Ablenkpotenzial eines Baustellenlichtes auf andere Verkehrsteilnehmer Distraction Potential of a Construction Zone Light on Other Traffic Participants

M.Sc. Patric Jahn, Prof. Cornelius Neumann
Karlsruher Institut für Technologie – Lichttechnisches Institut, Engesserstr. 13, 76131 Karlsruhe

1 Abstract

Im nachfolgenden Paper werden die Methoden erläutert, mit denen das sogenannte Baustellenlicht hinsichtlich seines Ablenkpotenzials für andere Verkehrsteilnehmer untersucht wurde. Hierbei kam ein Eye-Tracking-System zum Einsatz, welches die Auswertung von Blickzuwendungsdauern erlaubte. Zusätzlich wurden subjektive Daten mittels eines Fragebogens erhoben. Insgesamt konnte der neuartigen Lichtfunktion kein Störpotenzial nachgewiesen werden, womit einem Einsatz aus wissenschaftlicher Sicht nichts im Wege steht.

In the following paper, the used methods to quantify the distraction potential of a construction zone light on other traffic participants are explained. The objective data has been measured with an eye-tracking-system, evaluating the fixation times. In addition, a questionnaire was used to gather subjective information. Overall, no distraction potential was detected. Therefore the construction zone light can be used in real traffic with no concerns.

2 Motivation

Als eine der ersten hochauflösenden Lichtfunktionen wird voraussichtlich eine spezielle Lichtverteilung für Baustellenbereiche verfügbar sein, wie sie in Abbildung 1 gezeigt wird. Dem Fahrzeugführer wird dabei die Breite sowie Trajektorie seines Fahrzeuges anzeigt. Um diese Lichtverteilung trotz Überlagerung mit dem Abblendlicht erkennen zu können, ist ein hoher Kontrast erforderlich. Dies bringt jedoch die Problematik mit sich, dass hohe Kontraste auch die Blicke anderer Verkehrsteilnehmer auf das Lichtmuster lenken könnten, was im Falle zu hoher Blickzuwendungszeiten (respektive Blickabwendung vom eigentlichen Fahrgeschehen) durch die Ablenkung ein Gefahrenpotenzial birgt. Um dieses Risiko zu quantifizieren wurde am Lichttechnischen Institut (LTI) eine volldynamische Probandenstudie durchgeführt. Zur Verfügung stand neben dem institutseigenen Versuchsfahrzeug ein AUDI A8L mit integriertem DMD-Scheinwerfermodul, welches von der AUDI AG zur Verfügung gestellt wurde.

Abbildung 1: Visualisierung des AUDI Baustellenlichtes [1]

3 Material und Methoden

3.1 Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands

Die Lichtverteilung sollte hinsichtlich ihres Ablenkungspotenzials für andere Verkehrsteilnehmer bewertet werden. Hierbei sollte weder der Nutzen für den Fahrer des Fahrzeuges mit Baustellenlicht, noch sonstige Systemparameter wie Kontrast, Einfluss der Straßenrauheit etc. berücksichtigt werden. Als Referenzlichtverteilung für die statistische Auswertung diente das Abblendlicht ohne zugeschaltetes Baustellenlicht. Als Messgröße wurde mittels eines Eye-Tracking-Systems die Blickzuwendungsdauer auf die andere Fahrbahn in verschiedenen Situationen aufgenommen.

3.2 Hypothesen

Die statistische Auswertung sollte folgende Hypothesen überprüfen, wobei bei Ablehnung der Nullhypothese H_0 (eine statistische Signifikanz liegt vor) die Alternativhypothese H_1 angenommen wird:

H0,a: Es gibt keinen Unterschied in den Blickzuwendungszeiten zwischen Situationen mit und Situationen ohne Baustellenlicht.

Die Alternativhypothese ist folglich:

H1,a: Die Blickzuwendungszeiten in Situationen mit Baustellenlicht sind signifikant länger als in Situationen ohne Baustellenlicht.

