „22“ ergeben sich Erkennungsraten von weniger als 50%. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass die

doppelten Striche fälschlicherweise als eine Art Zebrastrreifen interpretiert und als Aufforderung loszulaufen aufgefasst werden.

Dem entgegen stehen Symbole, die mit Erkennungsraten 95% und mehr bei fast allen Probanden die angedachte Reaktion hervorgerufen haben. Hierbei handelt es sich um Symbole, die aus anderen Bereichen des Lebens, aber vor allem auch aus dem Straßenverkehr bekannt sind. Symbol 2, das „Stoppschild“, erzielt eine Erkennungsrate von über 99 %. Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass das Stoppschild durch seine Form einen hohen Wiedererkennungswert hat. Das Stoppschild ist das einzige Schild, welches als Oktagon dargestellt wird [61], [62]. Somit hebt es sich zum einen stets deutlich von der Umgebung ab [23] und ist zum anderen auch zu erkennen, falls es verschmutzt oder verschneit ist.

Das Stoppschild mit dazugehörigem Symbol ist in Abbildung 5.30 abgebildet.

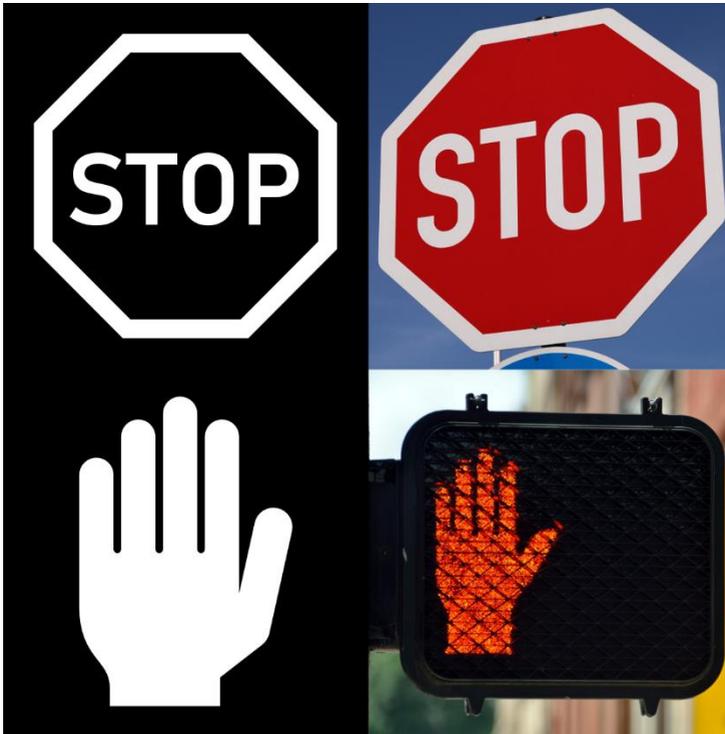


Abbildung 5.30: Gegenüberstellung der Symbole deren Ursprung dem Straßenverkehr entstammt. Symbol 2 (oben) entstammt dem deutschen Stoppschild, Symbol 1 (unten) einer amerikanischen Fußgängerampel.

Ebenso erzielt Symbol 1 eine sehr hohe Erkennungsrate von über 95 %. Auch dies lässt sich damit begründen, dass die erhobene Hand ein weitreichend bekanntes Symbol ist, das eng mit einer bestimmten Bedeutung oder Aussage verbunden ist, vgl. Abbildung 5.30. Das Symbol der erhobenen Hand findet sich ebenfalls im Straßenverkehr,

beispielsweise in den Vereinigten Staaten. Ebenso lässt sich eine Ähnlichkeit mit dem in der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A1.3 definierten bekannten Symbol „Zutritt für Unbefugte verboten“ feststellen [34].

Dies legt zum einen die Vermutung nahe, dass es sich generell empfiehlt, bei der Gestaltung einer anzeigebasierten Kommunikation Gestaltungselemente zu verwenden, die bereits in der Bevölkerung bekannt sind. Andererseits haben eindeutige, einzigartige Formen auch den Vorteil, dass diese eine hohen Wiedererkennungswert aufweisen. Eine Erkennung wäre somit auch noch möglich, wenn das Symbol schlecht bzw. verschwommen erkennbar ist oder Teile davon verdeckt sind. Daraus lässt sich bereits eine wichtige Erkenntnis ableiten, nämlich dass Nachrichten generell so zu gestalten sind, dass sie eine Einzigartigkeit aufweisen. Diese sorgt dafür, dass die Nachricht trotz widriger Bedingungen erkennbar und verständlich bleibt.

Damit ergibt sich aus den Experimenten, dass Symbolprojektionen geeignet sind, um bestimmte instruktive Botschaften an einen oder mehrere bestimmte Empfänger zu kommunizieren.

Da die bisherige Untersuchung mit sehr guten Sichtbarkeitsbedingungen des Symbols für den Probanden durchgeführt wurde, sollen im Rahmen einer Folgestudie die Parameter Helligkeit und Größe der Symbole untersucht werden.

5.1.4 UNTERSUCHUNG ZU GRÖSSE UND KONTRAST DER SYMBOLE

Die optimale Größe und der notwendige Mindestkontrast werden ebenfalls im Rahmen einer Probandenstudie untersucht. Aus der zuvor erfolgten Untersuchung wird die Versuchsumgebung übernommen. Die Parameter sollen getrennt voneinander untersucht werden, da eine Wechselwirkung nicht auszuschließen ist.

Der Fokus soll daher zunächst auf der Größe der dargebotenen Symbole bei konstantem Kontrast liegen. Der Kontrast, mit der diese mindestens darzubieten sind, wird in einer Folgestudie untersucht.

Zur Untersuchung des Parameters in diesem Versuchsaufbau gibt es mehrere probate Möglichkeiten. Ziel ist es, die Größe des Symbols zu finden, ab der ein Proband dieses sicher erkannt hätte. Zur Bestimmung dieser Schwelle eignen sich Methoden von Fechner, die sogenannte „Herstellungsmethode“ und die „Konstanzmethode“ [63], [64].

Prinzipiell ist es möglich, die Schwelle mit beiden Methoden zu bestimmen. Zur Verwendung der Konstanzmethode werden den Probanden in zufälliger Reihenfolge Symbole unterschiedlicher Größe präsentiert. Die Aufgabe der Probanden ist anzugeben, ob das gezeigte Symbol erkannt wurde oder nicht. Aus den gegebenen Antworten wird die sogenannte Psychometrische Funktion abgeleitet, welche den Zusammenhang der Wahrscheinlichkeit der Erkennung in Abhängigkeit der dargebotenen Reizstärke beschreibt.

Bei Verwendung der Herstellungsmethode werden dem Probanden kontinuierliche Reize, hier verschiedene Größen, präsentiert bzw. es ist dessen Aufgabe, die Reizstärke aktiv, beispielsweise über einen Controller, zu variieren. Aus den erhobenen Daten lässt sich ebenfalls ermitteln, ab welcher Reizstärke eine Erkennung wahrscheinlich ist.

Für die Durchführung der Probandenstudie wird die Herstellungsmethode verwendet. Dies hat den Vorteil, dass die Reizstärke kontinuierlich abgefragt wird und die Dauer der Durchführung akzeptabel bleibt. Des Weiteren bleibt durch die aktive Rolle des Probanden dessen Aufmerksamkeit während der Durchführung aufrechterhalten.

Die Teilnehmer erhalten die Aufgabe, die Größe des ihnen gezeigten Symbols über einen Drehregler so zu verändern, dass sie dieses eindeutig auf der Fahrbahn erkennen und mit einem Blick erfassen können. Es ist darauf zu achten, dass die Startgröße, ab welcher die Probanden beginnen, die Größe zu verändern, bei beiden Extremwerten der Reizstärke beginnt. Erfahrungsgemäß macht es einen Unterschied, ob der Proband von kleiner zu großer Reizstärke einstellt oder umgekehrt. Daher werden beide Einstellrichtungen abgefragt und die resultierenden Daten gemittelt.

Insgesamt werden vier unterschiedliche Symbole während der Probandenstudie abgefragt. Die Auswahl erfolgt unter dem Aspekt, dass das Symbol bei der vergangenen Studie eine Erkennungsrate von über 80 % erreichen konnte. Die verwendeten Symbole sind in Abbildung 5.31 zu sehen.

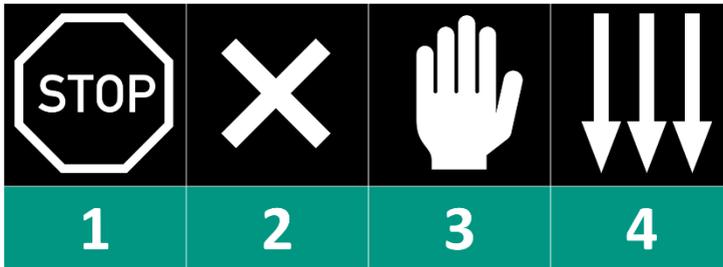


Abbildung 5.31: Übersicht des reduzierten Symbolsatzes zur Untersuchung der Größe und der Helligkeit des projizierten Symbols.

Die Umgebungsbeleuchtung wird so eingestellt, dass sich zwei verschiedene Szenarien ergeben:

- i. **Schlecht beleuchtete Straße:** Die Szene stellt eine Straße im innerstädtischen Bereich dar, die nicht ausreichend beleuchtet ist. Genauer wird der Bereich zwischen zwei ortsfesten Straßenbeleuchtungen simuliert, um somit einen Best-Case für die Sichtbarkeit der Symbole abzubilden.
- ii. **Gut beleuchtete Straße:** Die zweite Szene stellt eine sehr gut ausgeleuchtete innerstädtische Straße dar. Für diesen Fall wird ein Bereich unmittelbar an einer ortsfesten Straßenbeleuchtung simuliert, um somit einen Worst-Case abzubilden.

Die Symbolhelligkeit für den ersten Teil der Studie wird so eingestellt, dass sich in beiden Szenarien ein konstanter Kontrast (Weber) von projiziertem Symbol zur Umgebungshelligkeit ergibt.

Die Symbole werden den Probanden in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Deren Aufgabe ist es, die Größe des präsentierten Symbols über den Drehregler entsprechend der Vorgabe einzustellen. Dafür gab es keine zeitliche Beschränkung. Nach jedem Symbol wird ein neutraler Hintergrund zur Readaptation gezeigt, bevor das nächste Symbol erscheint.

Des Weiteren wird jedes Symbol mit Messwiederholung dargeboten. Aus vier Symbolen mit je zwei Wiederholungen, den zwei unterschiedlichen Einstellrichtungen sowie den beiden Umgebungshelligkeiten ergeben sich somit insgesamt 32 Symbolpräsentationen, bei denen der Proband die Größe einstellen muss.

5.1.5 STUDIENDURCHFÜHRUNG

Die Probandenstudie wurde mit insgesamt 30 Teilnehmern durchgeführt, davon 12 weiblich und 18 männlich. Das Durchschnittsalter beträgt 27,7 Jahre.

Die Probanden wurden schriftlich über den Ablauf der Studie instruiert, vgl. Abbildung 5.32.

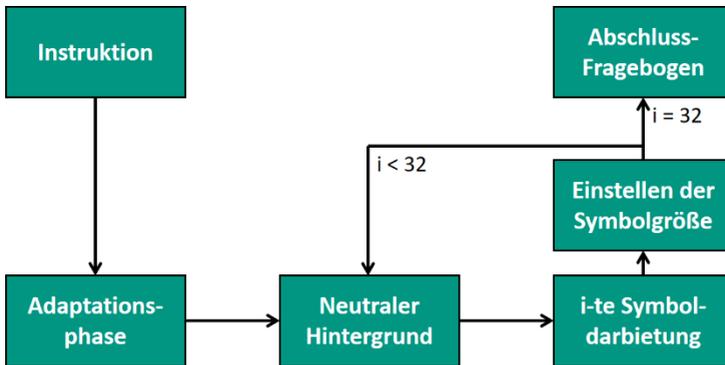


Abbildung 5.32: Ablaufdiagramm der Versuchsdurchführung.

Anschließend erfolgte eine Adaptationsphase von ca. 20 Minuten, in der sich die Augen der Probanden an die Beleuchtung der Versuchsumgebung adaptieren sollen. Die Umgebungsbeleuchtung zusammen mit der Abblendlichtverteilung des Fahrzeuges ergeben mesopische Bedingungen für die Durchführung der Probandenstudie.

Nach der Adaptationsphase beginnt die aktive Studiendurchführung. Nach der Darbietung eines neutralen Hintergrundes werden den Probanden nacheinander in randomisierter Reihenfolge verschiedene Symbole gezeigt. Mit dem Controller müssen sie die Größe der Symbole vergrößern beziehungsweise verkleinern.

5.1.6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die erhobenen Daten werden im Folgenden schrittweise untersucht. Zunächst werden die Daten aller Probanden zusammengefasst und nach Symbolen getrennt. Eine weitere Trennung stellt die Umgebungsbeleuchtung dar. Die verschiedenen Einstellrichtungen werden, wie zuvor beschrieben, zusammengefasst und das arithmetische Mittel gebildet.

Anschließend wird untersucht, ob die Umgebungsbeleuchtung einen signifikanten Einfluss auf die eingestellte Größe hat. Die Daten werden mittels t-Test für abhängige Stichproben untersucht. Voraussetzung dafür ist, dass die aufgenommenen Daten normalverteilt sind. Eine Überprüfung erfolgt mittels Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests [64]. Dieser ergab, dass die Daten normalverteilt sind und der t-Test angewandt werden darf.

Der t-Test wird getrennt für jedes Symbol durchgeführt und die Mittelwerte der Daten mit dunkler gegen die mit heller Umgebungsbeleuchtung verglichen. Die Ergebnisse des t-Tests für jedes Symbol sind dem Anhang C: zu entnehmen.

Zur besseren Visualisierung der Daten sind diese in Abbildung 5.33 als Boxplot dargestellt. Dabei sei angemerkt, dass die eingestellte Größe einen Wert der Software darstellt. Eine Umrechnung in absolute Größen erfolgt im Anschluss.

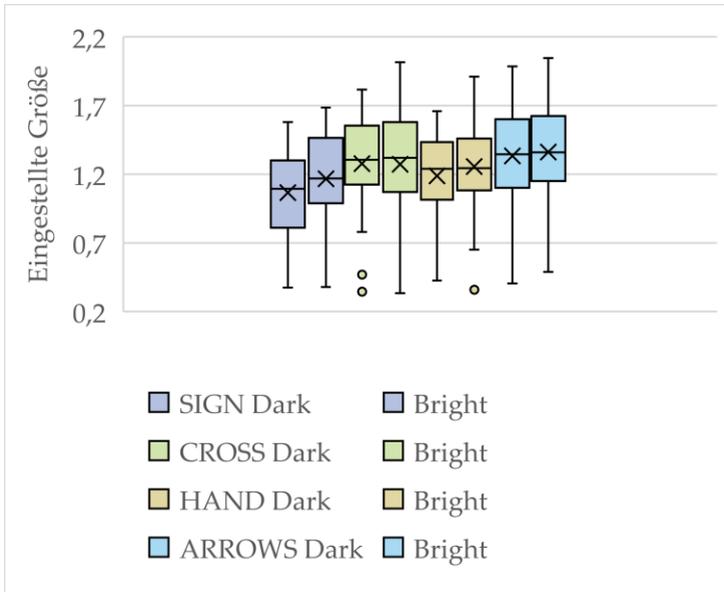


Abbildung 5.33: Darstellung der erhobenen Daten als Boxplot. Vergleich aller vier Symbole, SIGN-CROSS-HAND-ARROWS, getrennt nach „Dunkler Umgebung“ bzw. „Heller Umgebung“.

Die grafische Darstellung zeigt, dass die Mittelwerte der erhobenen Daten sich in einer ähnlichen Größenordnung bewegen. Der Unterschied wird über die statistische Auswertung quantifiziert und anschließend tabellarisch präsentiert. Es wird ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ für alle Auswertungen angenommen.

Als Nullhypothese H_0 wird für alle Symbole jeweils folgendes formuliert:

„Die Umgebungsbeleuchtung hat keinen Einfluss auf die eingestellte Größe der präsentierten Symbole.“

Die sich daraus ableitende Alternativhypothese H_1 lautet:

„Die Umgebungsbeleuchtung hat einen Einfluss auf die eingestellte Größe der präsentierten Symbole.“

Bei 33 Teilnehmenden ergeben sich für die Auswertung 32 Freiheitsgrade. Bei Annahme eines Signifikanzniveau α von 0,05 ergibt sich ein kritischer Wert von 2,093. Dieser Wert trennt den Annahmebereich eines statistischen Tests vom Ablehnungsbereich und ist gleich für die folgenden Auswertungen.

Die Auswertung ergab die in **Tabelle 5.3** dargestellten Unterschiede. Zusätzlich wurde jeweils die Effektstärke, *Cohen's d*, berechnet. Diese quantifiziert die Stärke eines gemessenen Unterschieds bei signifikantem Ergebnis.

Tabelle 5.3: Übersicht der statistischen Auswertung der Unterschiede zwischen heller und dunkler Umgebung getrennt nach den Symbolen.

Symbol	P-Wert	Signifikanter Unterschied	Cohen's d
SIGN	0,0003	Ja	0,7
CROSS	0,83	Nein	
HAND	0,005	Ja	0,52
ARROWS	0,38	Nein	

Die Auswertung zeigt, dass für die Symbole „SIGN“ und „HAND“ signifikante Unterschiede der eingestellten Größe zwischen der hellen und der dunklen Umgebung gefunden wurden. Die Nullhypothese müsste somit für diese Symbole verworfen und die Alternativhypothese angenommen werden.

Bei Betrachtung der Absolutwerte jedoch zeigt sich, dass der Unterschied im Realen lediglich wenige Zentimeter beträgt. Daher werden für die weitere Betrachtung die Werte der hellen und dunklen Umgebung gemittelt und nachfolgend der Unterschied der eingestellten Größe zwischen den Symbolen untersucht.

Die verbleibenden Daten, zu sehen in Abbildung 5.34, werden statistisch mittels einfaktorieller Varianzanalyse (ANOVA) untersucht.

Die Ergebnisse der ANOVA sind dem Anhang C: zu entnehmen.

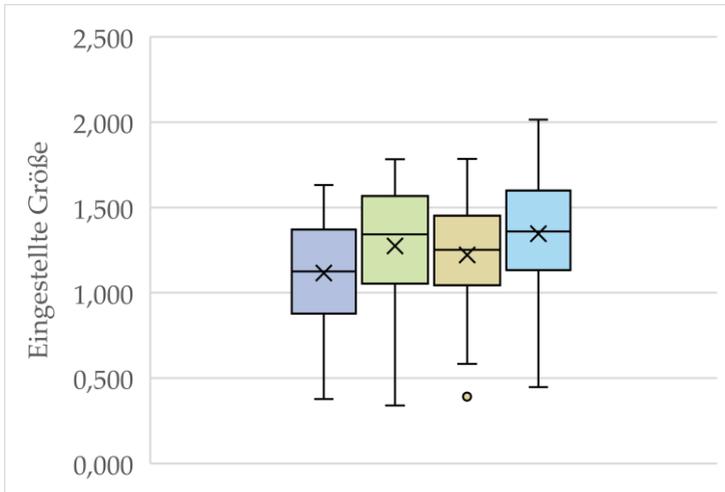


Abbildung 5.34: Darstellung der erhobenen Daten als Boxplot. Vergleich aller vier Symbole, SIGN-CROSS-HAND-ARROWS.

Hier zeigt sich, dass die Boxen der Größen der jeweiligen Symbole ebenfalls sehr ähnlich zueinander sind.

Folgende Nullhypothese H_0 wird formuliert:

„Das gezeigte Symbol hat keinen Einfluss auf die eingestellte Größe.“

Nach Durchführung der ANOVA ergibt sich ein p-Wert von 0,03. Dies bedeutet, dass sich mindestens zwei der untersuchten Symbole signifikant in der eingestellten Größe unterscheiden. Eine genauere Untersuchung, zwischen welchen Symbolen der signifikante Unterschied besteht, würde mittels Post-Hoc-Test ermittelt werden [65]. Da

dies für die weitere Bearbeitung jedoch nicht relevant ist, wird darauf verzichtet.

Der größte eingestellte Mittelwert liegt bei 1,31 m. Dies entspricht einem wahrgenommenen Sehwinkel von ca. 30 °.

Für die folgende Untersuchung, in der der Kontrast der präsentierten Symbole untersucht wird, wird diese Größe für alle Symbole eingestellt. Die Probanden sollen diesmal die Helligkeit des Symbols über den Drehregler verändern. Die insgesamt vier Symbole werden jeweils in heller und dunkler Umgebung präsentiert mit einer Messwiederholung von zwei.