Weiterhin sollte untersucht werden, ob das Baustellenlicht einem Lerneffekt unterliegt, d.h. die Blickzuwendungsdauern nehmen bei mehrmaligem Sehen aufgrund der „Bekanntheit“ der Lichtfunktion ab. Die zugehörigen Hypothesen lauten:

H0,b: Es gibt keinen Unterschied in den Blickzuwendungszeiten zwischen Situationen, in denen das Lichtmuster das erste Mal gesehen wird und Situationen, in den das Baustellenlicht bereits bekannt ist.

H1,b: Die Blickzuwendungszeiten sind beim ersten Auftreten des Lichtmusters signifikant höher als in Folgesituationen.

3.3 Datenaufnahme und –auswertung

Die Blickbewegungen wurden mittels eines Remote-Eye-Tracking-Systems der Firma *Smart Eye* aufgenommen. Die Auswertung der Daten erfolgte dann mit der Analysesoftware *MAPPS* von *eyesDx*, wobei die eigene Fahrbahn und die Fahrbahn des Fahrzeuges mit Baustellenlicht jeweils als Region of Interest (ROI) definiert wurden. Abbildung 2 zeigt die beiden Regionen sowie den aktuellen Blickvektor in einer Situation mit aktiviertem Baustellenlicht. Auf die Situationen und den Versuchsablauf wird im nachfolgenden Kapitel näher eingegangen.

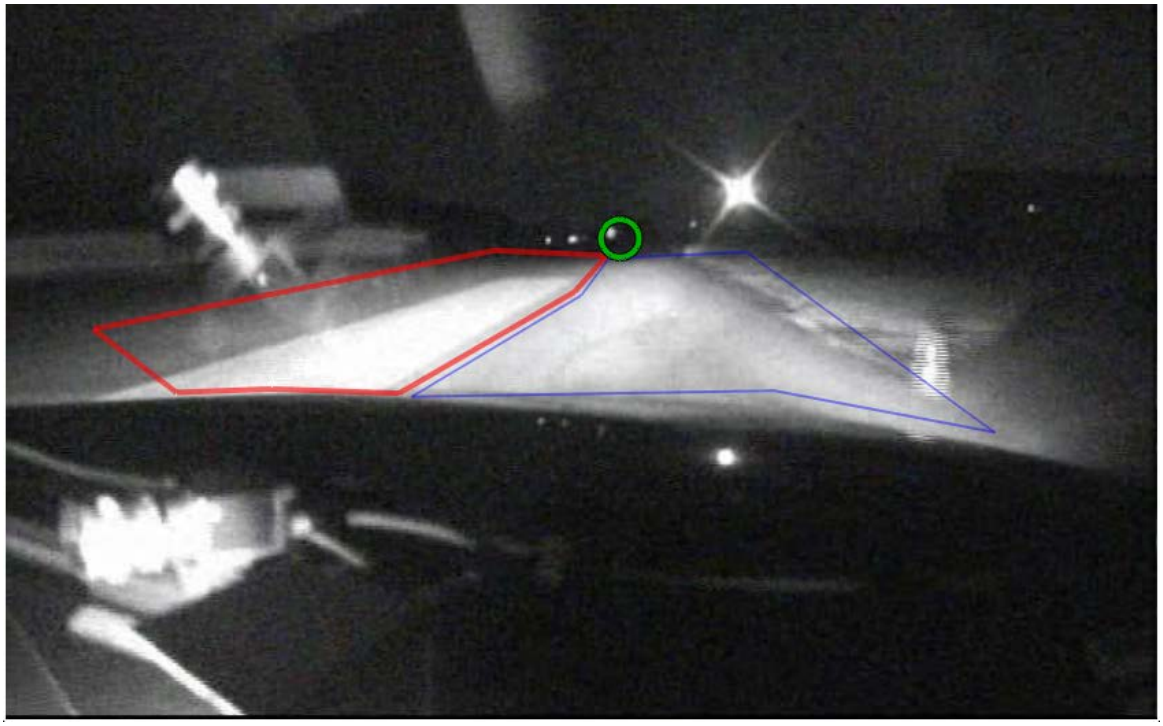

Abbildung 2: Screenshot aus MAPPS. In rot die ROI „linke Fahrbahn“, in blau die ROI „eigene Fahrbahn“. Der grüne Kreis ist die momentane Blickrichtung. Die scheinbare Blendquelle oberhalb der eigenen Fahrbahn ist lediglich Wärmestrahlung die von der IR-empfindliche Szenenkamera, nicht jedoch vom Auge erfasst wird.

3.4 Versuchsdesign

Die Untersuchung fand in Form einer volldynamischen Probanden-studie im within-subjects-Design statt, d.h. jeder Proband durchlief jede Situation. Zur Vermeidung von Positionseffekten war die Rei-henfolge vollständig randomisiert. Um die Belastbarkeit zu erhöhen, Ausreißer identifizieren und einen Lerneffekt ermitteln zu können musste jede Situation mindestens zwei Mal durchlaufen werden. Dennoch wurde jede Situation drei Mal durchlaufen, was einerseits die Belastbarkeit weiter erhöht, andererseits im Falle eines Messfeh-lers die Möglichkeit bietet, den Messwert zu verwerfen anstatt den Durchlauf zu widerholen, was eine Verfälschung mit sich bringen könnte.

Das Probandenkollektiv wurde in zwei Gruppen unterteilt, eine Gruppe mit Personen im Alter von maximal 30 Jahren, die andere von mindestens 50 Jahren. Dies ermöglicht einen Einfluss des Alters auf den Untersuchungsgegenstand festzustellen. Im Allgemeinen lassen sich jüngere Fahrer leichter ablenken, wie Studien von Stutts [2] zeigten. Über den eigentlichen Untersuchungsgegenstand wurden die Probanden im Unklaren gelassen, um einer Präjudizierung vorzubeugen. Ihre Vorabinformationen beschränkten sich auf die Teilnahme einer Studie zur Untersuchung des Blick-verhaltens in Überholsituationen.

Für die Untersuchung wurden zwei Situationen definiert: die Überholfahrt und die Parallelfahrt. Beide Situationen simulierten eine Fahrt durch eine Baustelle auf der Autobahn. Bei der Überholsituation wurde der Proband von dem mit Baustellenlicht ausgestatteten Fahrzeug überholt. In der Parallelfahrt wurde der Fall simuliert, dass der Fahrer mit Baustellenlicht sich nicht traut zu überholen und daher mit geringem Abstand auf der linken Fahrbahn hinter dem Probanden her fährt. Beide Situationen werden in Abbildung 3 skizziert.