Die Studiendurchführung erfolgt analog zur Vorherigen. Es haben insgesamt 30 Probanden daran teilgenommen, von denen 18 weiblich und 12 männlich waren. Die Probanden waren zum Zeitpunkt der Durchführung zwischen 19 und 64 Jahre alt, das Durchschnittsalter lag bei 38 Jahren.

Die Auswertung erfolgt analog zur zuvor durchgeführten Studie. Die aufgenommenen Werten werden zunächst in Michelson-Kontrast überführt und anschließend miteinander verglichen. Da es auch hier keine bzw. sehr geringe Unterschied zwischen den eingestellten Kontrasten der Symbole gibt, erfolgt lediglich eine Vergleich der Mittelwerte „Dunkle Umgebungsbeleuchtung“ vs. „Helle Umgebungsbeleuchtung“.

Die statistische Auswertung der Daten erfolgt mittels t-Test zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppe gibt.

Die Bewertung der Effektstärke über *Cohen's d* gibt einen Wert von 1,77 an, was für einen starken Effekt spricht.

Das Ergebnis der statistischen Auswertung ist Anhang C: zu entnehmen.

Als Erkenntnis sei daher festgehalten, dass der eingestellte Kontrast in Abhängigkeit der Umgebungsbeleuchtung erfolgt, zu sehen in Abbildung 5.35.

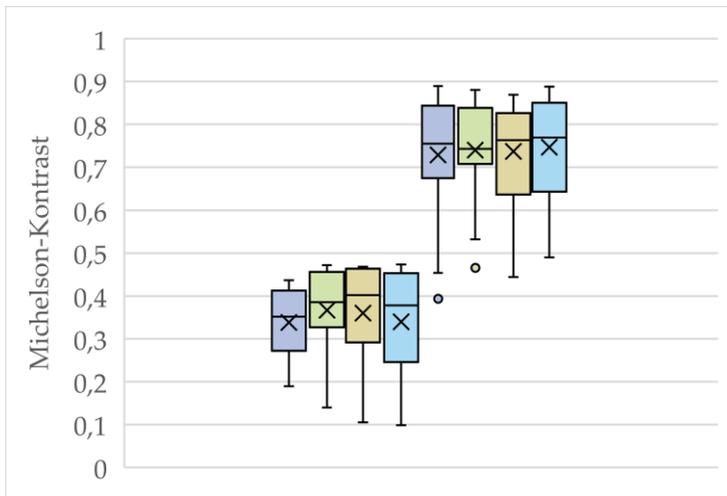


Abbildung 5.35: Darstellung der resultierenden Kontraste getrennt nach heller Umgebung, vier Boxen links, und dunkler Umgebung, Boxen rechts. Die Reihenfolge der Symbole ist jeweils: SIGN, HAND, CROSS und ARROWS.

Der eingestellte Michelson-Kontrast der helleren Umgebung beträgt ca. die Hälfte des in dunkleren Umgebung eingestellten. Eine

mögliche Erklärung hierfür wäre, dass der Schwellenkontrast zur Detektion einfacher Sehobjekte in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte ist [66]. Bei höheren Umgebungsleuchtdichten sinkt der benötigte Schwellenkontrast. Ob dies ebenfalls auf komplexere Symbole und den Kontext der Scheinwerferprojektion übertragbar ist, bietet Grundlage für weiterführende Forschung.

Nach Abschluss aller Untersuchungen lässt sich festhalten, dass Symbolprojektion eine probate Möglichkeit zur Informationsvermittlung ist. Weiter sind durch bekannte, bereits gelernte Formen und Symbole Inhalte sehr schnell vermittelbar und es können auch Gruppen angesprochen werden, die bspw. nicht lesen können oder die der jeweiligen Landessprache nicht mächtig sind. Dies ist dabei nicht nur auf die projizierte Symbole anwendbar.

Problematisch bei der Symbolprojektion, für die Kommunikation außerhalb des Nahbereichs des Fahrzeuges, ist jedoch, dass diese nur in Dämmerungs- und Nachtstunden einsetzbar ist. Des Weiteren wird die Sichtbarkeit der Inhalte bei schlechter Witterung deutlich herabgesetzt, ebenso durch unebene oder verschmutzte Fahrbahnen. Durch die geringe Anbauhöhe der Scheinwerfer entstehen zudem sehr flache Projektionswinkel. Projektionsdistanzen größer 15 m sind schwierig umzusetzen, da neben einer hohen Auflösung des Scheinwerfers zur Ausgleichung der Projektionsverzerrung ebenso eine aktive Regelung notwendig ist, die das Nicken des Fahrzeuges beim Überfahren unebenen Untergrunds ausgleicht.

5.2 DISPLAYKOMMUNIKATION

Die Betrachtung der Symbolprojektion hat gezeigt, dass eine bildbasierte Sprache, unter Verwendung bekannter Formen und Symbole, beabsichtigte Reaktionen beim Empfänger hervorrufen kann. Nachteilig bei der Projektion ist allerdings, dass diese nur zu bestimmten Tageszeiten sinnvoll ist und auch nur sofern weitere Voraussetzungen wie trockene Fahrbahn oder kein Niederschlag oder Nebel, erfüllt sind. Eine robuste Kommunikation ist somit nicht dauerhaft gegeben.

Aus diesem Grund wird im Folgenden ein Display als Kommunikationsmittel untersucht.

5.2.1 VERSUCHSAUFBAU

Zur Untersuchung der Möglichkeiten eines Displays zur Kommunikation im Straßenverkehr, aber auch zur Abschätzung der Anforderungen an eine solche Kommunikationseinheit, wird ein LED-Bildschirm aus dem Veranstaltungsbereich verwendet.

Der Vorteil dieser Bildschirme ist, dass bei der Verwendung, auch bei Veranstaltungen im Außenbereich, ausreichend hohe Leuchtdichten erzeugbar sind, sodass die Inhalte auch bei Tageslicht gut erkennbar sind.

Voruntersuchungen mit Bildschirmen aus dem Bürobereich haben gezeigt, dass deren Leuchtdichten und der darstellbare Kontrast, insbesondere unter Sonneneinstrahlung, nicht ausreichend sind, um erkennbare Inhalte darzustellen, siehe Abbildung 5.36.



Abbildung 5.36: Voruntersuchung mit LCD-Bildschirm zur Darstellungen von Inhalten an der Fahrzeugfront. Bei Dunkelheit ist ein ausreichender Kontrast möglich, bei Tageslicht sind keine Inhalte erkennbar.

Da Bürobildschirme aktuell überwiegend LCD-Monitore sind, sind die damit zu erreichenden Kontraste vergleichsweise gering. LCD-Monitore erzeugen farbige Pixel auf dem Transmissionsprinzip durch Polarisationsfilter und Flüssigkristalle [67]. Das Licht wird durch eine Hinterleuchtung erzeugt. Bei vollständig schwarzem Bildschirm ist dennoch eine geringe Leuchtdichte messbar.

Durch die schlechten Schwarzwerte ist der zu erzielende Kontrast von LCDs stark eingeschränkt. Besser geeignet sind hier Anzeigeelemente, die nicht auf Transmissions-Technologie basieren, sondern

direkt an- und abschaltbare Pixel besitzen. Diese Anforderungen erfüllen sowohl Anzeigen auf Basis der OLED-Technologie, als auch sogenannte μ LED-Bildschirme.

Ein weiteres Problem ist durch Fremdlicht gegeben, welches an der Bildschirmoberfläche reflektiert wird. Durch eine Erweiterung der Formel des Weber-Kontrastes um einen Fremdlichtanteil L_{Fremd} wird schnell ersichtlich, dass dieses den Kontrast deutlich reduziert, sofern es in der Größenordnung der Objektleuchtdichte L_O oder darüber liegt, vgl. Formel (5.4).

$$K_W = \frac{(L_O + L_{Fremd}) - (L_U + L_{Fremd})}{(L_U + L_{Fremd})} = \frac{L_O + L_U}{L_U + L_{Fremd}} \quad (5.4)$$

Bei der Auswahl eines geeigneten Displays ist deshalb zusätzlich zu beachten, dass die Oberfläche dunkel beschaffen ist und somit wenig einfallendes Licht reflektiert wird und/oder eine Antireflexbeschichtung aufgebracht ist. Die Bestimmung des Reflexionsgrades des verwendeten Displays wird in Kapitel 5.2.2 genauer betrachtet.

Aus diesen Gründen wird für den Aufbau eines Prototyps ein LED-Bildschirm aus dem Bereich der Veranstaltungstechnik, verwendet.

Das verbaute Display hat eine Auflösung von 128 x 256 Pixeln. Jedes Pixel besteht dabei aus einem RGB-Chip (Red Green Blue – RGB), so dass beliebige, farbige Inhalte auf dem Display darstellbar sind, vgl. Abbildung 5.37.

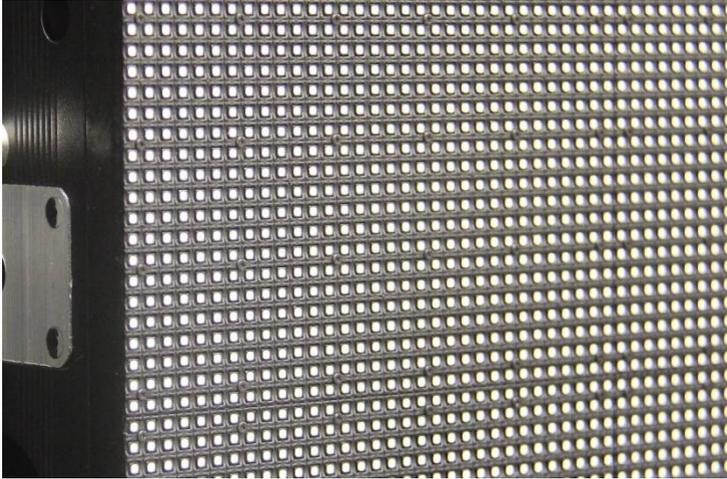


Abbildung 5.37: Nahaufnahme des LED-Displays in der Halterung. Je Pixel ein RGB-Chip, gesamt 128 x 256 Pixel.

Die Größe des Displays beläuft sich auf 0,5 m x 1 m. Da das Display als Versuchsträger für die Forschung verwendet wird, ist eine Fahrzeugintegration nicht vorgesehen. Montiert wird das Display an der Front des Versuchsträgers, einem Audi A6 Avant. Die Montage erfolgt über eine Aufnahme aus Aluminium-Profilstangen, die fest mit dem Fahrzeugchassis verbunden sind.

Der Abstand der Pixel zueinander (= Pixelpitch) beträgt somit 3,9 mm, siehe Abbildung 5.38. Der Betrachtungswinkel bzw. der Abstrahlwinkel des Displays wird laut Hersteller mit 140° angegeben, die Helligkeit mit $L_{Display} = 5.500 \text{ cd/m}^2$. Ein minimaler Betrachtungsabstand von 3,9 m wird empfohlen.

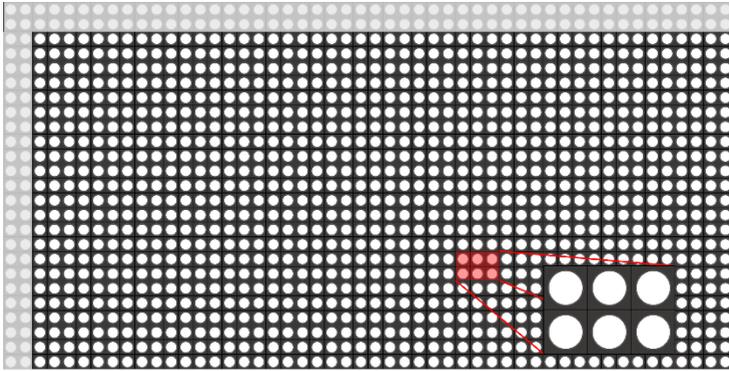


Abbildung 5.38: Schematische Darstellung des LED-Displays mit absoluter Größe und Pixelpitch.

Eine Überprüfung dieser Angaben erfolgt in Kapitel 5.2.2.

Durch die Dimensionen des Displays ergeben sich mehrere Möglichkeiten, zukünftige Untersuchungen zu gestalten:

- i. Untersuchung und Abschätzung der für eine Kommunikation notwendigen nativen Auflösung
- ii. Abschätzung der Darstellungsgröße eines Symbols zur Kommunikation
- iii. Abschätzung der notwendigen Displayhelligkeit zur Kommunikation

Durch die Beantwortung dieser Fragestellungen ist es möglich, Anforderungen an potenziell zukünftige Fahrzeugdisplays, zur Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern, zu formulieren.

5.2.2 PHOTOMETRISCHE VERMESSUNG DES DISPLAYS

Die photometrische Bewertung des Displays gliedert sich in drei Teilabschnitte. Im ersten Abschnitt erfolgt eine Vermessung des Displays hinsichtlich der Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) und dem Öffnungswinkel auf dem Goniophotometer.

Im zweiten Abschnitt erfolgt eine Bewertung des Displays anhand der DIN 12966 bzw. DIN 12368 als sogenanntes Wechselverkehrszeichen. Dies beinhaltet eine Phantomlichtmessung, aus der hervorgeht, wie das Display auf Einwirkung durch Fremdlicht reagiert. Daraus lassen sich sowohl die Reflexionseigenschaften des Displays ableiten als auch eine Abschätzung erstellen, wie der Farbort der eingestellten Farbe durch das Fremdlicht beeinflusst wird.

Den letzten Teil der Messreihe bildet die Ermittlung der Dimmkurve des Displays. Mit Hilfe einer Leuchtdichtemesskamera wird dabei bestimmt, wie sich die Leuchtdichte des Displays in Abhängigkeit der softwareseitigen Aussteuerung der Helligkeit verhält. Diese Information wird dann im Folgenden dafür verwendet, die Leuchtdichte des Displays an die Umgebungshelligkeit adaptiv anzupassen.

Die Messung der LVK erfolgt auf dem Goniophotometer des Lichttechnischen Instituts anhand geltender Messvorschriften, vgl. Abbildung 5.39.



Abbildung 5.39: Vermessung des Displays auf dem Kfz-Goniophotometer des Lichttechnischen Instituts. Gemessen wird die Lichtstärkeverteilungskurve im gesamten Halbraum.

Daraus ergibt sich sowohl, wie die Lichtstärken in bestimmte Raumrichtungen verteilt sind, als auch, aus welchen Betrachtungswinkeln Inhalte auf dem Display noch erkennbar sind. Die gemessene LVK des Displays ist in Abbildung 5.40 zu sehen.

θ ist hier als Polarwinkel definiert und Φ als Azimutwinkel.

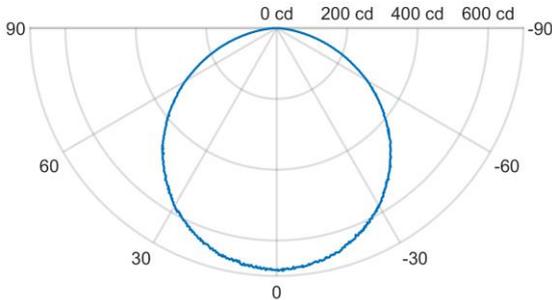


Abbildung 5.40: Gemessene LVK des Displays durch das Goniophotometer. Dargestellt ist der Schnitt bei $\theta = 180^\circ$.

Es zeigt sich, dass das Display eine Lambertsche Abstrahlcharakteristik aufweist. Die dargestellten Inhalte sind somit, unabhängig von der Betrachtungsrichtung, innerhalb eines definierten Bereiches vor dem Display gut zu sehen. Es gibt keine Vorzugsrichtung, die bei der Montage zu beachten ist.

Die Lichtstärke in der Bezugsachse bei $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$ beträgt 684,1 cd bei 100 % Aussteuerung des Displays mit Weiß als Farbe.

Für die Messung nach DIN 12966 ist es notwendig, das Display mit einer definierten Beleuchtungsstärke zu bestrahlen. Für die vorgenommene Messung muss die Fremdlichtquelle nach Norm das Zeichenträgerelement unter einem Winkel von 10° zur Referenzachse bestrahlen. Die Beleuchtungsstärke, die auf der Oberfläche des Zeichenträgerelementes erzeugt werden muss, beläuft sich auf 40.000 lx. Die Eigenschaften der sogenannten Phantomlicht-Quelle, wie

Spektrum und Farbort, müssen für die folgende Abschätzung bekannt sein bzw. ermittelt werden. Die spektrale Verteilung soll nach Norm ähnlich natürlichem Tageslicht sein und eine ähnliche Farbtemperatur zwischen 5.000 – 6.500 K aufweisen.

Das durch die Phantomlichtquelle simulierte Sonnenlicht verändert die Erscheinung der Darstellung auf dem Display für einen Beobachter. Der Begriff Phantomlicht leitet sich davon ab, dass Fremdlicht bzw. Sonnenlicht auf die Signalanlage trifft und durch Reflexion an der Optik der Eindruck entsteht, das Signal würde aufleuchten. Dieses Phänomen tritt häufig bei Verkehrsampeln auf und kann mit Maßnahmen wie Abschirmblenden oder Signalkammern ohne Reflektor reduziert werden.

Die Messung soll zeigen, wie Fremdlicht die Displayparameter und damit die Wahrnehmung der Inhalte verändert. Dies soll anschließend dazu dienen, die Anforderungen an ein Display abzuschätzen und zu formulieren.

Die Messung erfolgt schrittweise. So wird zunächst die Displayleuchtdichte bei voller Aussteuerung L_e ermittelt. Anschließend wird das ausgeschaltete Display durch die Fremdlichtquelle beleuchtet und ebenfalls die Leuchtdichte L_{b10} aufgenommen. Abschließend erfolgt die Messung der Leuchtdichte des angeschalteten Displays mit Beleuchtung L_{a10} durch die Fremdlichtquelle. Daraus lassen sich die folgenden Leuchtdichteverhältnisse berechnen:

$$LR_{10} = \frac{L_{a10} - L_{b10}}{L_{b10}} \quad (5.5)$$

sowie

$$LR_{10} = \frac{L_e}{L_{b10}} \quad (5.6)$$

Der Wert gibt an, welcher der Klassen L1, L2 oder L3 das Display zuzuordnen ist. Das Verhältnis LR_{10} wird als sogenannter Phantomfaktor bezeichnet. Dieser wird in Kapitel 5.2.4 aufgegriffen, um ein Modell zur Ansteuerung des Displays abzuleiten. Die Reflexionskennzahl ρ ergibt sich ebenfalls daraus.

Des Weiteren wird untersucht, wie sich der Farbort des Displays verändert, wenn dieses durch das Fremdlicht bestrahlt wird. Hierfür werden die Farborte $(x_s|y_s)$ des Displays im eingeschalteten Zustand für alle zu untersuchenden Farben gemessen, ebenso der Farbort der Fremdlichtquelle $(x_{ph}|y_{ph})$. Der daraus resultierende Farbort $(x_{s+ph}|y_{s+ph})$ lässt sich mit den Leuchtdichten auf der Displayoberfläche wie folgt berechnen. Die durch Phantomlichtquelle erzeugte Leuchtdichte L_{ph} ist für alle Farben gleich, da das Display ausgeschaltet ist. Die Signalleuchtdichten L_s unterscheiden sich je Farbe.

Die x-Koordinate ergibt sich aus

$$x_{s+ph} = \frac{L_s \cdot y_s^{-1} \cdot x_s + L_{ph} \cdot y_{ph}^{-1} \cdot x_{ph}}{L_s \cdot y_s^{-1} + L_{ph} \cdot y_{ph}^{-1}} \quad (5.7)$$

die y-Koordinate aus

$$y_{s+ph} = \frac{L_s + L_{ph}}{L_s \cdot y_s^{-1} + L_{ph} \cdot y_{ph}^{-1}} \quad (5.8)$$

Somit kann für jede auf dem Display eingestellte Farbe berechnet werden, wie sich diese durch die Einwirkung des Fremdlichtes

verändert. Die Farbortverschiebung für weißes Licht ist in Abbildung 5.41 dargestellt.

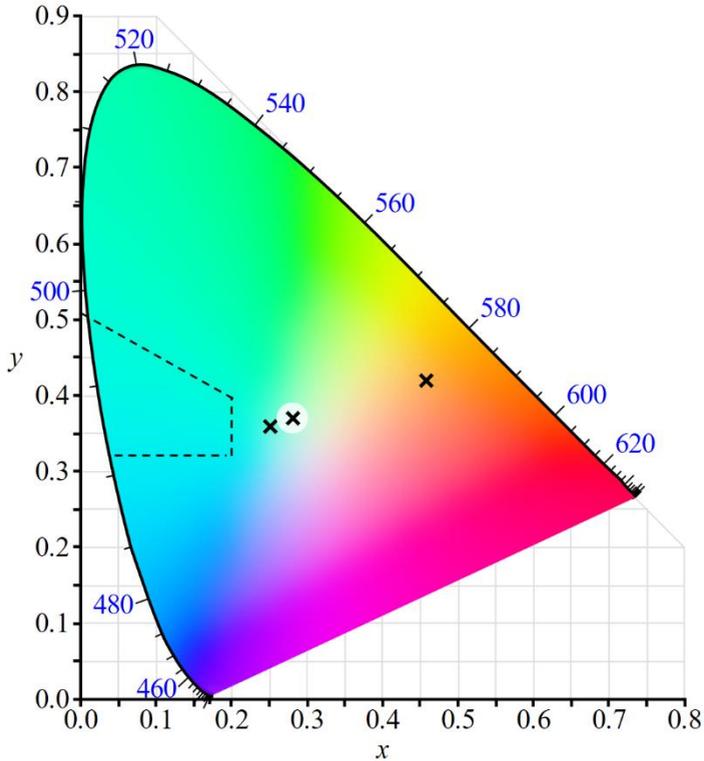


Abbildung 5.41: Verschiebung des Farbortes durch Einstrahlung des Fremdlichtes. Der Farbort des Displays ohne Bestrahlung (Kreuz links), der Phantomlichtquelle (Kreuz rechts) sowie der resultierende Farbort (Kreuz mit Umrandung) sind im Diagramm eingezeichnet.

Aus der Betrachtung der Farbortverschiebung für Cyan, vgl. Abbildung 5.42, bei Bestrahlung mit Fremdlicht, lässt sich bereits eine wichtige Erkenntnis ableiten. Bei Leuchten oder Anzeigen, die Cyan aus RGB mischen und der Farbort somit nicht nahe des Spektralwellenzuges liegt, kann sich durch das Fremdlichtspektrum der Farbort außerhalb zugelassener Bereiche verschieben.

Bei der Auslegung technischer Systeme ist das zu berücksichtigen, um unabhängig der Umgebungsbedingungen die Vorgaben erfüllen zu können.

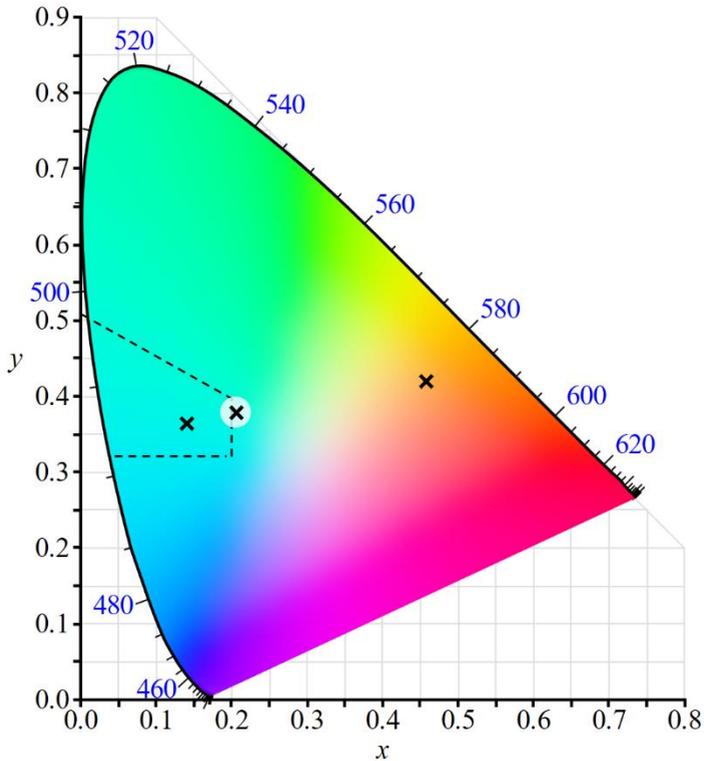


Abbildung 5.42: Verschiebung des Farbortes durch Einstrahlung des Fremdlichtes. Die eingezeichnete Fläche markiert den durch die SAE empfohlenen Bereich für Cyan als Statusleuchte. Der resultierende Farbort (Kreuz mit Umrandung) liegt durch die Einstrahlung außerhalb des zulässigen Bereichs.

So zeigt sich am Beispiel des gemessenen Displays, dass der Farbort sich nach Bestrahlung mit Tageslicht außerhalb des durch die SAE definierten Bereiches für cyanes Licht befindet. Für eine zukünftige

Anzeige mit Serienstandard ist daher die Verwendung monochromatischer, cyan-farbiger LEDs als Quelle zu empfehlen.

Insgesamt wurden sechs verschiedene Farben untersucht, welche in **Tabelle 5.4** als Übersicht dargestellt sind. Zusätzlich zu Weiß und Cyan, welche explizit als Farbe zur Kommunikation ausgewählt wurden, Rot, Grün und Blau, aus denen alle anderen Farben gemischt werden, wird Magenta untersucht.

Tabelle 5.4: Übersicht der gemessenen Farben vor- und nach Bestrahlung mit Fremdlichtquelle

Name	Farbort Signal ($x_s y_s$)	Farbort res. ($x_{s+ph} y_{s+ph}$)	
Weiß	(0,25 0,36)	(0,29 0,37)	
Rot	(0,70 0,30)	(0,57 0,36)	
Grün	(0,16 0,76)	(0,27 0,62)	
Blau	(0,12 0,07)	(0,23 0,19)	
Cyan	(0,13 0,36)	(0,20 0,38)	
Magenta	(0,45 0,42)	(0,33 0,22)	

Für weißes Licht auf dem Display ergab sich ein Phantomfaktor LR_{10} von 4. Dieser ist zwar nicht ausreichend, um das Display als Wechselverkehrszeichen zuzulassen, allerdings sei hier berücksichtigt, dass die Sichtbedingungen vollkommen unterschiedlich sind. Das Display soll zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern genutzt werden, die sich in unmittelbarer Umgebung auf ungefähr der gleichen Höhe wie das Display befinden. Eine erste Abschätzung

der Sichtbarkeit der Inhalte unter verschiedenen Umgebungsbedingungen wird im folgenden Kapitel betrachtet.

Anschließend wird das Display hinsichtlich der Leuchtdichte untersucht. Die Leuchtdichte für verschiedene Dimmstufen des Displays wird aufgenommen, um daraus eine Dimmkurve zu bestimmen. Diese wird Kapitel 5.2.4 verwendet, um das Display adaptiv in Abhängigkeit der Umgebungshelligkeit anzusteuern.

5.2.3 AUFBAU AM FAHRZEUG

Für eine Abschätzung unter realen Bedingungen wird das Display an die Fahrzeugfront des Versuchsfahrzeuges des Lichttechnischen Institutes montiert. Die Energieversorgung ist über den im Fahrzeug integrierten Wechselrichter gewährleistet. Die Ansteuerung erfolgt über den im Fahrzeug verbauten Versuchsrechner. Damit lassen sich beliebige Inhalte an der Fahrzeugfront darstellen, siehe Abbildung 5.43.



Abbildung 5.43: Textbasierte Anzeige zur Kommunikation des Verzichts der Vorfahrt des Fahrzeuges.

Zu betrachten sind neben textbasierten Anzeigen vor allem die Kommunikation mit Piktogrammen und Symbolen. Diese erweisen sich als sehr geeignet zur Kommunikation kurzer Nachrichten, da einige bekannte Symbole einen hohen Wiedererkennungswert aufweisen und durch die weite Verbreitung in Social Media, Messengerdiensten oder auch im Arbeitsleben ebenfalls mit bestehenden Aussagen oder Inhalten verknüpft sind [34].

Die Symbolkommunikation kann somit sehr geeignet sein, um im Straßenverkehr Nachrichten zu übermitteln und unübersichtliche Situationen zu lösen. Damit dies wirksam erfolgen kann, müssen die Inhalte so dargeboten werden, dass diese unabhängig von äußeren Einflüssen erkennbar sind und auch trotz gewisser Störungen den Empfänger erreichen.

Damit das menschliche Auge einen Reiz detektieren kann, muss dieser eine gewisse Größe im Sichtfeld einnehmen, als **Sehwinkel**, und sich deutlich vom Umfeld abheben, als **Kontrast**. Zur Untersuchung dieser beiden Größen ist es möglich, die Inhalte auf dem Display entsprechend zu verändern.

Die Größe der Inhalte bestimmt ebenfalls, mit welcher Auflösung ein Symbol dem Empfänger präsentiert werden kann. Für eine Darstellung mit Kantenlänge 10 cm ergeben sich ca. $25 \times 25 = 225px$. Die maximal darstellbare Symbolgröße beträgt $128 \times 128 = 16384px$, bei einer Kantenlänge von 0,5 m.

Eine erste Abschätzung der Größe für die dargestellten Symbole ergibt sich aus der DIN 1450 [68]. Diese Norm beschreibt im Allgemeinen, wie Schriften leserlich darstellbar sind. Unter anderem wird Bezug darauf genommen, wie die Größe von Schrift in Abhängigkeit der Lesedistanz zu gestalten ist, um noch gut erkenn- und wahrnehmbar zu sein. Für textbasierte Inhalte auf dem Display lässt sich diese Abschätzung direkt übertragen, für Symbole stellt sie eine hinreichend gute Näherung dar. Ausgehend davon wird eine Studie zur Erkennbarkeit symbolbasierter Nachrichten in Abhängigkeit der Zeichengröße entworfen.

Da vor allem innerstädtische Szenarien von Interesse sind, ergeben sich, wie zuvor schon beschrieben, Lesedistanzen von ca. 5 – 25 m. Aus der DIN 1450 ergibt sich somit für beispielsweise das „X“ eine Versalhöhe von 17,5 – 87,5 mm. Erste Betrachtungen im Rahmen einer internen Expertenstudie haben jedoch gezeigt, dass Schrift und

Symbole auf dem Display bei oben genannten Betrachtungsabständen größer dargeboten werden müssen, um lesbar zu sein.

Ursächlich dafür ist, dass durch die leuchtende Darstellung der Inhalte keine scharfen Kanten darstellbar sind und diese verschwommen erscheinen, vgl. Abbildung 5.44. Durch eine Anpassung der Versalhöhe auf 125 – 150 mm wird die Sichtbarkeit verbessert. Auch eine Abhängigkeit von der Umgebungsbeleuchtung wird festgestellt, im Weiteren aber nicht näher untersucht.

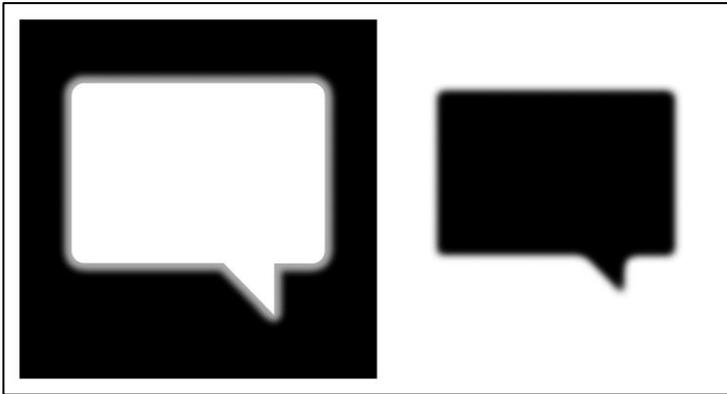


Abbildung 5.44: Darstellung von Inhalten als Positiv-Kontrast (links) und als Negativ-Kontrast (rechts).

Bei dunkleren Umgebungsbedingungen, bspw. Dämmerung oder Nacht, muss das Display nicht vollkommen ausgesteuert sein, um gut lesbare Inhalte zu erzeugen. Durch die vergleichsweise niedrigere Symbolleuchtdichte ist der Effekt der verschwimmenden

Kanten nicht so stark ausgeprägt und das Symbol auch mit kleinerer Versalhöhe noch gut lesbar.

Auch bei Tageslicht hat sich gezeigt, dass die auf dem Display dargestellten Inhalte noch gut erkennbar sind. Dabei wurden bewusst Begutachtungen bei bewölktem Himmel, siehe Abbildung 5.45 und im Sommer während der Mittagszeit, siehe Abbildung 5.46, bei voller Sonneneinstrahlung und klarem Himmel angestrebt.



Abbildung 5.45: Textbasierte Nachricht bei bewölktem Himmel.



Abbildung 5.46: Nachricht trotz hochstehender Sonne in den Sommermonaten noch gut sichtbar.

Hierfür ist jedoch auch die Leuchtdichte der Nachrichten entsprechend anzupassen, um eine ausreichend gute Lesbarkeit zu erzeugen.

Daraus lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass die Symbolleuchtdichte an die Umgebungshelligkeit angepasst sein muss. Somit wird gewährleistet, dass die Inhalte auch bei Tag noch gut lesbar sind, bei Nacht jedoch keine Effekte wie Blendung auftreten können.

Im Folgenden wird ein einfaches Modell zur Ansteuerung des Displays aufgestellt.

5.2.4 ABLEITUNG EINES MODELLS ZUR ANSTEUERUNG

Als Regelgröße für das Modell wird der zuvor beschriebene Phantomfaktor LR_{10} verwendet. Das heißt, die auf dem Display eingestellte Objektleuchtdichte wird in Abhängigkeit der Umgebungshelligkeit so verändert, dass stets ein konstanter Kontrast wahrnehmbar ist.

Die durch die Umgebung erzeugte Leuchtdichte $L_{Phantom}$ auf dem Display, auch Phantomleuchtdichte genannt, lässt sich anhand der Beleuchtungsstärke $E_{Display}$ auf der Displayoberfläche sowie dem Reflexionsgrad ρ dieser abschätzen [26].

$$L_{Phantom} = \frac{E_{Display} \cdot \rho}{2\pi} \quad (5.9)$$

Die resultierende Leuchtdichte wird den Leuchtdichten des Displays beaufschlagt. Unter Zuhilfenahme von Formel (5.4) lässt sich damit der Kontrast der angezeigten Nachricht berechnen. Da die Leuchtdichte des ausgeschalteten Displays in guter Näherung als Null betrachten werden kann, ist lediglich die Phantomleuchtdichte im Nenner enthalten. Die einzustellende Objektleuchtdichte L_{Objekt} bei konstantem Kontrast bzw. Phantomfaktor LR_{10} ergibt sich zu:

$$L_{Objekt} = LR_{10} \cdot \frac{E_{Display} \cdot \rho}{2\pi} \quad (5.10)$$

Zur Vermeidung von Nichtlesbarkeit in dunkler Umgebung wird eine Mindestleuchtdichte von 10 cd/m^2 definiert. Bei den Untersuchungen in Kapitel 5.1 hat sich dieser Wert als gut erkennbar herausgestellt. Die maximale Objektleuchtdichte ist durch die Technologie limitiert. Im zuvor vermessenen Display konnte entgegen der

Herstellerangaben lediglich eine maximale Leuchtdichte bei voller Aussteuerung von 2500 cd/m^2 eingestellt werden.

Eine darüberhinausgehend Abschätzung konnte aufgrund limitierter Technik bisher nicht erfolgen.

Die resultierende Kurve ist Abbildung 5.47 zu entnehmen.

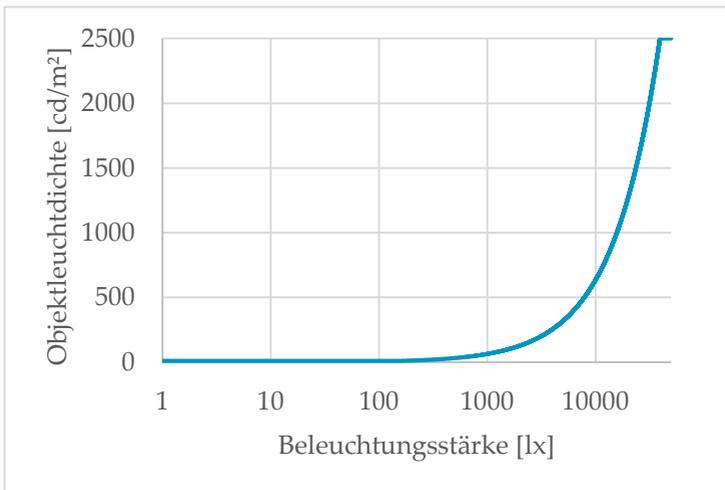


Abbildung 5.47: Kurve zur Ansteuerung des Displays. Die Objektleuchtdichte ist über der Beleuchtungsstärke auf der Displayoberfläche aufgetragen. Die Objektleuchtdichte beträgt mindestens 10 cd/m^2 .

5.3 LICHTBAND

Eine Kommunikation über ein zweidimensionales Display bzw. Monitor funktioniert somit für verschiedene Anwendungen im Straßenverkehr. Die Anzeige von Nachrichten auf Grundlage verschiedener Symbole bietet außerdem den Vorteil, dass diese aufgrund ihrer speziellen Form einen hohen Wiedererkennungswert aufweisen und somit bereits frühzeitig erkennbar sind.

Nachteilig bei der Symbolkommunikation ist jedoch, dass das System zur Anzeige eine gewisse Größe und somit einen entsprechenden Bauraum beansprucht, was gerade bei Fahrzeugen mit eher sportlicher Front zu Problemen führt. Des Weiteren bietet ein Display die Möglichkeit, dass beliebige Inhalte darauf anzeigbar sind. Dieser vermeintliche Vorteil könnte jedoch in Zukunft, durch eine schrittweise Aufweichung bestehender Vorschriften dazu führen, dass das Fahrzeug als mobile Werbetafel missbraucht werden könnte.

Aus diesen sowie weiteren, unter anderem sicherheitsrelevanten Gründen, wird ein weiteres System zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern untersucht. Als Kommunikationsanzeige wird ein Lichtband am Fahrzeug verwendet. Als Lichtband wird eine Aneinanderreihung mehrerer Pixel in einer Dimension bezeichnet. Je nach Ausführung des Lichtbandes ist die Aussteuerung der Pixel veränderbar, sodass verschiedene Helligkeitsstufen darstellbar sind. Es ist zusätzlich möglich, dass alle Pixel des Lichtbandes nicht nur mit einheitlicher Helligkeit ansteuerbar, sondern auch separat

adressierbar sind, vgl. Abbildung 5.48. Die Erzeugung eines Kontrastes sowohl im Orts- als auch im Frequenzraum ist dadurch gegeben.



Abbildung 5.48: Exemplarische Darstellung eines LED-Bandes, bei dem die Pixel einzeln adressiert mit unterschiedlicher Helligkeit sind.

Durch die Verwendung verschiedener einfarbiger LEDs oder RGB-LEDs als Pixel, sind auch Farbkontraste darstellbar.

Die Untersuchung des Lichtbandes zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern soll hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit und Unterscheidbarkeit verschiedener dargestellter Nachrichten stattfinden. Dies erfolgt im Rahmen einer simulativen Studie.

Der Proband wird zunächst über einen Text in die Szene instruiert. Die Absicht des kommunizierenden Fahrzeuges geht daraus hervor. Innerhalb der Studie schaut der Proband auf eine virtuelle Straßenszene, in der ein Fahrzeug auf den Probanden zufährt und mittels verschiedener Animationen bzw. Muster auf dem Lichtband versucht, eine bestimmte Nachricht zu kommunizieren. Das Fahrzeug mit der angezeigten Nachricht ist dabei als kurze Videosequenz implementiert. Pro Muster wird eine Videosequenz gezeigt.

Nach jeder Videosequenz werden dem Probanden bestimmte Aussagen vorgegeben vgl. **Abbildung 5.49**. Aufgabe des Probanden ist es, anzugeben, wie stark er diesen Aussagen zustimmt oder diese auch ablehnt. Der Proband entscheidet auf einer fünfstufigen Likert-Skala, inwieweit er dieser Aussage zustimmt

Eine der vorgegebenen Aussagen lautet: „Ich habe verstanden, was das autonome Fahrzeug mir mitteilen möchte.“. Auf diese Aussage wird im Folgenden näher eingegangen. Weitere, für die Bearbeitung jedoch irrelevante Aussagen, sind beispielsweise: „Ich möchte das Muster gerne im Verkehr der Zukunft sehen.“ oder „Durch das Muster wurde die Situation eindeutig gelöst.“.