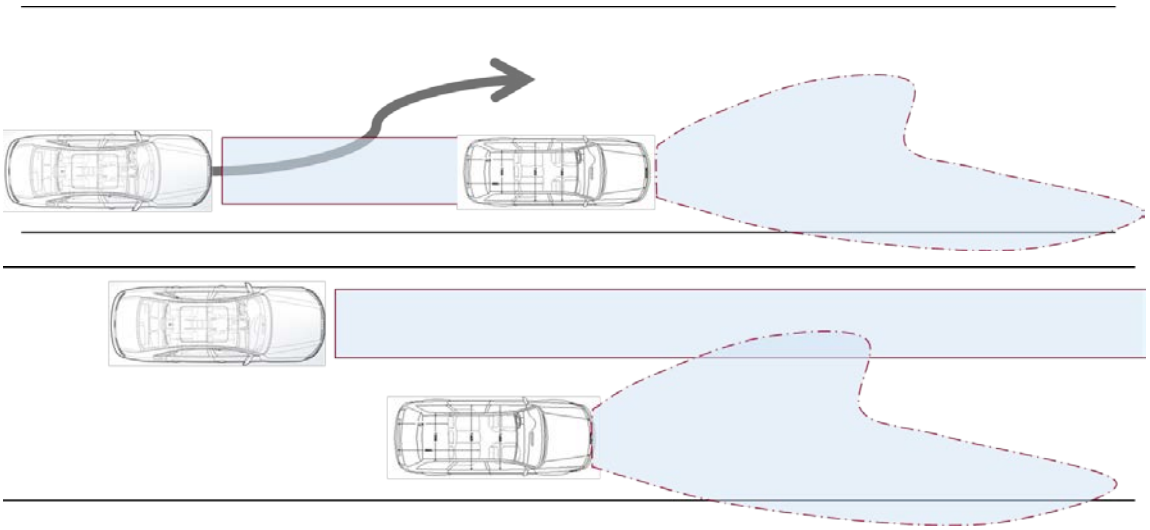

Abbildung 3: Schematische Darstellung der beiden Situationen; Überholfahrt oben, Parallelfahrt unten.

Als Testgelände wurde der Hockenheimring gewählt, da dieser weitestgehend frei von Störvariablen wie ortsfester Beleuchtung und anderer Verkehrsteilnehmer ist. Zwar ist dieser wesentlich breiter als eine Baustelle, auf einen Relativvergleich der beiden Situationen hat dies aber keinen Einfluss. Die Versuche fanden ausschließlich bei Trockenheit statt, da nasser Fahrbahnbelag die Ergebnisse aufgrund der erhöhten Vorwärtsreflexion verfälscht hätte.

Zusätzlich zu den objektiven Daten des Eye-Tracking-Systems wurden mittels eines Fragebogens subjektive Daten erhoben. Der Fragebogen wurde den Probanden aber nicht vollständig vorgelegt, sondern eine Frage nach der anderen in der vorgegebenen Reihenfolge. Ziel dessen war über den sukzessiven Aufbau (von allgemein zu detailliert) herauszufinden, wie prägnant die Lichtfunktion für den jeweiligen Probanden war um somit eine unvoreingenommene Bewertung des Systems hinsichtlich Ablenkung zu erhalten. Daher wurden sie immer gefragt, ob ihnen generell etwas aufgefallen sei und in der Folgefrage, ob sie etwas gestört habe. Die Reihenfolge ging dabei von „einer Situation“ über „das andere Fahrzeug“ zum „Licht des anderen Fahrzeugs“. Ordnet man den drei Stufen die Zahlenwerte 1-3 zu, repräsentiert der Mittelwert ein Maß für die Auffälligkeit und subjektive Bewertung des Systems. Darüber hinaus mussten die Probanden, sofern sie „ja“ ankreuzten, begründen bzw. erläutern, was ihnen aufgefallen sei oder was sie gestört habe. Somit konnten falsch-positive Antworten gefiltert werden. Abschließend wurden die Probanden noch nach ihrer Meinung gefragt, ob sie sich vorstellen könnten, dass die neue Lichtfunktion einen Beitrag zur Verkehrssicherheit leisten und/oder diese gefährden könne.

3.5 Versuchsablauf

Nach allgemeinen Einweisungen und formellen Fragebögen, wurden die Probanden optometrisch vermessen. Neben einem Mindestkontrastempfinden (5% für unter 50-jährige, 10% ab 50 J.) mussten die Probanden einen Visus von mindestens 0,8 (ab 50 Jahren) respektive 1,0 (unter 50 Jahren) aufweisen, um an der Studie teilzunehmen. Anschließend erfolgte die Kalibrierung des Eye-Trackings, gefolgt vom eigentlichen Versuchsablauf. Dieser ist in Abbildung 4 als Ablaufdiagramm dargestellt, wobei die horizontalen Linien der zeitlichen Einordnung dienen. Das Timing war wichtig um sicherzustellen, dass die Probanden die Lichtfunktion nur während der jeweiligen Situation, nicht aber bei den Wendemanövern sahen. Folglich wurde die Lichtfunktion erst direkt nachdem der Proband losgefahren ist aktiviert und noch vor dem Wenden wieder deaktiviert.

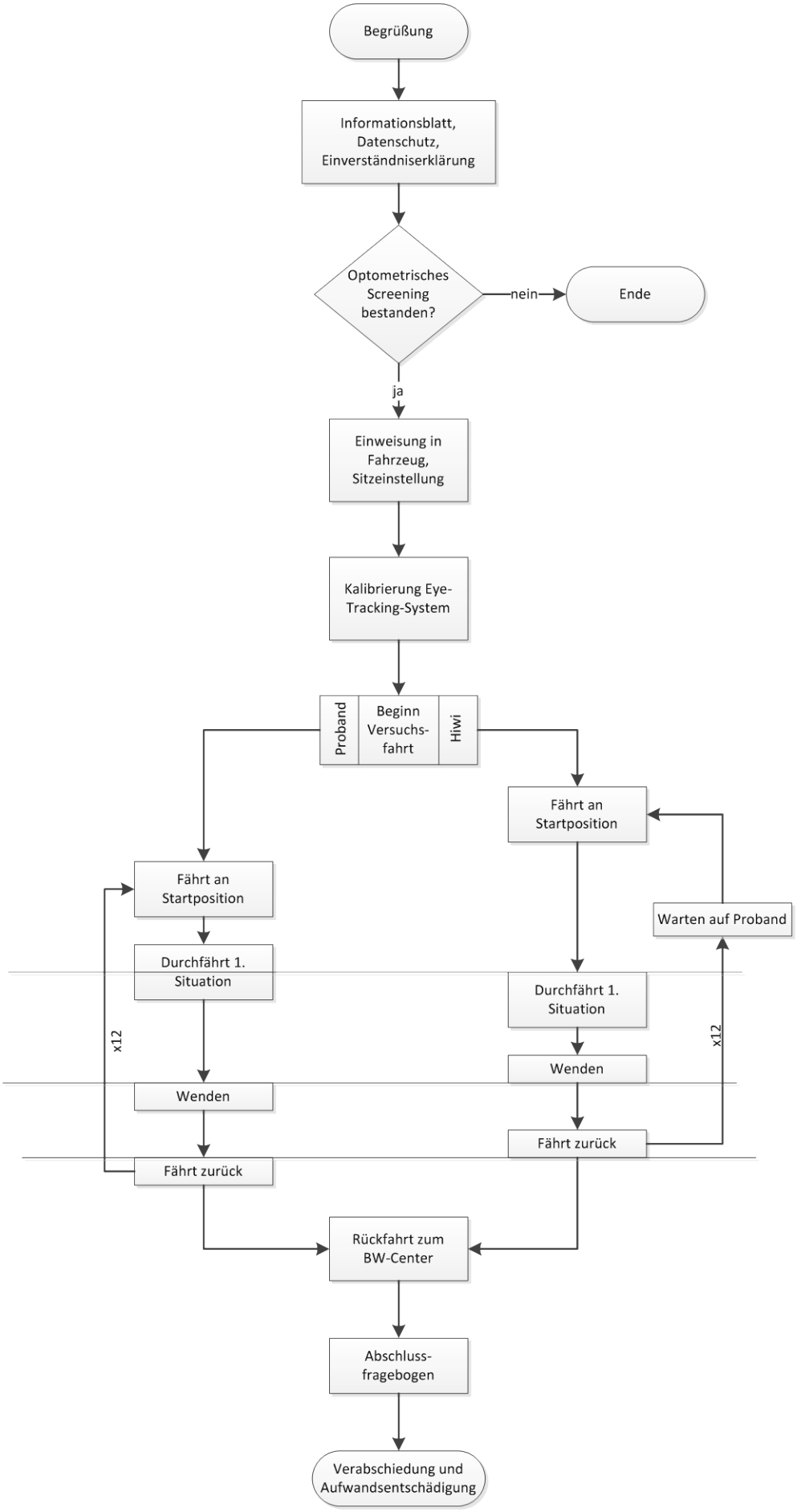

Abbildung 4: Flussdiagramm des Versuchsablaufs

4 Ergebnisse

Zur Überprüfung der Nullhypothese $H_{0,a}$, wurden die mittleren Blickzuwendungsdauern aller Situationen mit eingeschaltetem Baustellenlicht mit allen Situationen ohne Baustellenlicht verglichen. Erstere werden in den Statistiken kurz als DMD bezeichnet, letztere als REF oder Referenz. Da die kumulierten Blickzuwendungsdauern von der Dauer der Situation und somit von Geschwindigkeit, Überholzeitpunkt etc. abhängen würden, wurde nur das prozentuale Verhältnis „linke Fahrbahn“ zu „eigene Fahrbahn“ evaluiert. Das bedeutet, dass die Blickzuwendungszeiten innerhalb der beiden ROIs über eine Situation auch aufsummiert wurden, für die statistische Auswertung aber der hierin enthaltene Anteil der Blickzuwendung auf die linke Fahrbahn verglichen wurde. Dieser Anteil stellt somit die abhängige Variable dar.

Als statistischer Test wurde der t-Test herangezogen, aufgrund der Hypothesenformulierung in der einseitigen Form. Der Alpha-Fehler wurde auf den üblichen Wert von 5% gesetzt.