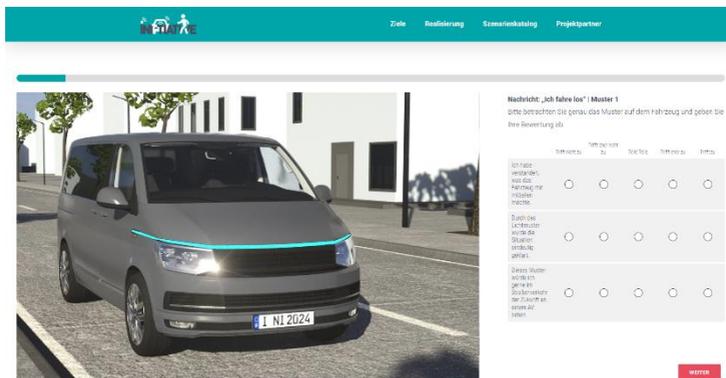


Abbildung 5.49: Exemplarische Darstellung der Inhalte der Videostudie. Im Videoplayer wird für jedes Muster eine Sequenz gezeigt, die Aussagen auf der rechten Seite können über Anklicken bewertet werden.

Insgesamt wurden den Probanden 13 Situationen randomisiert angeboten. Diese stammten alle aus dem im INITIATIVE-Projekt definierten Szenarien- bzw. Nachrichtenkatalog. Je nach Situation gab es bis zu drei Codierungsmöglichkeiten der Nachricht.

Insgesamt nahmen 24 Probanden an der Studie teil. Eine Erhebung personenbezogener Daten wurde nicht vorgenommen. Die Ergebnisse werden im Folgenden auszugsweise präsentiert und diskutiert.

Die Ergebnisse der Nachrichten „Ich halte an“, vgl. Abbildung 5.50, und „Ich bleibe stehen“, vgl. Abbildung 5.51 sind hierbei zur Anzeige des Verzichts geeignet. Die Ergebnisse sind jeweils für die Bewertung der Aussage „Ich habe verstanden, was das autonome Fahrzeug mir mitteilen möchte.“ dargestellt. Die beiden Items links und rechts der neutralen Mitte der Likert-Skala werden jeweils zusammengefasst.

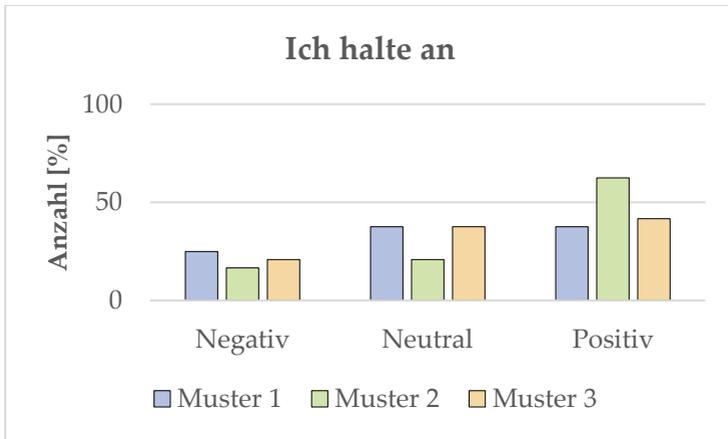


Abbildung 5.50: Ergebnis der Befragung der Probanden zur Nachricht „Ich halte an“. Es standen drei Muster zur Auswahl, für jedes wurde angegeben, inwieweit der Proband die Nachricht verstanden hätte.

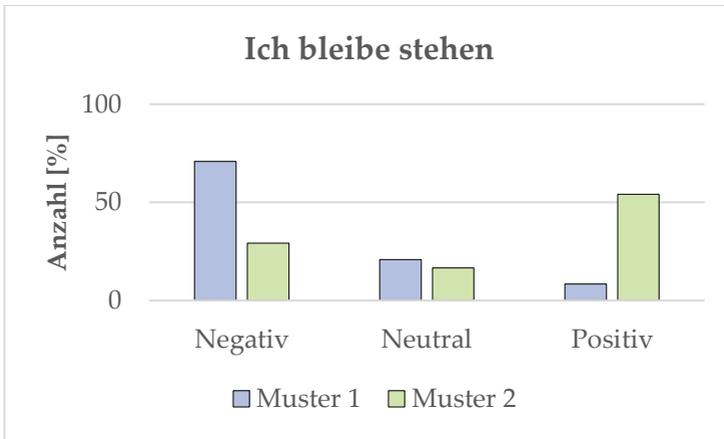


Abbildung 5.51: Ergebnis der Befragung der Probanden zur Nachricht „Ich bleibe stehen“. Es standen zwei Muster zur Auswahl, für jedes wurde angegeben, inwieweit der Proband die Nachricht verstanden hätte.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass es bei manchen Nachrichten zwar erkennbare Unterschiede in der Bewertung der Muster gegeben hat, überwiegend sind jedoch keine Unterschiede feststellbar.

Auf Nachfrage gaben die Probanden an, dass die Codierung der Nachrichten sich sehr gleichen und eine eindeutige Unterscheidung nicht möglich ist.

Als Erkenntnis daraus lässt sich ableiten, dass das LED-Band zwar die Möglichkeit bietet, unterschiedliche Nachrichten zu codieren, diese in der Realität jedoch nicht ausreichend unterscheidbar und uneindeutig sind.

5.4 SIGNALLEUCHE

Aus diesem Grund wurde die Wirksamkeit einer Signalleuchte zur Anzeige des Verzichts eines automatisierten Fahrzeuges auf die eigene Vorfahrt nachfolgend untersucht. Andere Studien haben gezeigt, dass eine Positionierung einer Kommunikationsleuchte mittig am oberen Ende der Windschutzscheibe am sinnvollsten ist [69]. Andere Verkehrsteilnehmer richten ihre Aufmerksamkeit vermehrt auf diesen Bereich, da sie dort eine Information bzw. Kommunikation erwarten.

Für die folgenden Untersuchungen wird daher eine cyan-farbige Signalleuchte, nachfolgend als Cyanleuchte bezeichnet, im Fahrzeug im Bereich des Rückspiegels verbaut. Diese Signalleuchte wird mit verschiedenen Signalbildern bespielt, die den Verzicht des autonomen Fahrzeuges anzeigen sollen. In einer zweistufigen Studie wird zunächst untersucht, welche grundsätzlichen Betriebsmodi möglich sind und anschließend, ob die Kommunikation mit der Signalleuchte einen messbaren Mehrwert auf den Verkehrsfluss in besonderen Verkehrslagen hat.

5.4.1 VORUNTERSUCHUNG ZUM STUDIENDESIGN

Für die Durchführung einer Probandenstudie zur Untersuchung der Cyanleuchte wird zunächst eine Voruntersuchung zur Evaluierung des Studiendesigns durchgeführt. Ziel ist es, die grundlegenden

Faktoren, wie Erkennbarkeit des Systems oder den Einfluss der Fahrdynamik des Versuchsfahrzeuges abzuschätzen. Die Voruntersuchung wird, um diese Faktoren isoliert zu betrachten, in abgeschlossener Versuchsumgebung auf dem Gelände des Campus Süd des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt.

Für die Situation wird eine gerade Strecke ohne Fußgängerüberweg mit Querungssituation ausgewählt. Das Versuchsfahrzeug fährt einen Rundkurs und biegt auf die Strecke ein, die ein Fußgänger überqueren möchte, vgl. Abbildung 5.52.



Abbildung 5.52: Versuchsstrecke für die Durchführung der Voruntersuchung auf dem Campus Süd des KIT. Der Rundkurs wird durch die Pfeile angedeutet, das rote Kreuz markiert die Position des Probanden und die cyan-farbige Fläche die Strecke, auf der die Signalleuchte kommuniziert [70].

Das Fahrzeug schaltet in einer Entfernung von 50 m zum Fußgänger die Cyanleuchte zu, um dem Fußgänger den Verzicht auf die eigene

Vorfahrt anzuzeigen. In einer Entfernung von 30 m vor dem Probanden beginnt das Fahrzeug zu verzögern.

Aufgabe des Probanden ist es, zu entscheiden, ob dieser die Fahrbahn vor dem kommunizierenden Fahrzeug überquert. Um diese Entscheidung anzuzeigen, soll dieser einen Schritt vom Gehweg auf die Fahrbahn setzen.

Andere Studien haben bereits einen deutlichen Einfluss des Bremsverhaltens des Fahrzeuges auf die Entscheidung zu queren gezeigt, deshalb wird neben verschiedenen Signalbildern auf der Cyanleuchte auch das Bremsverhalten verändert und als unabhängige Variable definiert.

Es werden drei verschiedene Bremsverhalten untersucht, **aggressives**, **moderates** und **passives** Abbremsen. Beim aggressiven Abbremsen fängt das Fahrzeug erst sehr spät an zu bremsen, ca. 10 m vor dem Probanden und kommt dann abrupt zum Stehen. Beim moderaten Bremsen fängt das Fahrzeug in einer Entfernung von ca. 25 m vor dem Probanden an kontinuierlich bis zum Stillstand abzubremesen. Für das passive Abbremsen beginnt das Fahrzeug bereits in einer Entfernung von ca. 30 m stark abzubremesen und nähert sich dem Probanden dann nur noch mit Schrittgeschwindigkeit.

Die Signalleuchte wird mit vier verschiedenen Signalbildern bespielt, vgl. Abbildung 5.53.

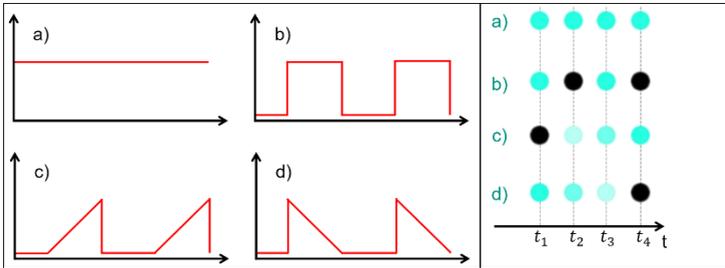


Abbildung 5.53: Ansteuerung der Cyanleuchte mit vier unterschiedlichen Signalbildern a)-d).

Signalbild a) stellt ein dauerhaftes Leuchten mit konstanter Helligkeit während der Darbietungsphase dar. Ein alternierendes Blinken mit 2 Hz, in Anlehnung an die Frequenz des Fahrtrichtungsanzeigers (0,5-2 Hz) ist durch Signalbild b) gegeben [71]. Die Signalbilder c) bzw. d) stellen ein lineares hoch- bzw. runterdimmen dar.

Daraus ergeben sich 12 verschiedene Situationen, die dem Probanden in randomisierter Reihenfolge, zur Vermeidung von Positionseffekten, dargeboten werden. Da sich bei ersten Probeläufen zeigte, dass die Probanden schnell begriffen, dass das Fahrzeug immer bremsen bzw. anhalten wird und diese dann durchweg angaben, die Straße zu überqueren, wurden drei Fahrten ergänzt, in denen das Fahrzeug durchgefahren ist. Bei diesen Fahrten war die Signalleuchte dann dauerhaft ausgeschaltet. Insgesamt ergaben sich somit 15 Versuchsdurchgänge für die Durchführung der Probandenstudie.

Die Studie wurde im November 2022 mit insgesamt 13 Probanden durchgeführt. Hierbei handelte es sich um Teilnehmer zwischen 19-

27 Jahren. Alle Fahrten wurden tagsüber bei Sonnenschein durchgeführt.

Die Probanden wurden zunächst schriftlich und anschließend mündlich durch die Versuchsleitung über den Ablauf der Studie instruiert. Nach dieser Instruktion erfolgten die 15 Versuchsdurchgänge, die die Probanden jeweils direkt bewerten sollten. Die Angaben werden durch die Versuchsleitung aufgenommen und dokumentiert.

Da für die Durchführung der Studie kein echtes automatisiertes Fahrzeug zur Verfügung stand, wurde die autonome Fahrfunktion durch ein sogenanntes Wizard-Of-Oz-Design simuliert [72]. Der Fahrer trägt hierbei einen schwarzen Ganzkörperanzug, sodass dieser von außenstehenden Verkehrsteilnehmern nicht erkennbar ist und der Eindruck eines selbstfahrenden Fahrzeuges entsteht.

Nach der Studiendurchführung werden die aufgenommenen Daten mittels verschiedener Methoden ausgewertet. Auch die Aussagen der Probanden während der Studiendurchführung werden berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass die überwiegende Mehrheit der Probanden die Straße in den Bremssituationen überqueren würde. Auf Nachfrage gaben die meisten jedoch an, dass sie ihre Entscheidung aufgrund des Fahrverhaltens des Versuchsfahrzeuges getroffen haben. Eine eindeutige Aussage, dass durch die Signalleuchte der Verzicht des Fahrzeuges verständlich angezeigt wurde, lässt sich daraus nicht ableiten.

Des Weiteren gab ein Großteil der Probanden an, dass sie das blinkende Signalbild besser erkennen konnten als das statische. Einen Unterschied zwischen den jeweiligen dynamischen Signalbildern wurde von so gut wie keinem der Probanden bemerkt.

Für die Planung der Hauptstudie wird das Szenario daher so angepasst, dass das autonome Fahrzeug langsam in die Situation fährt, sodass die Fahrdynamik keinen Einfluss auf die Entscheidung des Probanden haben sollte. Weiter werden die dynamischen Signalbilder zusammengefasst, sodass lediglich eines dem Probanden dargeboten wird.

5.4.2 HAUPTSTUDIE

Mit der Hauptstudie sollen die Kommunikationsmöglichkeiten der Cyanleuchte in abgewandeltem Szenario untersucht und aufgezeigt werden. Mit den zuvor gewonnenen Erkenntnissen wird der Versuch dahingehend verändert, dass sich der Proband als Fahrradfahrer auf einer schmalen Seitenstraße befindet und links auf eine befahrene Hauptstraße abbiegen möchte.

Von dessen rechter Seite nähert sich das autonome Fahrzeug mit langsamer Geschwindigkeit und zeigt an, dass es in die Seitenstraße einbiegen möchte, zu sehen in Abbildung 5.54.

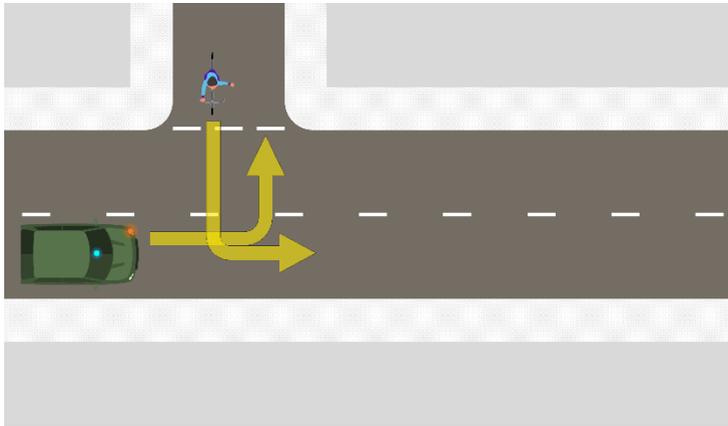


Abbildung 5.54: T-Kreuzung mit autonomem Fahrzeug, das in die Seitenstraße einbiegen möchte. Durch die Verengung der Seitenstraße, ist ein Verzicht des autonomen Fahrzeuges für beide beteiligten geschickter.

Das autonome Fahrzeug hätte in dieser Situation die Vorfahrt und dürfte in die Seitenstraße einfahren, bevor der Fahrradfahrer losfährt. Da die Seitenstraße etwas schmaler ist, würde das autonome Fahrzeug nur sehr nahe an dem Fahrrad vorbeifahren können. Aus diesem Grund verzichtet das autonome Fahrzeug auf die eigene Vorfahrt. Dies stellt hierbei keinen notwendigen Verzicht dar.

Der Verzicht wird über die Signalleuchte angezeigt, zu sehen in Abbildung 5.55. Zusätzlich wird in einigen Signalbildern das Fernlicht benutzt.

Der Fahrtrichtungsanzeiger ist immer zugeschaltet, um die Abbiegeabsicht anzuzeigen.



Abbildung 5.55: Verzichtsanzeige kommuniziert durch das Aufleuchten der Cyanleuchte am autonomen Fahrzeug.

Zur Verzichtsanzeige werden dem Probanden insgesamt fünf Signalbilder dargeboten. Diese ergeben sich aus Kombinationen der Cyanleuchte und den Scheinwerfern. Weitere zwei Signalbilder wurden in Situationen gezeigt, in denen das Fahrzeug nicht verzichtet hat.

Zusätzlich zu den Situationen, in denen das autonome Fahrzeug verzichtet, werden zwei Situationen implementiert, in denen das Fahrzeug nicht verzichtet und vorsichtig in die Seitenstraße einfährt. Die Durchführung der vorherigen Studie hat gezeigt, dass dies notwendig ist, um eine Verfälschung der Daten zu vermeiden.

Da die Cyanleuchte nach SAE J3134 zur Kennzeichnung des autonomen Fahrstatus gedacht ist, wird dies ebenfalls in den Signalbildern berücksichtigt und die Signalleuchte leuchtet statisch bzw. dauerhaft. Nach heutigem Stand wird der Verzicht eines manuell geführten

Fahrzeuges häufig über das Geben der Lichthupe angezeigt [28]. Diese Möglichkeit wird ebenfalls als Situation umgesetzt, einmal mit ausgeschalteter Cyanleuchte und einmal mit Statusleuchte, als dauerhaft angeschalteter Cyanleuchte.

Die Lichthupe ist ein bewährtes Mittel und die vorherige Studie hat gezeigt, dass dynamische Signalbilder gut erkannt werden, deshalb wird mit der Cyanleuchte ebenfalls eine Lichthupe, also ein zweimaliges, kurzes Aufleuchten umgesetzt.

In den Situationen ohne Verzicht sind einmal alle Leuchten ausgeschaltet und einmal nur die Signalleuchte als Statusleuchte dauerhaft zugeschaltet.

Insgesamt ergeben sich sieben verschiedene Signalbilder, die dem Probanden in randomisierter Reihenfolge präsentiert werden sollen, beschrieben in **Tabelle 5.5**.

Tabelle 5.5: Übersicht der verschiedenen Signalbilder zur Kommunikation

Situation	Cyanleuchte	Scheinwerfer	Verzicht
1	AUS	AUS	NEIN
2	AUS	AUS	JA
3	AUS	Dynamisch	JA
4	Dynamisch	AUS	JA
5	Statisch	AUS	JA
6	Statisch	Dynamisch	JA
7	Statisch	AUS	NEIN

Dabei wird jede Situation mit zusätzlich zwei Wiederholungen gezeigt, sodass sich insgesamt 21 Situationen ergeben, die der Proband absolvieren muss.

Die Studie wird ebenfalls auf einem abgeschlossen Testgelände durchgeführt, um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch andere Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Der Rundkurs wurde auf dem Gelände des Campus Ost des KIT aufgebaut, vgl. Abbildung 5.56.

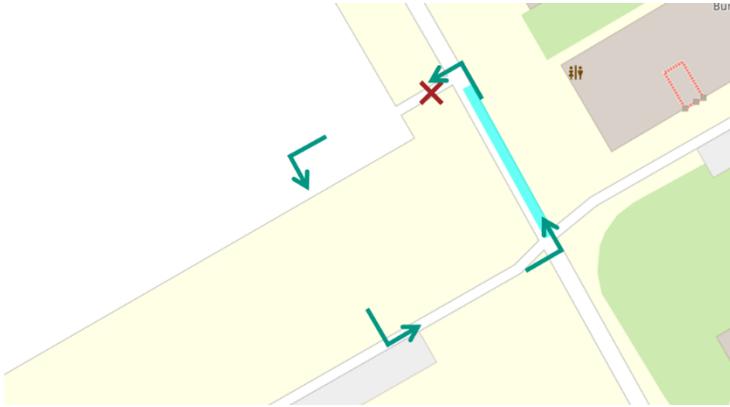


Abbildung 5.56: Versuchsstrecke für die Durchführung der Voruntersuchung auf dem Campus Ost des KIT. Der Rundkurs wird durch die Pfeile angedeutet, das rote Kreuz markiert die Position des Probanden mit dem Fahrrad. Die cyan-farbige Fläche die Strecke, auf der die Signalleuchte kommuniziert [70].

Als Messgröße wird die Zeit verwendet, zwischen dem Aussenden der Nachricht durch das autonome Fahrzeug und dem Losfahren des Probanden mit dem Fahrrad.

Die Signalbilder werden über das Durchfahren einer Lichtschranke ausgelöst. Gleichzeitig beginnt der Messvorgang der Zeit. Sobald sich der Proband entschieden hat und ebenfalls losfährt, wird der Kontakt einer zweiten Lichtschranke unterbrochen und die Zeitmessung angehalten.

Um den Eindruck eines echten autonomen Fahrzeuges zu erwecken, wird auch hier das Wizard-Of-Oz-Design verwendet. Der Fahrer

bekommt in randomisierter Reihenfolge vorgegeben, ob das Fahrzeug auf die Vorfahrt verzichtet oder nicht. Zum Schutz der Probanden sollte das Fahrzeug, in Situationen ohne Vorfahrtsverzicht, nur mit moderater Geschwindigkeit abbiegen.

Insgesamt haben 20 Probanden an der Studie teilgenommen. Davon waren 12 männlich und 8 weiblich. Das Durchschnittsalter lag bei 25 Jahren.

Die Studie wurde im Oktober 2023 bei Tag durchgeführt. Alle Versuche fanden zwischen 14.00 und 17.00 Uhr bei ähnlichen Witterungsbedingungen statt.

Nach einer schriftlichen und mündlichen Instruktion der Probanden durch den Versuchsleiter beginnt der aktive Teil der Studiendurchführung.

5.4.3 ERGEBNISSE

Die erhobenen Messdaten sollen Aufschluss darüber geben, ob die Cyanleuchte grundsätzlich geeignet ist, den Verzicht anzuzeigen und wie schnell dies durch die Probanden verstanden wird.

Zunächst werden die Mittelwerte aus den Messwiederholungen gebildet und die Daten als Boxplot aufgetragen, vgl. Abbildung 5.57.

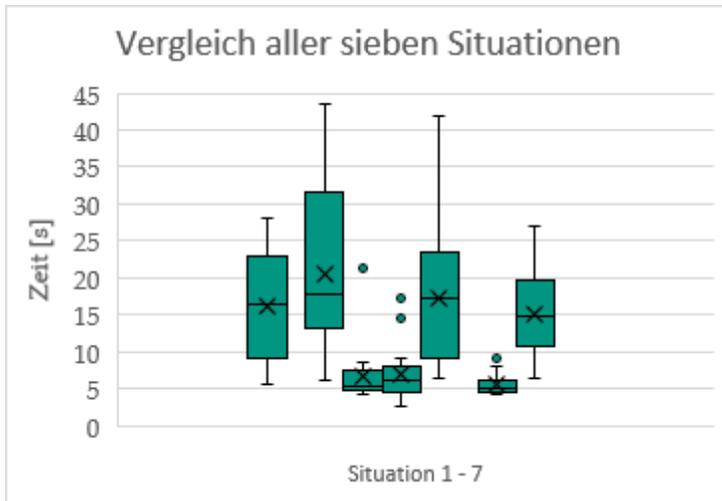


Abbildung 5.57: Darstellung der Fahrten mit und ohne Lichthupe zur Anzeige des Verzichts. Die Daten werden als Boxplot aufgetragen, sodass die Mittelwerte und Streubreiten gut miteinander vergleichbar sind.

Hier ist schnell ersichtlich, dass einige Signalbilder besonders kurze Reaktionszeit bei den Probanden hervorrufen konnten. Die Boxen weisen eine geringe Höhe auf, was zeigt, dass sehr kleine Streubreiten innerhalb der aufgenommenen Daten vorliegen.

Zur tiefergehenden Untersuchung der Daten wird zunächst der Unterschied zwischen der statischen und der dynamischen Darbietung der Signalleuchte betrachtet. In Situation 5 wird die Signalleuchte dauerhaft angeschaltet, in Situation 4 wird mit der Signalleuchte eine Lichthupe gegeben. Die resultierenden Reaktionszeiten sind in Abbildung 5.58 dargestellt.

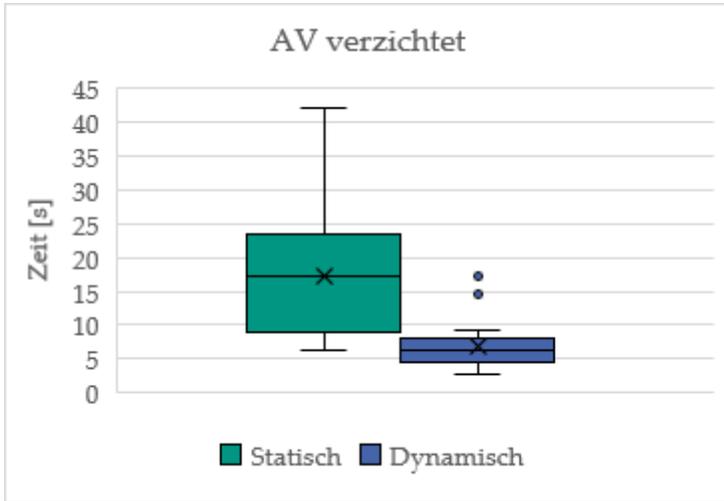


Abbildung 5.58: Vergleich der Reaktionszeiten der Fahrten mit statischer und mit dynamischer Verzichtsanzeige durch die Cyanleuchte bzw. die Scheinwerfer.

Bei Betrachtung der beiden Boxen zeigt sich ein sichtbarer Unterschied, der nachfolgend mit statistischen Methoden quantifiziert wird.

Die Nullhypothese H_0 für die Auswertung wird wie folgt formuliert:

„Die Dynamik der Anzeige auf der Cyanleuchte hat keinen Einfluss auf die Reaktionszeiten der Probanden.“

Die Alternativhypothese H_1 lautet somit:

„Die Dynamik der Anzeige auf der Cyanleuchte hat einen Einfluss auf die Reaktionszeiten der Probanden.“

Über einen t-Test für unabhängige Stichproben werden die Mittelwerte miteinander verglichen und untersucht, ob es einen statistischen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen gibt [73], [74].

Bei 20 teilnehmenden Probanden ergeben sich für die Auswertung 19 Freiheitsgrade. Anhand dieser lässt sich aus Tabellen ein kritischer Wert von 2,093 für ein Signifikanzniveau α von 0,05 ablesen [75]. Dieser Wert ist gleich für alle folgenden Auswertungen.

Die Auswertung ergibt einen p-Wert $\ll \alpha$ sowie eine t-Statistik von 4,62 größer als der kritische Wert. Somit kann von einem signifikanten Unterschied gesprochen werden. Ein zufallsbedingtes Ergebnis ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auszuschließen. Dies führt dazu, dass die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen wird. Dies bedeutet, dass die Dynamik in der Darbietung einen deutlich messbaren Einfluss auf die Reaktionszeit der Probanden hat.

Zur weiteren Validierung der Ergebnisse wird die Effektstärke nach Cohen, das sogenannte *Cohen's d* berechnet [76]. Hier ergibt sich ein Wert von 1,03, was für einen starken Effekt spricht.

Besonders auffällig sind die Boxen der Situationen 3, 4 und 6. Diese repräsentieren Situationen, in denen durch das autonome Fahrzeug eine Lichthupe, sowohl mit den Scheinwerfern als auch mit der Cyanleuchte, als Signal gegeben wurde.

Daher wird im Folgenden der Unterschied zwischen den Verzichtssituationen mit und ohne Lichthupe untersucht. Als Nullhypothese H_0 wird folgende formuliert:

„Es gibt keinen Unterschied in der Reaktionszeit zwischen der Kommunikation mit dynamischen und statischen Signalbildern.“

Wie in Abbildung 5.59 dargestellt, ist der Unterschied in der Reaktionszeit zwischen beiden Gruppen eindeutig zu sehen.

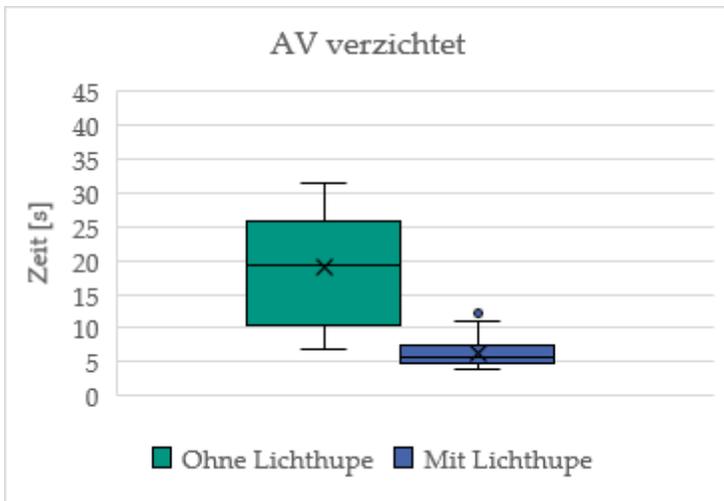


Abbildung 5.59: Vergleich der Reaktionszeiten der Fahrten mit und ohne Lichthupe als Verzichtsanzeige durch die Cyanleuchte bzw. die Scheinwerfer.

Auch für diese Daten erfolgt eine Überprüfung mittels t-Test für unabhängige Stichproben. Die Auswertung ergibt einen p-Wert $\ll \alpha$

sowie eine t-Statistik von $|6,85|$ und damit ebenfalls größer als der kritische Wert 2,093. Die Nullhypothese ist hier ebenfalls zu verwerfen. Das Geben einer Lichthupe bewirkt somit eine signifikant verkürzte Reaktionszeit der Probanden.

Für *Cohen's d* ergibt sich ein Wert von 1,53, was für einen starken Effekt spricht.

Somit ist die Frage zulässig, ob zur Verzichtsanzeige überhaupt eine zusätzliche lichttechnische Einrichtung am Fahrzeug notwendig ist, oder ob dies nicht bereits durch die Scheinwerfer ausreichend umsetzbar ist.

Die Situationen 4 bzw. 5, in denen ausschließlich mit der Signalleuchte bzw. mit den Scheinwerfern eine Lichthupe gegeben wurde, sind daher Gegenstand der folgenden Auswertung. Abbildung 5.60 zeigt anschaulich, dass die Boxen eine sehr ähnliche Form aufweisen auch die Mittelwerte sich nur geringfügig unterscheiden. Für die Lichthupe mittels Scheinwerfer liegt der Mittelwert der Reaktionszeit bei 6,6 s, für die Lichthupe mittels Cyanleuchte bei 6,89 s.

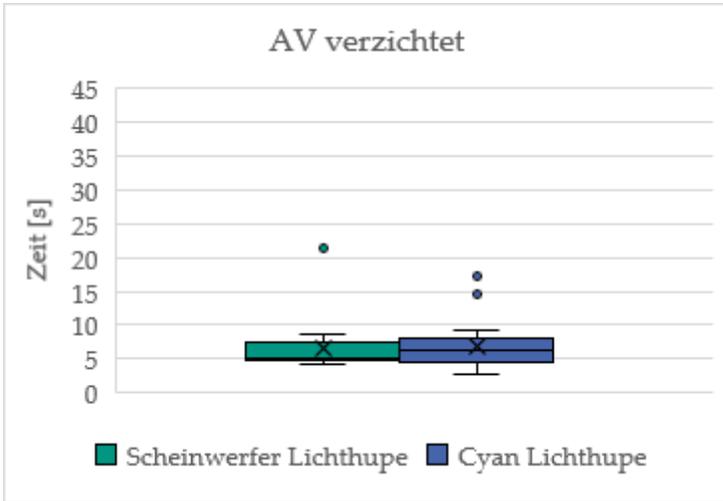


Abbildung 5.60: Vergleich der Reaktionszeiten der Fahrten mit Verzichtsanzeige als Scheinwerfer-Lichthupe und Cyanleuchte-Lichthupe.

Für die statistische Überprüfung wird folgende Nullhypothese formuliert:

„Es gibt keinen Unterschied in der hervorgerufenen Reaktionszeit zwischen der Darbietung der Lichthupe mit den Scheinwerfern oder der Cyanleuchte.“

Zur Überprüfung wird der t-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt. Der p-Wert ist mit $0,78 > \alpha$ und die t-Statistik von $|0,28|$ kleiner als der kritische Wert. Somit liegt kein signifikanter Unterschied vor und die Nullhypothese wird angenommen.

Die Auswertung zeigt also, dass zur Verzichtsanzeige nicht zwangsläufig eine zusätzliche Signalleuchte zu verbauen ist. Es ist zu erwarten, dass nach SAE J3134 die geforderte Statusleuchte jedoch mit erhöhter Wahrscheinlichkeit auch in Deutschland bzw. Europa als Stand der Technik Anwendung finden wird, weshalb eine weitere Untersuchung angestellt wird.

Es ist zu untersuchen, ob durch den mit der Cyanleuchte gegebenen Status ein Verzicht signalisiert wird, obwohl dies nicht beabsichtigt ist. Dies wird durch den Vergleich der Situationen 1 und 7 realisiert. In diesen hat das autonome Fahrzeug nicht auf die eigene Vorfahrt verzichtet und ist in die Seitenstraße eingefahren.

Die resultierenden Zeiten sind in Abbildung 5.61 dargestellt. Es ist dabei zu beachten, dass das Fahrzeug in die Seitenstraße eingebogen ist, bevor der Proband losfährt. Daraus ergibt sich ein Offset der Zeit, die für beide Situationen gleich groß ist.

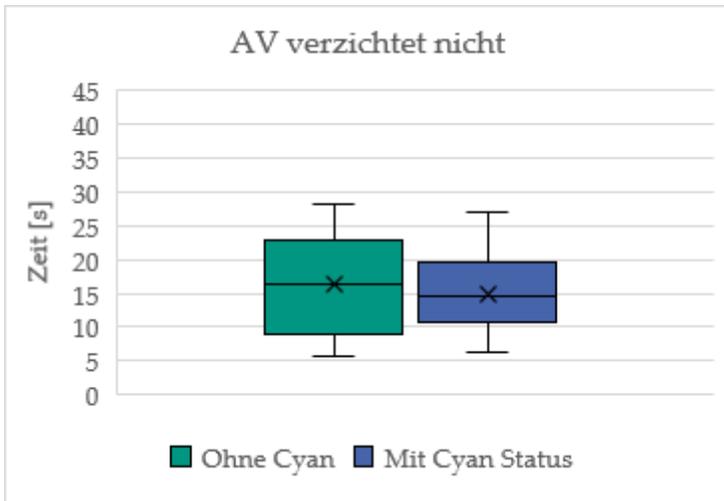


Abbildung 5.61: Vergleich der Reaktionszeiten der Fahrten ohne Verzicht mit eingeschalteter Cyanleuchte als Statusanzeige und ohne Cyanleuchte.

Hier ist ebenfalls zu sehen, dass die Boxen eine ähnliche Ausprägung aufweisen und die Mittelwerte der Reaktionszeiten nahezu identisch sind. Die aufgestellte Nullhypothese lautet demnach:

„Die Anzeige des autonomen Fahrstatus auf der Cyanleuchte hat keinen Einfluss auf die Reaktionszeiten der Probanden in Situationen, in denen das autonome Fahrzeug nicht verzichtet.“

Nach Auswertung der Daten mittels t-Test für unabhängige Stichproben ergibt sich ein p-Wert von 0,17 und ist damit größer als α von 0,05. Auch die t-Statistik ist mit $|1,42|$ kleiner als der kritische Wert.

Die Nullhypothese ist somit anzunehmen, da kein signifikanter Unterschied vorliegt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine einzelne Signalleuchte hinreichend gut funktioniert, um den Verzicht eines autonomen Fahrzeuges zu kommunizieren. Weiter konnte gezeigt werden, dass die Verzichtsanzeige ebenfalls nur durch das Geben einer Lichthupe mit den Scheinwerfern realisierbar ist. Dies funktioniert selbst dann, wenn die nach SAE J3134 geforderte cyan-farbige Statusleuchte angeschaltet ist.

Der Verzicht ist die einzige Nachricht, die ein automatisiertes Fahrzeug nach dem Entfall des Menschen als Kommunikationspartner Stand heute kommunizieren können muss. Die Funktion ist mit der vorhandener Technik direkt umsetzbar, eine zusätzliche Signaleinrichtung ist nicht notwendig.

Im folgenden Kapitel werden die bisherigen Ergebnisse und Erkenntnisse zusammenfassend diskutiert. Es sollen Empfehlungen daraus abgeleitet werden, die als Grundlage für zukünftige Regelungen und Gesetzgebungen dienen.

Kapitel 6

DISKUSSION

Die Erkenntnisse der vorherigen Kapitel werden in diesem Kapitel zusammengetragen. Des Weiteren erfolgt eine Analyse hinsichtlich der Gestaltung und den Anforderungen, die an eine lichtbasierte Kommunikation zu stellen sind, damit diese im Straßenverkehr funktionieren kann. Dabei ist nachfolgend stets die zusätzliche lichtbasierte Kommunikation gemeint, die den Menschen als Kommunikationsschnittstelle im zukünftigen autonomen Mischverkehr ersetzen soll. Bestehende lichttechnische Signalleinrichtungen am Fahrzeug, wie Fahrtrichtungsanzeiger oder die Bremsleuchte sind damit explizit nicht gemeint.

Zahlreiche Forschungsvorhaben haben gezeigt, dass mit der vorhandenen Technologie vielerlei Möglichkeiten zur Verfügung stehen, eine ansprechende und detaillierte Kommunikation zu gestalten. Dennoch sind weitere Fragestellungen damit verbunden, die beispielsweise die Adressierbarkeit oder die Eindeutigkeit der Nachrichten betreffen. Auch die Anforderungen an die Erkennbarkeit bzw. Lesbarkeit der Nachrichten sind noch nicht ausreichend untersucht.

Selbst wenn diese Fragestellungen in Zukunft eindeutig geklärt und durch den Fortschritt der Technologie lösbar sind, verbleiben offene

Punkte, die eine lichtbasierte Kommunikation in der vorgesehenen Form in Frage stellen.

Im Folgenden wird daher auf die Gestaltung der Kommunikation eingegangen, verbunden mit den Fragen WARUM, WAS und WIE muss kommuniziert werden. Die daraus resultierenden Anforderungen an eine lichtbasierte Kommunikationseinrichtung werden dann abschließend als Handlungsempfehlungen zusammengefasst.

6.1 GESTALTUNG DER KOMMUNIKATION

Bei der Entwicklung einer lichtbasierten Kommunikation für den Straßenverkehr sind spezifische Aspekte zu berücksichtigen, um sicherzustellen, dass diese ihre vorgesehenen Funktionen erfüllt. Aufgrund der erheblichen technologischen Fortschritte der letzten Jahre stehen zahlreiche Systeme zur Verfügung, die grundsätzlich in der Lage sind, Nachrichten durch Muster, Formen, Symbole oder Text darzustellen. Dies eröffnet nahezu unbegrenzte Möglichkeiten für die Gestaltung der Kommunikation.

Um jedoch eine zuverlässige Kommunikation gewährleisten zu können, die unabhängig von äußeren Einflüssen und Umgebungsbedingungen zuverlässig funktioniert und Nachrichten sicher an den adressierten Empfänger übermittelt, müssen bestimmte Gestaltungsprinzipien beachtet werden.

6.1.1 WARUM MUSS KOMMUNIZIERT WERDEN?

Die Frage nach dem WARUM lässt sich eindeutig beantworten. Die Notwendigkeit der Kommunikation ergibt sich bereits aus dem in Kapitel 2.1 eingeführten § 11 Abs. 3 StVO, der eine Verständigung der Verkehrsteilnehmer in besonderen Verkehrslagen vorschreibt.

In bestimmten Situationen ist es notwendig, einen Verzicht auf die eigene Vorfahrt anzuzeigen, um den Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten. Bisherige Methoden, wie Lichthupe oder das Aufzeigen von Gesten, werden im zukünftigen teilautonomen Mischverkehr nicht mehr durch den Menschen erfolgen, stattdessen muss die Maschine kommunizieren. Diese Kommunikation kann als Need-to-have-Kommunikation bezeichnet werden.

Des Weiteren gibt es Situationen, wie in Kapitel 4.4.1 oder Kapitel 4.4.2 vorgestellt, in denen eine Kommunikation den Verkehrsfluss aufrechterhalten oder sogar beschleunigen kann. Diese Kommunikation wird als Nice-to-have-Kommunikation bezeichnet.

Voraussetzung ist eine entsprechende Gestaltung der Kommunikationsarten, sodass daraus keine Uneindeutigkeiten entstehen oder gar Gefahren für andere Verkehrsteilnehmer resultieren können.

6.1.2 WAS MUSS KOMMUNIZIERT WERDEN?

Auch die Frage nach dem WAS lässt sich konkret beantworten. Es darf lediglich der Verzicht kommuniziert werden. Die Kommunikation darf dabei nur Informationen über die Manöverplanung des eigenen Fahrzeuges geben, dies wird am besten durch das Beispiel des Fahrtrichtungsanzeigers ersichtlich.