Tritt beim Test eine Signifikanz auf (somit gilt $H_{1,a}$; es gibt einen Unterschied zwischen Situationen mit und ohne Baustellenlicht), so heißt dies nicht automatisch, dass ein erhöhtes Ablenkpotenzial vorliegt. Es muss zunächst festgestellt werden, ob die erhöhten Blickzuwendungszeiten auch ein negativer Effekt auf die Fahrsicherheit haben können. Daher wurden im Nachhinein zusätzlich alle Situationen mit einer Blickzuwendungsdauer von mehr als 1,5 s am Stück individuell bewertet. Galt die Blickzuwendung beispielsweise dem wischenden Blinker, so kann dies natürlich nicht dem Baustellenlicht zugerechnet werden.

Weiterhin sollte überprüft werden, ob die Blickzuwendungsdauern über den Versuch hinweg nachlassen, es also einen Lern- oder Gewöhnungseffekt gibt. Da somit mit den gleichen Daten mehrere statistische Tests gemacht werden, würden sich die α-Fehler kumulieren, was unbedingt vermieden werden muss. Daher wurden die Daten der Bonferroni-Korrektur unterzogen.

4.1 Eye-Tracking-Daten

Insgesamt wurden die Eye-Tracking-Daten von 19 Probanden ausgewertet. Die ausgewerteten Blickzuwendungsdauern auf die linke Fahrspur wiesen, wie dies auch zu erwarten war, eine sehr hohe Streubreite auf. Zusammengefasst werden die Ergebnisse im Boxplot in Abbildung 5. Auf der Ordinate ist der Anteil der Blickzuwendungsdauer auf die linke

Fahrspur im Verhältnis zu der gesamten Blickzuwendungsdauer auf beide Fahrspuren aufgetragen.