Das kommunizierende Fahrzeug zeigt hier an, wie es sich aktuell oder in naher Zukunft verhalten wird. Andere Verkehrsteilnehmer wiederum nutzen dies für die eigene Manöverplanung. Bei der Kommunikation des Verzichts verhält es sich ähnlich.

Das verzichtende Fahrzeug zeigt an, dass es verzögert bzw. stehen bleiben wird. Der oder die möglichen Empfänger leiten daraus Rückschlüsse für ihre eigene Manöverplanung ab. Ob der Verzicht angenommen und der angesprochene Empfänger losfährt, liegt nicht im Einflussbereich des Senders. Die mit dem Losfahren verbundenen Risiken sind im Verantwortungsbereich des Empfängers.

Eine instruierende Kommunikation ist hingegen generell zu vermeiden, da stets ein gewisses Restrisiko verbleibt, für das der Sender keine Verantwortung übernehmen kann.

6.1.3 WIE MUSS KOMMUNIZIERT WERDEN?

Bei der Beantwortung nach dem WIE, also der konkreten Ausgestaltung der Kommunikation, sind hingegen verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Es ist vor allem darauf zu achten, dass diese eindeutig ist und Missverständnisse nahezu ausgeschlossen werden können. Bei der Durchführung der Probandenstudien in Kapitel 5.4 hat sich gezeigt, dass mit der Lichthupe bereits ein Signal im Straßenverkehr vorhanden ist, das von vielen Verkehrsteilnehmern verstanden wird.

Die Lichthupe wird als Verzichtsanzeige verstanden und interpretiert. Das autonome Fahrzeug kann diese ebenfalls auslösen, um den eigenen Verzicht anzuzeigen. Ein Vorteil der Lichthupe, gegenüber anderen Kommunikationseinrichtungen, wie bspw. dem Display ist, dass das Signal unabhängig der äußeren Umgebungsparameter sicher erkannt wird.

Außerdem ist es aufgrund der kurzen Darbietungszeit möglich, das Signal innerhalb kürzester Zeit zu erfassen. Eine mehrmalige Darbietung ist ebenfalls denkbar und möglich.

Weiterhin sollte die Art der Kommunikation so gestaltet sein, dass eine Verwechslung ausgeschlossen und das Signal stets dem Straßenverkehr zugeordnet werden kann. Eine symbolbasierte Kommunikation beispielsweise ist dagegen einfach mit Leuchtreklame bzw. Werbung zu verwechseln.

Nach Beantwortung der Fragen nach dem Warum, Was und Wie sind daraus Anforderungen und abschließend Handlungsempfehlungen an eine lichtbasierte Kommunikationseinrichtung zu formulieren.

6.2 ANFORDERUNGEN AN EINE LICHTBASIERTE KOMMUNIKATIONSEINRICHTUNG UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Die Literatur hat gezeigt, dass es aufgrund der unterschiedlichen Technologien viele verschiedene Möglichkeiten gibt, eine lichtbasierte Kommunikation zu gestalten. Dies bildet die Grundlage für die angestrebten Untersuchungen, Formen und Symbole mit verschiedenen, hochauflösenden Systemen anzuzeigen. Das ist vor allem dann von Vorteil, wenn Verkehrsteilnehmer angesprochen werden sollen, die beispielsweise nicht verkehrserzogen sind oder aus anderen Ländern stammen.

Für die Automobilhersteller bietet dies wiederum die Möglichkeit, die Kommunikation markenspezifisch zu gestalten, um somit einen Wiedererkennungswert zu schaffen, ähnlich dem charakteristischen Design verschiedener Heckleuchten.

Diese Möglichkeit sollte jedoch nicht treibende Kraft in der Gestaltung einer neuen, lichtbasierten Kommunikation sein. Durch eine zusätzliche Kommunikationsschnittstelle soll der Wegfall des Fahrers eines autonomen Fahrzeuges kompensiert werden. Der Fahrer, der

bisher auch die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmer übernommen hat, steht dafür zukünftig nicht mehr zur Verfügung.

Dabei muss in bestimmten Situationen im Straßenverkehr weiterhin kommuniziert werden, um entweder den Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten oder Problemsituationen wie einen Patt zu lösen.

Die Kommunikationsschnittstelle ist daher so zu gestalten, dass Nachrichten durch andere Verkehrsteilnehmer erkennbar sind und zwar unabhängig von äußeren Einflüssen. Des Weiteren ist eine gewisse Eindeutigkeit zur Vermeidung von Missverständnissen gefordert sowie zu beachten, dass die Kommunikationsschnittstelle zukünftig nicht nur von einem Fahrzeug genutzt wird, sondern im autonomen Mischverkehr mehrere autonome Fahrzeuge gleichzeitig kommunizieren können. Relevante Informationen müssen trotzdem den oder die Empfänger erreichen und nicht in einer Flut nicht-relevanter Informationen untergehen.

Die Kommunikationsschnittstelle eines autonomen Fahrzeuges ist daher nicht als fahrbare Informationstafel zu nutzen. Eine Anzeige, welche Verkehrsteilnehmer durch die Sensorik des autonomen Fahrzeuges erkannt wurden, ist ebenso wenig notwendig, wie beispielsweise ein Broadcast der Information, dass die Temperatur unter 4 °C gefallen ist.

Aus § 11 Abs. 3 StVO geht hervor, dass ein autonomes Fahrzeug in der Lage sein muss, den Verzicht eindeutig anzuzeigen. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass dieser Verzicht mit den meisten HMI-System anzeigbar ist, entweder durch Projektion

von Symbolen oder Schrift auf die Fahrbahn oder mittels Darstellung dieser auf einem Display. Ebenso besteht die Möglichkeit zur entsprechenden Anzeige durch das Geben einer Lichthupe mit der Cyanleuchte oder den Scheinwerfern.

Problematisch bei den höher aufgelösten Systemen ist jedoch, dass die Erkennbarkeit durch widrige Umgebungsbedingungen nicht immer gewährleistet ist. Die Projektion beispielsweise funktioniert nur auf trockener Fahrbahn in den Dämmerungs- und Abendstunden. Auch muss ein projiziertes Symbol stets dynamisch an die Position des adressierten Empfängers angepasst sein, um Unleserlichkeit durch projektive Verzerrung zu vermeiden.

Die Erkennbarkeit von Symbolen auf dem Display ist stark abhängig von der Entfernung, aus der diese betrachtet werden. Bei größeren Entfernungen oder etwa dem Auftreten von Niederschlag und Nebel, sinkt die Erkennbarkeit drastisch und eine sichere Kommunikation ist nicht mehr gewährleistet.

Bei der Untersuchung der Cyanleuchte hat sich gezeigt, dass durch das Geben einer Lichthupe sehr zuverlässig ein Verzicht angezeigt werden kann. Diese erfolgt entweder mit der Signalleuchte oder aber auch den Scheinwerfern des Fahrzeuges. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Lichthupe als Signal bereits im Straßenverkehr verwendet und durch Verkehrsteilnehmer verstanden wird. Auch eine Anzeige bei Tag oder unter widrigen Umgebungsbedingungen sind kein Problem, da sich die Lichthupe ausreichend von der Umgebung

abhebt und auch auf größere Entfernungen gut sichtbar und die Botschaft erkennbar ist.

Für eine Handlungsempfehlung wird daher folgendes abgeleitet:

Die durch den Wegfall des Menschen als Fahrer eines Fahrzeuges zu schaffende Mensch-Maschine-Schnittstelle muss nicht durch eine zusätzliche, neue Technologie ersetzt werden.

Die Notwendigkeit der Kommunikation besteht vor allem in besonderen Verkehrslagen, in denen ein Verzicht eines Verkehrsteilnehmers notwendig ist und angezeigt werden muss. Ein optionaler Verzicht zur Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses oder dessen Erhöhung kann gegeben werden, sofern die Voraussetzung dafür gegeben ist.

Eine andere, zusätzliche Kommunikation und Darstellung von Nachrichten ist mit Hinblick auf eine Informationsflut und das damit verbundenen Risiko, dass relevanten Nachrichten übersehen werden, zu vermeiden.

Der Verzicht kann über eine Signalleuchte oder die Scheinwerfer des kommunizierenden Fahrzeuges, also durch das Geben einer Lichthupe angezeigt werden. Dies steht nicht im Widerspruch zur Verwendung einer Cyanleuchte als Anzeige des autonomen Fahrstatus. Andere Verkehrsteilnehmer können dies unterscheiden und voneinander trennen.

Die lichttechnischen Parameter für die Lichthupe mit den Scheinwerfern sind der aktuellen Regelung zu entnehmen. Für die Cyanleuchte

Anforderungen an eine lichtbasierte Kommunikationseinrichtung und Handlungsempfehlungen

sind diese noch zu bestimmen. Die Positionierung der Signalleuchte im Bereich des Rückspiegels hat sich als funktionsfähig erwiesen.

Kapitel 7

FAZIT

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sollen in diesem Kapitel zusammengefasst und ein kurzer Ausblick über daraus resultierende Folgeuntersuchungen gegeben werden.

7.1 ZUSAMMENFASSUNG

Durch die Einführung autonomer Fahrzeuge in den Straßenverkehr ist der Mensch nicht länger verantwortlich für das Verhalten dieses Fahrzeuges. Ebenso entfällt dieser zukünftig als Ansprech- und vor allem Kommunikationspartner in Situationen, in denen eine Interaktion zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern notwendig ist.

Trotz Wegfall des Menschen als bisheriger Kommunikationspartner muss das autonome Fahrzeug in der Lage sein, mit anderen Verkehrsteilnehmern zu kommunizieren. Notwendig ist dies in besonderen Verkehrslagen, in denen ohne eine Absprache der Beteiligten, der Verkehr zum Erliegen käme. Diese Kommunikation muss wahrnehmbar und verständlich sein.

Viele der Ansätze zur Lösung dieses sich auftuenden Problems verwenden Licht als Medium zur Kommunikation. Eine lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle lässt sich mit der bestehenden

Technologie auf unterschiedlichste Art und Weise realisieren. Hochauflösende Kommunikationsschnittstellen haben den Vorteil, dass Nachrichten mit Schrift und Symbolen darstellbar sind. Eine Kommunikation mit Symbolen hat zum einen den Vorteil, dass sowohl Analphabeten als auch Kleinkinder diese verstehen. Zum anderen bieten Symbole aufgrund ihrer Allgegenwärtigkeit im alltäglichen Leben und ihrer einzigartigen Formen einen hohen Wiedererkennungswert. Es können damit beinahe beliebig viele verschiedene Nachrichten angezeigt werden.

In den durchgeführten Untersuchungen wurde gezeigt, dass eine Symbolkommunikation zwar verständlich, in bestimmten Situationen jedoch schwierig darzustellen ist. Durch äußere Umwelteinflüsse wie Tageslicht oder Regen, wird die Wahrnehmbarkeit dieser Kommunikation deutlich reduziert. Bei Nebel kann eine Symbolanzeige in dem Maße verfälscht werden, dass diese entweder anders interpretierbar oder überhaupt nicht mehr wahrnehmbar ist.

Somit ist diese Methode nicht robust gegenüber Störeinflüssen und nur ein bedingter Ersatz für den Menschen als Kommunikationsschnittstelle.

In weiteren Studien wurde die Tauglichkeit einer cyan-farbenen Signalleuchte als neue Kommunikationsschnittstelle untersucht, da die SAE J3134 zur Markierung des autonomen Fahrstatus eine separate, cyan-farbene Leuchte an Fahrzeugen vorsieht.

Diese Leuchte ist im Vergleich zur Displaykommunikation oder Scheinwerferkommunikation eingeschränkt in ihren

Darstellungsmöglichkeiten, weshalb innerhalb der Studien der Fokus auf die Verzichtsanzeige gelegt wurde. Dabei handelt es sich um die einzige Nachricht, die von der StVO, nämlich durch § 11 Abs. 3 StVO, zwingend vorgeschrieben wird und somit durch ein autonom fahrendes Fahrzeug kommuniziert werden muss. Eine Anwendung findet diese Anzeige beispielsweise in Pattsituationen, also Situationen im Straßenverkehr, in denen die Vorfahrtslage nicht eindeutig geregelt ist. Eine Absprache der Beteiligten sowie ein Verzicht auf die eigene Vorfahrt durch einen der Beteiligten ist notwendig und ist entsprechend zu kommunizieren.

Im Rahmen der Probandenstudie wurden verschiedene Signalbilder zur Verzichtsanzeige untersucht. Neben dem Bespielen der Cyanleuchte mit sowohl statischen als auch dynamischen Mustern, wurden auch die Fahrzeugscheinwerfer untersucht.

Im Ergebnis ist der Verzicht eines Fahrzeuges durch das Geben einer Lichthupe eindeutig kommunizierbar. Dabei erfolgt keine signifikante Unterscheidung, zwischen der Lichthupe durch die Cyanleuchte oder die Scheinwerfer. Die Kommunikation des Verzichts mittels Scheinwerfer wird selbst dann verstanden, wenn die Cyanleuchte dauerhaft leuchtet, um den autonomen Fahrstatus anzuzeigen.

Die Erkenntnisse der durchgeführten Studien ergeben, dass eine lichtbasierte Kommunikation deutlich wahrnehmbar und in bestimmtem Maße einzigartig sein muss. Des Weiteren ist die Erkennbarkeit stark von der umgebenden Beleuchtungssituation abhängig.

Entsprechend könnten verschiedene Modi, bspw. für Tag oder Nacht, vorteilhaft sein. Ebenso ist die Dauer, in der kommuniziert wird, nicht sonderlich lang, das heißt eine dynamische Nachricht sollte nicht mehrere Sekunden dauern, bis sich deren Sinn erschließt. Aufgrund der Annahme, dass zukünftig viele autonome und somit kommunizierende Fahrzeuge am Straßenverkehr teilnehmen, sollte die Kommunikation auf ein notwendiges Minimum reduziert sein. Informationsbezogene Nachrichten oder Nachrichten persönlicher Art, wie bspw. ein „Danke“, sind der Übersichtlichkeit wegen zu vermeiden. Folge einer fast grenzenlosen Kommunikation wäre eine Informationsflut, sodass relevante Nachrichten mit großer Wahrscheinlichkeit nicht mehr wahrgenommen werden.

Abschließend wird daher empfohlen, zukünftig die Kommunikation auf die Verzichtsanzeige zu beschränken. Diese kann mit bestehenden, lichttechnischen Einrichtungen, bereits heute über eine Lichthupe eindeutig angezeigt werden. Dies steht auch nicht im Konflikt mit einer autonomen Statusleuchte.

7.2 AUSBLICK

Bei der Einführung einer Cyanleuchte, nicht nur zur Anzeige des autonomen Fahrstatus, sondern auch zur Verzichtsanzeige, ist zu klären, wie die lichttechnischen Parameter dieser Leuchte definiert sein müssen. Die in den durchgeführten Untersuchungen angenommenen Parameter waren so ausgelegt, dass das Signal deutlich sichtbar ist. Eine Unterscheidung zwischen Tag und Nacht wurde allerdings nicht vorgenommen. Diese Fragestellung ist separat zu klären.

Ebenso erfolgte die Untersuchung der Verzichtsanzeige durch Lichtlupe lediglich in einem ausgewählten Szenario auf einem umzäunten Gelände. Zur Validierung der Ergebnisse sollte eine Untersuchung im realen Straßenverkehr durchgeführt werden.

Des Weiteren wurde in dieser Arbeit stets angenommen, dass das autonome Fahrzeug eine gute Übersicht über das Szenario im Straßenverkehr hat und auf dieser Grundlage entscheidet, was zu kommunizieren ist. Im realen Straßenverkehr ist dies ein nicht einfach zu lösendes Problem, da viel Faktoren eine eindeutige Erkennung und Klassifikation der Situation erschweren. Dies muss abschließend gelöst sein, bevor das autonome Fahrzeug auf dieser Grundlage entscheiden und kommunizieren kann.

III LITERATUR

- [1] „MAN: First autonomous truck on the motorway“, MAN: First autonomous truck on the motorway. Zugegriffen: 3. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://press.mantruckandbus.com/corporate/man-first-autonomous-truck-on-the-motorway/>
 - [2] S. Kim u. a., „Autonomous Taxi Service Design and User Experience“, *International Journal of Human–Computer Interaction*, Bd. 36, Nr. 5, S. 429–448, März 2020, doi: 10.1080/10447318.2019.1653556.
 - [3] D. Nicolaidis, D. Cebon, und J. Miles, „An autonomous taxi service for sustainable urban transportation“, in *2017 Smart City Symposium Prague (SCSP)*, Prague, Czech Republic: IEEE, Mai 2017, S. 1–6. doi: 10.1109/SCSP.2017.7973353.
 - [4] „Waymo - Self-Driving Cars - Autonomous Vehicles - Ride-Hail“, Waymo. Zugegriffen: 3. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://waymo.com/>
 - [5] SAE International, „SAE Levels of Driving Automation™ Refined for Clarity and International Audience“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>
 - [6] R. Risser, „Behavior in traffic conflict situations“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 17, Nr. 2, S. 179–197, Jan. 1985, doi: 10.1016/0001-4575(85)90020-X.
 - [7] K. Merten, *Kommunikation: Eine Begriffs- und Prozeßanalyse*, Bd. 35. in *Studien zur Sozialwissenschaft*, vol. 35. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften; Imprint, 1977.
 - [8] T. H. BAUER, R. RISSER, P. SOCHE, W. TESKE, und C. H. VAUGHAN, *KOMMUNIKATION IM STRASSENVERKEHR (1. ZWISCHENBERICHT). LITERATURSTUDIE AUS JURISTISCHEM, KOMMUNIKATIONSTHEORETISCHEM UND*
-

- PSYCHOLOGISCHEM BLICKWINKEL. 1980. [Online]. Verfügbar unter: <https://trid.trb.org/view/1042064>
- [9] <https://kienthuc.net.vn>, „Diện kiến Zhiji IM L7 - sedan điện hạng sang của Trung Quốc“, kienthuc.net.vn. Zugegriffen: 12. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://kienthuc.net.vn/o-to-xe-may/dien-kien-zhiji-im-l7-sedan-dien-hang-sang-cua-trung-quoc-1522490.html>
- [10] interACT project, „Home“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.interact-roadautomation.eu/>
- [11] @city, „@CITY | Automatisiertes Fahren in der Stadt | Home“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.atcity-online.de/>
- [12] J. Reschke, M.-T. Auburger, R. Marichalar, und C. Neumann, „Kommunikation zwischen automatisierten Fahrzeugen und Fußgängern“, *ATZ Automobiltech Z*, Bd. 121, Nr. 9, S. 16–23, Jan. 2019, doi: 10.1007/s35148-019-0096-x.
- [13] „Initiative Projekt – Intelligente Mensch-Technik-Kommunikation im gemischten Verkehr“. Zugegriffen: 3. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.initiative-projekt.de/>
- [14] Deutschland und H. Janker, Hrsg., „§ 1 StVO“, in *Straßenverkehrsrecht: Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung, Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung, Pflichtversicherungsgesetz und Bußgeldkatalog-Verordnung: Textausgabe mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung*, 61., neu Bearbeitete Auflage, Stand 7.9.2023, Sonderausgabe., in dtv Beck-Texte, no. 5015., München: dtv, 2024, S. 130.
- [15] Deutschland und H. Janker, Hrsg., „§ 3 StVO“, in *Straßenverkehrsrecht: Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung, Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung, Pflichtversicherungsgesetz und Bußgeldkatalog-Verordnung: Textausgabe mit*

- ausführlichem Sachregister und einer Einführung*, 61., neu Bearbeitete Auflage, Stand 7.9.2023, Sonderausgabe., in dtv Beck-Texte, no. 5015. , München: dtv, 2024, S. 132–133.
- [16] Deutschland und H. Janker, Hrsg., „§ 4 StVO“, in *Straßenverkehrsrecht: Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung, Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung, Pflichtversicherungsgesetz und Bußgeldkatalog-Verordnung: Textausgabe mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung*, 61., neu Bearbeitete Auflage, Stand 7.9.2023, Sonderausgabe., in dtv Beck-Texte, no. 5015. , München: dtv, 2024, S. 133.
- [17] Deutschland und H. Janker, Hrsg., „§ 7 StVO“, in *Straßenverkehrsrecht: Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung, Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung, Pflichtversicherungsgesetz und Bußgeldkatalog-Verordnung: Textausgabe mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung*, 61., neu Bearbeitete Auflage, Stand 7.9.2023, Sonderausgabe., in dtv Beck-Texte, no. 5015. , München: dtv, 2024, S. 134–135.
- [18] Deutschland und H. Janker, Hrsg., „§ 8 StVO“, in *Straßenverkehrsrecht: Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung, Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung, Pflichtversicherungsgesetz und Bußgeldkatalog-Verordnung: Textausgabe mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung*, 61., neu Bearbeitete Auflage, Stand 7.9.2023, Sonderausgabe., in dtv Beck-Texte, no. 5015. , München: dtv, 2024, S. 136.
- [19] Deutschland und H. Janker, Hrsg., „§ 37 StVO“, in *Straßenverkehrsrecht: Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen, Straßenverkehrs-*

- Zulassungs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung, Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung, Pflichtversicherungsgesetz und Bußgeldkatalog-Verordnung: Textausgabe mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung*, 61., neu Bearbeitete Auflage, Stand 7.9.2023, Sonderausgabe., in dtv Beck-Texte, no. 5015. , München: dtv, 2024, S. 156–157.
- [20] Deutschland und H. Janker, Hrsg., „S 36 StVO“, in *Straßenverkehrsrecht: Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung, Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung, Pflichtversicherungsgesetz und Bußgeldkatalog-Verordnung: Textausgabe mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung*, 61., neu Bearbeitete Auflage, Stand 7.9.2023, Sonderausgabe., in dtv Beck-Texte, no. 5015. , München: dtv, 2024, S. 155.
- [21] Deutschland und H. Janker, Hrsg., „§ 11 Abs. 3“, in *Straßenverkehrsrecht: Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung, Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung, Pflichtversicherungsgesetz und Bußgeldkatalog-Verordnung: Textausgabe mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung*, 61., neu Bearbeitete Auflage, Stand 7.9.2023, Sonderausgabe., in dtv Beck-Texte, no. 5015. , München: dtv, 2024, S. 137.
- [22] K. Merten, *Kommunikation: eine Begriffs- und Prozeßanalyse*. in Studien zur Sozialwissenschaft, no. 35. Opladen: Westdt. Verl, 1977.
- [23] A. Frutiger, *Der Mensch und seine Zeichen*, 4. Auflage. in marxwissen. Wiesbaden: marixverlag, 2016.
- [24] C. E. Shannon und W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: The University of Illinois Press, 1964. doi: 10.4135/9781412959384.n229.