Die Beschriftung der Boxen bezeichnet dabei jeweils den Mittelwert aus:

- DMD_1_Mean: Erste Überholsituation und erste Parallelfahrt mit Baustellenlicht
- DMD_3_Mean: Dritte Überholsituation und dritte Parallelfahrt mit Baustellenlicht
- REF_ALL_Mean: Alle sechs Situationen mit Abblendlicht (Referenz, Baustellenlicht ausgeschaltet)
- DMD_ALL_Mean: Alle sechs Situationen mit Baustellenlicht

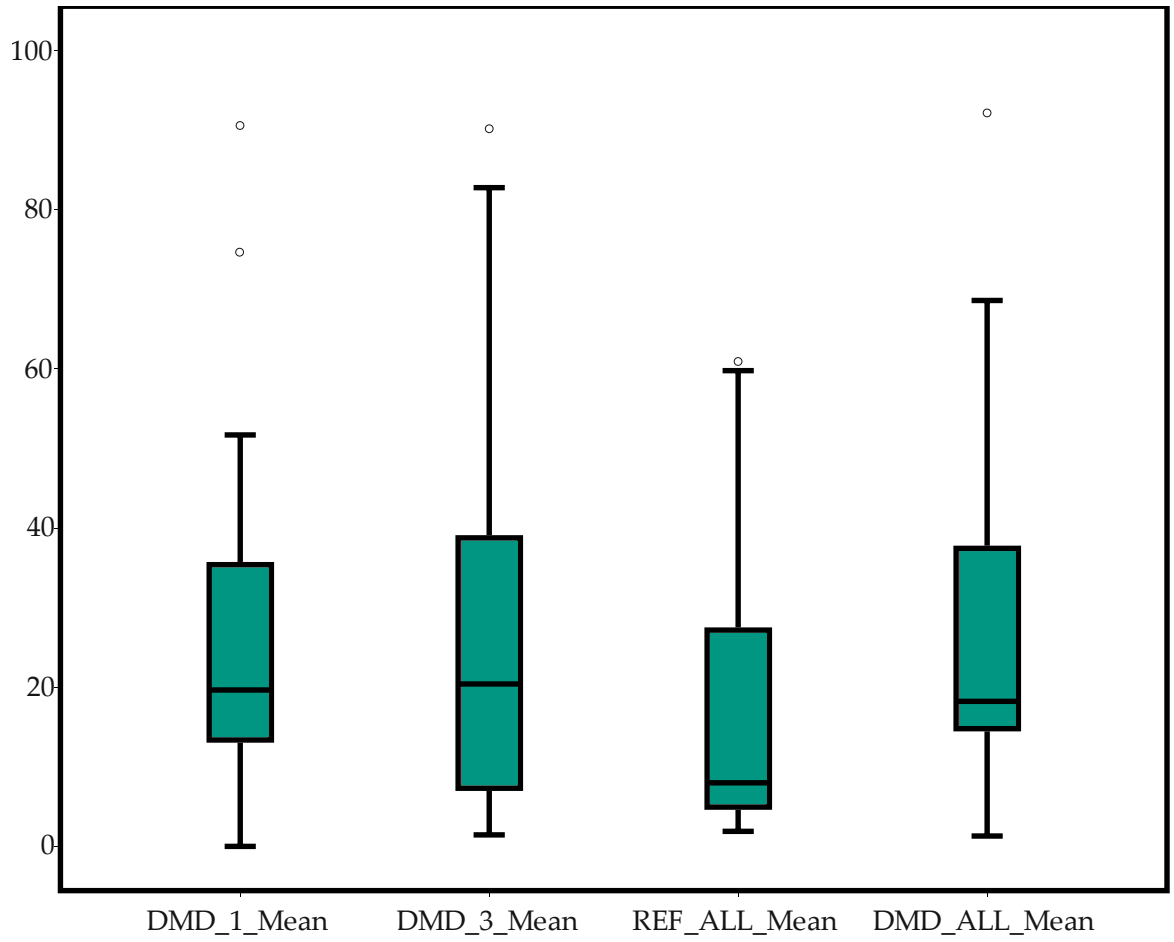

Abbildung 5: Boxplot der Blickzuwendungsdauern „linke Fahrspur“ in Prozent. 100% entspricht hierbei der kumulierten Blickzuwendungsdauer auf die linke und die eigene Fahrspur (N=19).