- [25] M. Helmer, *Methode zur Messung des Einflusses von Lichtimpulsen auf die visuelle Leistungsfähigkeit*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2021. doi: 10.5445/KSP/1000105600.
- [26] H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung: Theorie und Praxis der Lichttechnik*, 4., Neubearb. Aufl. Heidelberg: Hüthig, 1994.
- [27] U. Harten, *Physik für Mediziner*, 17. Auflage, Korrigierte Publikation 2024. in Lehrbuch. Berlin [Heidelberg]: Springer, 2024.
- [28] J. Imbsweiler, „Kooperation im Straßenverkehr in innerstädtischen Pattsituationen“, 2019, doi: 10.5445/IR/1000095374.
- [29] „mehr-sicherheit-im-stadtverkehr-durch-gute-verst-ndigung (710×513)“. Zugegriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://cache.pressmailing.net/thumbnail/story_big/636a4ea0-6e39-41ca-9be7-2689729b29f3/mehr-sicherheit-im-stadtverkehr-durch-gute-verst-ndigung
- [30] C. Faller, „Genius - die junge WissensCommunity von Mercedes-Benz“, Genius. Zugegriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.genius-community.com/genius-fuer-schuelerinnen-und-schueler/spannendes-wissen/was-ist-eine-lichthupe-8607/>
- [31] „Heckleuchte mit Signalfunktionen“. Zugegriffen: 12. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://i.ebayimg.com/images/g/~yUAAOSwAL1k4y3w/s-11200.jpg>
- [32] „1713352898952,swr1-meilensteine-the-beatles-abbey-road-cover-100~_v-1x1@2dL_-029cdd853d61a51824ed2ee643deae504b065c1.jpg (1440×1440)“. Zugegriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.swr.de/swr1/rp/meilensteine/1713352898952%2Cswr1-meilensteine-the-beatles-abbey-road-cover-100~_v-1x1@2dL_-029cdd853d61a51824ed2ee643deae504b065c1.jpg
- [33] J. Itten, *Kunst der Farbe: subjektives Erleben und objektives Erkennen als Wege zur Kunst*, Gekürzte Studienausg., [Nachdr.]. in Urania

- Kunst und Gestaltung. Stuttgart: Urania-Verl. in der Verl. Kreuz GmbH, 2007.
- [34] „ASR A1.3 Sicherheits- und Gesundheitsschutzkennzeichnung“.
- [35] „GettyImages-829197466-1280x720-1.jpg (800x480)“. Zugegriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.connectedautomateddriving.eu/wp-content/uploads/2020/08/GettyImages-829197466-1280x720-1.jpg>
- [36] „Tempo 30 gegen Straßenlärm“, Baden-Württemberg.de. Zugegriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemittteilung/pid/tempo-30-gegen-strassenlaerm>
- [37] „Mit Tempo 30 die Verkehrssicherheit erhöhen“, BFU. Zugegriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfu.ch/de/die-bfu/politik/mit-tempo-30-die-verkehrssicherheit-erhoehen>
- [38] „Mit Abstand besser fahren“, BG Verkehr. Zugegriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bg-verkehr.de/arbeitssicherheit-gesundheit/branchen/taxi/sicheres-fahren/mit-abstand-besser-fahren>
- [39] Deutschland und H. Janker, Hrsg., „§ 26 StVO“, in *Straßenverkehrsrecht: Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung, Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung, Pflichtversicherungsgesetz und Bußgeldkatalog-Verordnung: Textausgabe mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung*, 61., neu Bearbeitete Auflage, Stand 7.9.2023, Sonderausgabe., in dtv Beck-Texte, no. 5015. , München: dtv, 2024, S. 149.
- [40] M. Matthews, G. Chowdhary, und E. Kieson, „Intent Communication between Autonomous Vehicles and Pedestrians“, 2017, *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.1708.07123.

- [41] A. Piecha und W. Hacker, „Informationsflut am Arbeitsplatz: Umgang mit großen Informationsmengen vermittelt durch elektronische Medien“, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2020. doi: 10.21934/BAUA:BERICHT20201019.
- [42] P. G. Roetzel, „Information overload in the information age: a review of the literature from business administration, business psychology, and related disciplines with a bibliometric approach and framework development“, *Bus Res*, Bd. 12, Nr. 2, S. 479–522, Dez. 2019, doi: 10.1007/s40685-018-0069-z.
- [43] G. A. Miller, „The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information“, *Psychological Review*, Bd. 63, Nr. 2, S. 81–97, Jan. 1956, doi: 10.1037/h0043158.
- [44] J. Farrington, „Seven plus or minus two“, *Perf. Improvement Qrtly*, Bd. 23, Nr. 4, S. 113–116, 2011, doi: 10.1002/piq.20099.
- [45] „03_times-square-new-york_big.webp (1920×1371)“. Zugegriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://reisetipp-usa.de/images/detail/new-york-city/times-square/03_times-square-new-york_big.webp
- [46] Signaling and Marking Devices Stds Comm, *Automated Driving System (ADS) Marker Lamp*. doi: 10.4271/J3134_201905.
- [47] D. Dey, A. Habibovic, B. Pfleging, M. Martens, und J. Terken, „Color and Animation Preferences for a Light Band eHMI in Interactions Between Automated Vehicles and Pedestrians“, in *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, R. Bernhaupt, F. „Floyd“ Mueller, D. Verweij, J. Andres, J. McGrenere, A. Cockburn, I. Avellino, A. Goguey, P. Bjørn, S. Zhao, B. P. Samson, und R. Kocielnik, Hrsg., New York, NY, USA: ACM, S. 1–13. doi: 10.1145/3313831.3376325.
- [48] S. M. Faas und M. Baumann, „Light-Based External Human Machine Interface: Color Evaluation for Self-Driving Vehicle and Pedestrian Interaction“, *Proceedings of the Human Factors*

- and Ergonomics Society 2019 Annual Meeting*, Bd. 63, Nr. 1, S. 1232–1236, Jan. 2019, doi: 10.1177/1071181319631049.
- [49] A. Schieben u. a., Hrsg., *Testing external HMI designs for automated vehicles: An overview on user study results from the EU project interACT*, Bd. 9. 2019.
- [50] HELLA, „Unser Digital Light SSL | HD-Lichtsystem: ein neuer Meilenstein der automobilen Lichttechnik | HELLA“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hella.com/tech-world/de/Lounge/Unser-Digital-Light-SSL-HD-Lichtsystem-ein-neuer-Meilenstein-der-automobilen-Lichttechnik-55548/>
- [51] Mercedes-Benz, „DIGITAL LIGHT: Das Licht der Zukunft kommt auf die Straße.“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/fahrzeuge/personenwagen/mercedes-maybach/digital-light-das-licht-der-zukunft-kommt-auf-die-strasse/>
- [52] C. Schmidt, F. J. Kalze, und K. Eichhorn, „Adaptive Front-Lighting System in LED Technology – Initial Steps and the Future“, *SAE Transactions*, Bd. 116, S. 332–342, 2007.
- [53] C. Amsel, G. Florissen, und S. Pietzonka, „Die nächste Generation lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme“, *ATZ*, Bd. 112, Nr. 10, S. 758–763, Jan. 2010.
- [54] M. Budanow, *Entwicklung eines lichtbasierten Fahrerassistenzsystems*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2020. doi: 10.5445/KSP/1000105925.
- [55] T. Geßner, „Evaluation eines Navigationssystems auf Basis von Bodenprojektion“, Karlsruhe, 2018.
- [56] P. Jahn, *Bewertungsmodell zur Evaluation hochauflösender, lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2020. doi: 10.5445/KSP/1000105371.
- [57] Deutschland und H. Janke, Hrsg., *Straßenverkehrsrecht: Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung*,

- Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung, Pflichtversicherungsgesetz und Bußgeldkatalog-Verordnung: Textausgabe mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung*, 61., neu Bearbeitete Auflage, Stand 7.9.2023, Sonderausgabe. in dtv Beck-Texte, no. 5015. München: dtv, 2024.
- [58] J. Trotter, *Das Auge: Ein Handbuch für Augenoptiker*, Unveränd. Neuaufl // unveränd. Neuaufl. Heidelberg: DOZ-Verl; DOZ-Verl., 2004.
- [59] H. Brettel, „Die Sofortadaptation, eine Konsequenz der retinalen Empfindlichkeitsregelung“, München, 1981.
- [60] M. Baumann u. a., „Symbol Projection for Pedestrians“, in *Proceedings of the 14th International Symposium on Automotive Lighting: ISAL2021*, Bd. 19, T. Q. Khanh, Hrsg., in Darmstädter Lichttechnik, vol. 19. , München: utzverlag GmbH München, 2022, S. 555–566.
- [61] „Convention on road sign and signals“, Nov. 1968. [Online]. Verfügbar unter: <https://treaties.un.org/pages/CTCTreaties.aspx?id=11&subid=B&lang=en>
- [62] *Straßenverkehrs-Ordnung: StVO*. 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/index.html#BJNR036710013BJNE005803124
- [63] G. T. Fechner, *ELEMENTE DER PSYCHOPHYSIK*. [S.l.]: FORGOTTEN BOOKS, 2016.
- [64] J. Hartung, B. Elpelt, und K.-H. Klösener, *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik ; [mit zahlreichen durchgerechneten Beispielen]*, 15., Überarb. und Wesentlich erw. Aufl. München: Oldenbourg, 2009.
- [65] B. Rasch, M. Friese, W. Hofmann, und E. Naumann, *Quantitative Methoden 2: Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*, 4., Überarb. Aufl. in Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer, 2014. doi: 10.1007/978-3-662-43548-9.
- [66] K. Manz, „Visuelle Leistungsfähigkeit“.

- [67] A. Gärtner, *Medizintechnik und Informationstechnologien. 5: LCD-Monitore in der Medizintechnik*. 2009.
- [68] DIN 1450:2013-04, *Schriften_ - Leserlichkeit*. doi: 10.31030/1938221.
- [69] M. Troel-Madec u. a., „eHMI positioning for autonomous vehicle/pedestrians interaction“, in *Adjunct Proceedings of the 31st Conference on l'Interaction Homme-Machine*, Grenoble France: ACM, Dez. 2019, S. 1–8. doi: 10.1145/3366551.3370340.
- [70] „OpenStreetMap“, OpenStreetMap. Zugegriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.openstreetmap.org/>
- [71] Deutschland und H. Janker, Hrsg., „§ 54 StVZO“, in *Straßenverkehrsrecht: Straßenverkehrsgesetz, Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung, Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung, Pflichtversicherungsgesetz und Bußgeldkatalog-Verordnung: Textausgabe mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung*, 61., neu Bearbeitete Auflage, Stand 7.9.2023, Sonderausgabe., in dtv Beck-Texte, no. 5015., München: dtv, 2024, S. 415–417.
- [72] B. Martin und B. M. Hanington, *Universal methods of design: 100 ways to research complex problems, develop innovative ideas, and design effective solutions*, Digital ed. Beverly, MA: Rockport Publishers, 2012.
- [73] „t-Test, Chi-Quadrat, ANOVA, Regression, Korrelation...“ Zugegriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://datatab.de/tutorial/unabhängiger-t-test>
- [74] „t-Test für unabhängige Stichproben“. Zugegriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/ttestunabh.html

- [75] „t-Test, Chi-Quadrat, ANOVA, Regression, Korrelation...“ Zugriffen: 4. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://datatab.de/tutorial/tabelle-t-verteilung>
- [76] J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed. Hoboken: Taylor and Francis, 2013.

IV ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1:	Übersicht der durch die SAE in der J3016 definierten Stufen der Automation.	12
Abbildung 1.2:	Beispiel für eine lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle an einem Fahrzeug [9].	14
Abbildung 1.3:	Struktureller Aufbau der gesamten Verarbeitungskette im Projekt INITIATIVE von Situationserfassung, Entscheidungsprozess und Kommunikation durch Anzeige nach Innen bzw. Außen.	18
Abbildung 2.4:	Besondere Verkehrslage mit Beispielen „Kreuzung mit vier Wegen“ (links) und „Engstelle“ (rechts).	23
Abbildung 2.5:	Vereinfachte Darstellung des Kommunikationsmodells nach Shannon und Weaver.	25
Abbildung 2.6:	Horizontaler Sehwinkel α , den ein Objekt im Gesichtsfeld eines Beobachters einnimmt.	31
Abbildung 3.7:	Handgeste als Zeichen, dass der Fahrer auf die eigene Vorfahrt verzichtet und querendem Verkehr das Passieren ermöglicht [29].	35
Abbildung 3.8:	Darstellung einer Heckleuchte. Zu erkennen sind die verschiedenen	

	Signalfunktionen, u. A. Schlusslicht, Bremslicht, Fahrtrichtungsanzeiger [31].	38
Abbildung 3.9:	Exemplarische Szene aus dem @City-Projekt, dass die Interaktion zwischen AV und Fußgänger an einem Fußgängerüberweg zeigt [11].	41
Abbildung 4.10:	Kontrast an einem Fußgängerüberweg durch weiße Streifen auf dunklem Asphalt [32].	45
Abbildung 4.11:	Sicherheitszeichen Rettungsweg/Notausgang mit Richtungspfeil. Durch die Verwendung eines Farbkontrastes mit Weiß auf Grün ist dieses weithin gut sichtbar [34].	46
Abbildung 4.12:	Die Aufmerksamkeit der Person im autonomen befindet sich nicht mehr zwangsläufig im Außenraum, sondern bspw. auf dem Smartphone [35].	48
Abbildung 4.13:	Ablauf der fünf Phasen einer Pattsituation von Entstehung bis Auflösung. Im Falle nicht erfolgreicher Maßnahmen können mehrere Iterationsschritte bis zur Auflösung durchlaufen werden.	51
Abbildung 4.14:	Ungeregelte Kreuzung mit vier Wegen. Jeder Verkehrsteilnehmer ist gleichberechtigt hinsichtlich der geltenden Vorfahrtsregeln.	55

Abbildung 4.15:	Gerade Straße, an der ein Passant am Fußgängerüberweg wartet und diese überqueren möchte.....	59
Abbildung 4.16:	Vorfahrtsstraße mit einmündender Seitenstraße. Der von rechts kommende Verkehrsteilnehmer hat auch beim Abbiegevorgang Vorfahrt.....	60
Abbildung 4.17:	Störung des Senders verursacht durch Reflexionen auf der Windschutzscheibe eines Fahrzeuges. Durch den Insassen getätigte Gesten dringen nicht mehr sichtbar nach außen.....	63
Abbildung 4.18:	Störung des Kanals verursacht durch ein vorbeifahrendes Fahrzeug. Dies verursacht eine kurzzeitige, aber vollständige Verdeckung des kommunizierenden Fahrzeuges.....	64
Abbildung 4.19:	Störung des Empfängers durch Schmutz auf der Windschutzscheibe.....	66
Abbildung 4.20:	Szene des Time Square in New York City. Durch sehr viel Reklame und Werbeanzeigen herrscht eine Informationsüberflutung. Die Information der einzelnen Anzeigen gehen in der Fülle der Anzeigen unter [45].	68
Abbildung 4.21:	CIE Normfarbtafel mit eingezeichnetem Gamut für Cyan gemäß SAE.....	70
Abbildung 5.22:	Exemplarische Darstellung des statischen Versuchsaufbaus. Auf der linken Seite	

	befindet sich das projizierende Fahrzeug, rechts der Proband (x) in dessen Sichtbereich sich das projizierte Symbol befindet.	76
Abbildung 5.23:	Die Größe eines Symbols wird so eingestellt, dass dessen maximale Ausdehnung ein umschließendes Quadrat mit Kantenlänge 1,50 m berührt.	77
Abbildung 5.24:	Leuchtdichteaufnahme des projizierten Symbols in der Versuchsumgebung.	78
Abbildung 5.25:	Animationsabfolge der Symbole. Blinkende Darbietung (oben) und Aufbauende Darbietung (unten).	79
Abbildung 5.26:	Übersicht aller untersuchten Symbole getrennt nach Kategorie und Dynamik.	80
Abbildung 5.27:	Ablaufdiagramm der Versuchsdurchführung.	81
Abbildung 5.28:	Übersicht der untersuchten STOP-Symbole, sortiert nach aufsteigenden Erkennungsraten.	84
Abbildung 5.29:	Erkennungsraten aller STOP-Symbole in aufsteigender Reihenfolge. Die Zahl gibt an, welches Symbol aus der Gesamtmenge aufgetragen ist.	84
Abbildung 5.30:	Gegenüberstellung der Symbole deren Ursprung dem Straßenverkehr entstammt. Symbol 2 (oben) entstammt dem deutschen Stoppschild, Symbol 1 (unten) einer amerikanischen Fußgängerampel.	86

Abbildung 5.31:	Übersicht des reduzierten Symbolsatzes zur Untersuchung der Größe und der Helligkeit des projizierten Symbols.....	90
Abbildung 5.32:	Ablaufdiagramm der Versuchsdurchführung.....	92
Abbildung 5.33:	Darstellung der erhobenen Daten als Boxplot. Vergleich aller vier Symbole, SIGN-CROSS-HAND-ARROWS, getrennt nach „Dunkler Umgebung“ bzw. „Heller Umgebung“.....	94
Abbildung 5.34:	Darstellung der erhobenen Daten als Boxplot. Vergleich aller vier Symbole, SIGN-CROSS-HAND-ARROWS.....	97
Abbildung 5.35:	Darstellung der resultierenden Kontraste getrennt nach heller Umgebung, vier Boxen links, und dunkler Umgebung, Boxen rechts. Die Reihenfolge der Symbole ist jeweils: SIGN, HAND, CROSS und ARROWS.....	99
Abbildung 5.36:	Voruntersuchung mit LCD-Bildschirm zur Darstellungen von Inhalten an der Fahrzeugfront. Bei Dunkelheit ist ein ausreichender Kontrast möglich, bei Tageslicht sind keine Inhalte erkennbar.....	102
Abbildung 5.37:	Nahaufnahme des LED-Displays in der Halterung. Je Pixel ein RGB-Chip, gesamt 128 x 256 Pixel.....	104

Abbildung 5.38:	Schematische Darstellung des LED-Displays mit absoluter Größe und Pixelpitch.	105
Abbildung 5.39:	Vermessung des Displays auf dem Kfz-Goniophotometer des Lichttechnischen Instituts. Gemessen wird die Lichtstärkeverteilungskurve im gesamten Halbraum.	107
Abbildung 5.40:	Gemessene LVK des Displays durch das Goniophotometer. Dargestellt ist der Schnitt bei $\theta = 180^\circ$	108
Abbildung 5.41:	Verschiebung des Farbortes durch Einstrahlung des Fremdlichtes. Der Farbort des Displays ohne Bestrahlung (Kreuz links), der Phantomlichtquelle (Kreuz rechts) sowie der resultierende Farbort (Kreuz mit Umrandung) sind im Diagramm eingezeichnet.	111
Abbildung 5.42:	Verschiebung des Farbortes durch Einstrahlung des Fremdlichtes. Die eingezeichnete Fläche markiert den durch die SAE empfohlenen Bereich für Cyan als Statusleuchte. Der resultierende Farbort (Kreuz mit Umrandung) liegt durch die Einstrahlung außerhalb des zulässigen Bereichs.	113
Abbildung 5.43:	Textbasierte Anzeige zur Kommunikation des Verzichts der Vorfahrt des Fahrzeuges.	116

Abbildung 5.44:	Darstellung von Inhalten als Positiv-Kontrast (links) und als Negativ-Kontrast (rechts).....	118
Abbildung 5.45:	Textbasierte Nachricht bei bewölktem Himmel.	119
Abbildung 5.46:	Nachricht trotz hochstehender Sonne in den Sommermonaten noch gut sichtbar.	120
Abbildung 5.47:	Kurve zur Ansteuerung des Displays. Die Objektleuchtdichte ist über der Beleuchtungsstärke auf der Displayoberfläche aufgetragen. Die Objektleuchtdichte beträgt mindestens 10 cd/m ²	122
Abbildung 5.48:	Exemplarische Darstellung eines LED-Bandes, bei dem die Pixel einzeln adressiert mit unterschiedlicher Helligkeit sind.	124
Abbildung 5.49:	Exemplarische Darstellung der Inhalte der Videostudie. Im Videoplayer wird für jedes Muster eine Sequenz gezeigt, die Aussagen auf der rechten Seite können über Anklicken bewertet werden.	125
Abbildung 5.50:	Ergebnis der Befragung der Probanden zur Nachricht „Ich halte an“. Es standen drei Muster zur Auswahl, für jedes wurde angegeben, inwieweit der Proband die Nachricht verstanden hätte.	127
Abbildung 5.51:	Ergebnis der Befragung der Probanden zur Nachricht „Ich bleibe stehen“. Es standen zwei Muster zur Auswahl, für jedes wurde	

	angegeben, inwieweit der Proband die Nachricht verstanden hätte.....	128
Abbildung 5.52:	Versuchsstrecke für die Durchführung der Voruntersuchung auf dem Campus Süd des KIT. Der Rundkurs wird durch die Pfeile angedeutet, das rote Kreuz markiert die Position des Probanden und die cyanfarbige Fläche die Strecke, auf der die Signalleuchte kommuniziert [70].	130
Abbildung 5.53:	Ansteuerung der Cyanleuchte mit vier unterschiedlichen Signalbildern a)-d).	132
Abbildung 5.54:	T-Kreuzung mit autonomem Fahrzeug, das in die Seitenstraße einbiegen möchte. Durch die Verengung der Seitenstraße, ist ein Verzicht des autonomen Fahrzeuges für beide beteiligten geschickter.....	135
Abbildung 5.55:	Verzichtsanzeige kommuniziert durch das Aufleuchten der Cyanleuchte am autonomen Fahrzeug.....	136
Abbildung 5.56:	Versuchsstrecke für die Durchführung der Voruntersuchung auf dem Campus Ost des KIT. Der Rundkurs wird durch die Pfeile angedeutet, das rote Kreuz markiert die Position des Probanden mit dem Fahrrad. Die cyanfarbige Fläche die Strecke, auf der die Signalleuchte kommuniziert [70]......	139
Abbildung 5.57:	Darstellung der Fahrten mit und ohne Lichthupe zur Anzeige des Verzichts. Die Daten werden als Boxplot aufgetragen,	

	sodass die Mittelwerte und Streubreiten gut miteinander vergleichbar sind.....	141
Abbildung 5.58:	Vergleich der Reaktionszeiten der Fahrten mit statischer und mit dynamischer Verzichtsanzeige durch die Cyanleuchte bzw. die Scheinwerfer.....	142
Abbildung 5.59:	Vergleich der Reaktionszeiten der Fahrten mit und ohne Lichthupe als Verzichtsanzeige durch die Cyanleuchte bzw. die Scheinwerfer.....	144
Abbildung 5.60:	Vergleich der Reaktionszeiten der Fahrten mit Verzichtsanzeige als Scheinwerfer-Lichthupe und Cyanleuchte-Lichthupe.....	146
Abbildung 5.61:	Vergleich der Reaktionszeiten der Fahrten ohne Verzicht mit eingeschalteter Cyanleuchte als Statusanzeige und ohne Cyanleuchte.....	148

V TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Automatisierungsstufen, definiert durch die SAE J3016. Beginnend bei Level 0 „Keine Automation“ bis Level 5 „Vollautomatisierung“27
Tabelle 3.2:	Übersicht der Signalfunktionen am Fahrzeug mit zugehöriger Nachricht39
Tabelle 5.3:	Übersicht der statistischen Auswertung der Unterschiede zwischen heller und dunkler Umgebung getrennt nach den Symbolen.95
Tabelle 5.4:	Übersicht der gemessenen Farben vor- und nach Bestrahlung mit Fremdlichtquelle 114
Tabelle 5.5:	Übersicht der verschiedenen Signalbilder zur Kommunikation..... 138

VI VERÖFFENTLICHUNGEN

- M. Baumann; M. Helmer; C. Neumann – *Anwendung von Projektionstechniken im automobilen Interieurbereich*, Lux junior, Dörnfeld a.d. Ilm, September 2019
 - M. Baumann; K. Trampert; C. Neumann; R. Danov; E. Thiesen – *Verfahren zur Validierung von Symbolprojektionen mit heterogenen Pixelsätzen am Beispiel eines HD-Scheinwerfers*, LICHT2021, Online-Edition, März 2021
 - M. Baumann; M. Helmer; C. Neumann – *Lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Fußgänger im automatisierten Straßenverkehr: Was muss sie leisten und wie könnte sie aussehen?*, Lux junior, Dörnfeld a.d. Ilm, Juni 2021
 - M. Baumann; M. Helmer; C. Neumann; D. Blömer; Y. Won; G. Han; H. LEE – *Symbol Projection for Pedestrians*, International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, April 2022
-

- M. Baumann; M. Helmer; K. Trampert; C. Neumann – *Lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle zwischen automatisierten Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern*, VDI Wissensforum „Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik, Karlsruhe, Juni 2022
- M. Baumann; K. Trampert; M. Helmer; C. Neumann; – *Lichtbasierte Kommunikation im autonomen Mischverkehr*, LICHT2023, Salzburg, März 2023
- M. Baumann; K. Trampert; L. Dudzik; A. Rayamajhi; C. Neumann – *Untersuchung einer cyan-farbigen Signalleuchte zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern*, Lux junior, Dörnfeld a.d. Ilm, Juni 2023
- M. Baumann; C. Neumann; D. Blömer; Y. Won; G. Han; H. LEE – *Investigation on symbol-parameters for communication with other road users*, International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, September 2023

VII BETREUTE ARBEITEN

- Steven Basche, Kamerabasierte Objekterkennung zur Anwendung im automobilen Interieur, Bachelorarbeit, 2019
 - Mehdi Zerzeri, Implementierung optischer Sensoren zur Streifenlichttopometrie im automobilen Interieur, Bachelorarbeit, 2020
 - Lisa Anne Marie Walther, Konzeptionelle Arbeit zur Entwicklung eines hochschuldidaktischen Lehr-Lernarrangements, Masterarbeit, 2021
 - Natalie Hirschmann, Implementierung eines LED-Bandes als externe Mensch-Maschine-Schnittstelle im autonomen Mischverkehr, Masterarbeit, 2022
 - Andreas Lehner, Implementierung eines Displays als externe Mensch-Maschine-Schnittstelle im autonomen Mischverkehr, Masterarbeit, 2022
 - Yasmine Chouchen, Bewertung eines dynamischen LED-Rings als externe Kommunikationsschnittstelle an autonomen Fahrzeugen, Bachelorarbeit, 2022
-

- Mehmet Alp Cehri, Untersuchung einer cyan-farbenen Signalleuchte zur Kommunikation im autonomen Mischverkehr, Bachelorarbeit 2023
- Michael Greulich, Charakterisierung eines Displays zur Kommunikation eines autonomen Fahrzeugs, Bachelorarbeit, 2023

VIII ANHANG

Anhang A: ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

A.1 ABKÜRZUNGEN

ANOVA	<u>A</u> nalysis of <u>V</u> ariances
AV	<u>A</u> utonomous <u>V</u> ehicle
BMWi	<u>B</u> undes <u>m</u> inisterium für <u>W</u> irtschaft und <u>E</u> nergie
BMWK	<u>B</u> undesministerium für <u>W</u> irtschaft und <u>K</u> lima- schutz
CIE	<u>C</u> ommission <u>I</u> nternationale de l' <u>E</u> clairage
ECE	Siehe UNECE
eHMI	<u>e</u> xternal <u>H</u> uman <u>M</u> achine <u>I</u> nterface
FGÜ	<u>F</u> ußgänger <u>ü</u> berweg
HMI	<u>H</u> uman <u>M</u> achine <u>I</u> nterface
iHMI	<u>I</u> nternal <u>H</u> uman <u>M</u> achine <u>I</u> nterface

INITIATIVE	<u>I</u> ntell <u>I</u> gen <u>T</u> e <u>M</u> ensch- <u>T</u> echnik <u>K</u> ommunik <u>A</u> T <u>I</u> on im gemischten <u>V</u> erkehr
KIT	<u>K</u> arlsruher <u>I</u> nsitut für <u>T</u> echnologie
LCD	<u>L</u> iquid <u>C</u> ystal <u>D</u> isplay
LED	<u>L</u> ight <u>E</u> mitting <u>D</u> iode
LVK	<u>L</u> ichtstärk <u>e</u> verteilungs <u>k</u> urve
LZA	<u>L</u> ichtzei <u>ch</u> en <u>a</u> n <u>l</u> age
MV	<u>M</u> anual <u>V</u> ehicle
Px	<u>P</u> ixel
RR	<u>R</u> ecognition <u>R</u> ate
StVO	<u>S</u> traßen <u>v</u> erkehr <u>s</u> - <u>O</u> rdnung
StVZO	<u>S</u> traßen <u>v</u> erkehr <u>s</u> - <u>Z</u> ulassungs- <u>O</u> rdnung
UNECE	<u>U</u> nited <u>N</u> ations <u>E</u> conomic <u>C</u> ommission for <u>E</u> urope
VRU	<u>V</u> ulnerable <u>R</u> oad <u>U</u> ser

A.2 FORMELZEICHEN

α	Sehwinkel
α	Signifikanzniveau
Φ	Azimutwinkel
ρ	Reflexionsgrad
Θ	Polarwinkel
d	Cohen's d als Maß für die Effektstärke
$E_{Display}$	Beleuchtungsstärke auf der Displayoberfläche
H_0	Nullhypothese
H_1	Alternativhypothese
K_M	Michelson-Kontrast
K_W	Weber-Kontrast
L_{a10}	Leuchtdichte auf eingeschalteter Displayoberfläche erzeugt durch Bestrahlung mit Fremdlicht
L_{b10}	Leuchtdichte auf ausgeschalteter Displayoberfläche erzeugt durch Bestrahlung mit Fremdlicht
$L_{Display}$	Leuchtdichte des Displays = „Displayhelligkeit“
L_e	Displayleuchtdichte bei voller Aussteuerung

L_{Fremd}	Leuchtdichte erzeugt durch Fremdlicht
L_O	Objektleuchtdichte
L_{ph}	Phantomleuchtdichte
L_S	Symbolleuchtdichte
L_s	Signalleuchtdichte
L_U	Umfeldleuchtdichte
LR_{10}	Leuchtdichteverhältnis
n_c	Anzahl korrekt gegebener Antworten
N_t	Anzahl aller gegebener Antworten
RR_i	Erkennungsrate für Symbol i
v_{max}	Maximalgeschwindigkeit
$(x_{ph} y_{ph})$	Farbort Phantomlichtquelle
$(x_s y_s)$	Farbort Signalquelle
$(x_{s+ph} y_{s+ph})$	Farbort Überlagerung

Anhang B: FRAGEBOGEN UND ER- GEBNISDIAGRAMME

B.1 SYMBOLPROJEKTION – SYMBOLVERGLEICH

General Questionnaire

1. Have you previously participated in a similar study?

- No
- Yes

2. Please assess the difficulty of the experiment

- very simple
- simple
- medium
- difficult
- very difficult

3. Do you think the projected information could be helpful?

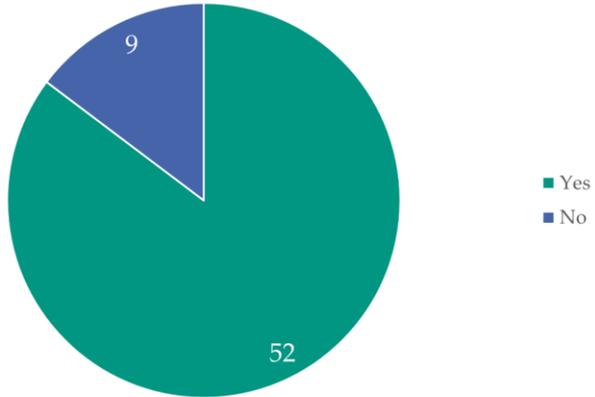
- No
- Yes, because

4. In which situations do you think a symbol projection could be helpful?

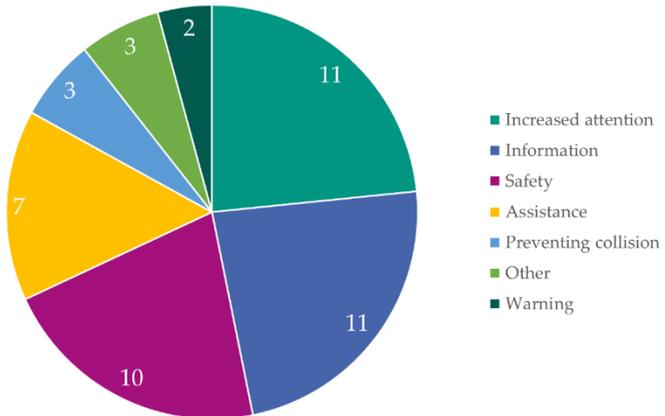
5. Would you be interested in participating in a study again?

- No
- Yes

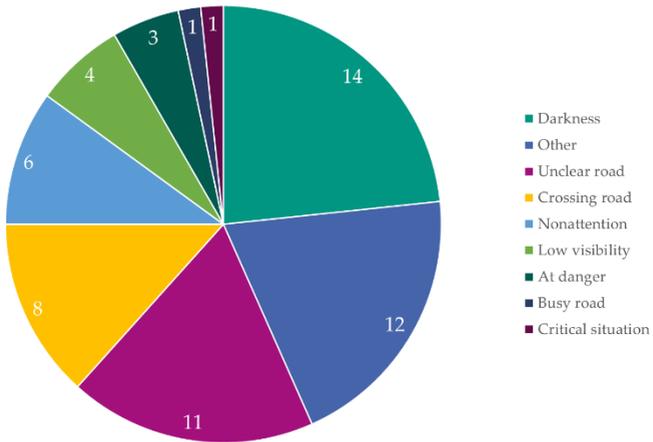
In your opinion, can the projected information be helpful?



Projected information can be helpful because:



In what situations could projected information be helpful?



Anhang C: AUSWERTUNG STATISTISCHER UNTERSUCHUNGEN

C.1 SYMBOLGRÖSSE

Sign

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)		
	<i>FULLBRIGHT</i>	<i>HALFBRIGHT</i>
Mittelwert	1,06666667	1,16621212
Varianz	0,09131667	0,09877348
Beobachtungen	33	33
Pearson Korrelation	0,89520156	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	32	
t-Statistik	-4,03829593	
P(T<t) einseitig	0,00015723	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,69388875	
P(T<t) zweiseitig	0,00031447	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,03693334	

Cross

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)		
	<i>FULLBRIGHT</i>	<i>HALFBRIGHT</i>
Mittelwert	1,27787879	1,27227273
Varianz	0,11124536	0,13257045
Beobachtungen	33	33
Pearson Korrelation	0,91336594	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	32	
t-Statistik	0,21723941	
P(T<=t) einseitig	0,41470048	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,69388875	
P(T<=t) zweiseitig	0,82940096	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,03693334	

Hand

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)		
	<i>FULLBRIGHT</i>	<i>HALFBRIGHT</i>
Mittelwert	1,18772727	1,25666667
Varianz	0,08343139	0,11703542
Beobachtungen	33	33
Pearson Korrelation	0,92607444	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	32	
t-Statistik	-2,99826711	
P(T<=t) einseitig	0,00260887	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,69388875	
P(T<=t) zweiseitig	0,00521773	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,03693334	

Arrows

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)		
	<i>FULLBRIGHT</i>	<i>HALFBRIGHT</i>
Mittelwert	1,33212121	1,36090909
Varianz	0,11212348	0,11888196
Beobachtungen	33	33
Pearson Korrelation	0,85248536	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	32	
t-Statistik	-0,89474946	
P(T<=t) einseitig	0,18880099	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,69388875	
P(T<=t) zweiseitig	0,37760198	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,03693334	

Symbolvergleich

Anova: Einfaktorielle Varianzanalyse						
ZUSAMMENFASSUNG						
Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz		
SIGN	33	36,8425	1,116439394	0,09003204		
CROSS	33	42,0775	1,275075758	0,11641386		
HAND	33	42,2897327	1,281507051	0,00897432		
ARROWS	33	46,43846708	1,407226275	0,00177675		
ANOVA						
Streuungsursache	Quadratsummen (SS)	Freiheitsgrade (df)	lere Quadratsumme (Prüfgröße (F))	P-Wert	kritischer F-Wert	
Unterschiede zw. Gruppen	1,404812325	3	0,468270775	8,62389146	2,95035E-05	2,675387275
Innerhalb der Gruppen	6,950303056	128	0,054299243			
Gesamt	8,355115381	131				

C.2 SYMBOLHELLIGKEIT

Eingestellte Helligkeit in Abhängigkeit der Umfeldbeleuchtung

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)		
	<i>LOW</i>	<i>HIGH</i>
Mittelwert	8,065637283	1,274347011
Varianz	17,08977381	0,303176444
Beobachtungen	52	52
Pearson Korrelation	0,602656599	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	51	
t-Statistik	12,7951186	
P(T<=t) einseitig	7,61923E-18	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,67528495	
P(T<=t) zweiseitig	1,52385E-17	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,00758377	

C.3 CYANLEUCHTE

Statisch vs. Dynamisch

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)		
	<i>Statisch</i>	<i>Dynamisch</i>
Mittelwert	17,35633333	6,890166667
Varianz	83,12298585	12,82860991
Beobachtungen	20	20
Pearson Korrelation	-0,101588215	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	19	
t-Statistik	4,621233279	
P(T<=t) einseitig	9,31472E-05	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,729132812	
P(T<=t) zweiseitig	0,000186294	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,093024054	

Ohne Lichthupe vs. Mit Lichthupe

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)		
	<i>Mit Lichthupe</i>	<i>Ohne Lichthupe</i>
Mittelwert	6,363166667	18,92666667
Varianz	5,331638632	69,19681491
Beobachtungen	20	20
Pearson Korrelation	0,189288418	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	19	
t-Statistik	-6,851051493	
P(T<=t) einseitig	7,72735E-07	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,729132812	
P(T<=t) zweiseitig	1,54547E-06	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,093024054	

Scheinwerfer Lichtlupe vs. Cyan Lichtlupe

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)		
	<i>Scheinwerfer Lichtlupe</i>	<i>Cyan Lichtlupe</i>
Mittelwert	6,597	6,890166667
Varianz	14,00525602	12,82860991
Beobachtungen	20	20
Pearson Korrelation	0,202391807	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	19	
t-Statistik	-0,28336106	
P(T<=t) einseitig	0,389982256	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,729132812	
P(T<=t) zweiseitig	0,779964512	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,093024054	

Ohne Cyan vs. Mit Cyan Status

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)		
	<i>Ohne Cyan</i>	<i>Mit Cyan Status</i>
Mittelwert	16,24116667	14,971
Varianz	50,03451962	32,98055567
Beobachtungen	20	20
Pearson Korrelation	0,823898249	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	19	
t-Statistik	1,416645357	
P(T<=t) einseitig	0,08638721	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,729132812	
P(T<=t) zweiseitig	0,17277442	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,093024054	