Bereits beim visuellen Vergleich von DMD_1_Mean mit DMD_3_Mean kann man erkennen, dass kein Lerneffekt stattgefunden hat. Die Mittelwerte sind mit 27,35% für die jeweils erste Situationskombination sogar minimal geringer als bei der dritten Situationskombination (28,02%). Damit kann die $H_{1,b}$ Hypothese nicht mehr zutreffen. Um auch statistisch

nachzuweisen, dass die $H_{0,b}$ Hypothese angenommen werden kann und nicht die $H_{1,b}$ invertiert werden muss, wurde der Vollständigkeit halber ein t-Test durchgeführt. Mit einem errechneten *p*-Wert von 0,853 liegt definitiv keinerlei Signifikanz vor, die $H_{0,b}$ Hypothese wird angenommen. Ein Lerneffekt kann also, zumindest im Rahmen dieser Studie, ausgeschlossen werden. Für einen langfristigen Lerneffekt ist dieses Ergebnis jedoch nicht repräsentativ.

Ebenso konnte bereits durch Sichtprüfung ein Alterseinfluss ausgeschlossen werden, weshalb auf diesen nicht näher eingegangen wird.

Für die Überprüfung der $H_{a,0}$-Hypothese und somit die wichtigste und entscheidende Hypothese der vorliegenden Studie ist der Vergleich zwischen REF_ALL_Mean und DMD_ALL_Mean (die beiden rechten Boxen) relevant. Hier lässt bereits die Sichtprüfung einen Unterschied vermuten, welcher sich über einen t-Test auch bestätigt. Mit p=0,001 kann von einer hohen Signifikanz gesprochen werden. Die Berechnung der standardisierten Differenz lieferte mit d=0,494 gerade noch einen kleinen Effekt, ab 0,5 wird von einem mittleren Effekt ausgegangen.

Zusätzlich zu den statistischen Tests wurden die absoluten Blickzuwendungsdauern bewertet. Blickabwendungszeiten vom eigentlichen Fahrgeschehen bis 1,5 s gelten laut Trefflich als „noch vertretbar“ [3]. Blickzuwendungen auf das Baustellenlicht, die über 1,5 s betrugen mussten somit individuell bewertet werden. Als Bewertungsrichtlinie wurden hier zu lange Blickzuwendungen genau dann als unkritisch eingestuft, wenn die Blicke an sich bereits im Fernfeld, weit genug vorne im Vorfeld und/oder in der Entfernung, in der der Proband auch ohne Baustellenlicht die meisten Fixationen aufwies, waren. In diesem Fall war gewährleistet, dass die Abweichung der Blickrichtung von der üblichen gering genug war, um potenzielle Gefahrenstellen nach wie vor rechtzeitig wahrzunehmen. Bei Blicken nah vor dem eigenen Fahrzeug, noch dazu auf der linken Fahrbahnseite, hätte dies nicht gewährleistet werden können. Weiterhin wurde überprüft, dass der Proband zwischen mehreren Fixationen auf das Baustellenlicht den Blick auch ins Fernfeld richtet. Dies kann als Indiz gesehen werden, dass er sich seiner Fahraufgabe noch bewusst ist und sich bewusst nicht gefährlich lange ablenken lässt. Unter allen ausgewerteten Fixationen konnten lediglich zwei als „potenziell gefährlich“ eingestuft werden. Hier sei jedoch angemerkt, dass dies im realen Straßenverkehr nicht unbedingt auch der Fall gewesen wäre. Da beide Situationen nicht die ersten Situationen mit Baustellenlicht sondern die mittlere bzw. letzte Situation waren, ist anzunehmen, dass der Versuchsablauf bereits vertraut war und somit auch die Tatsache, dass keine Gefahrensituationen simuliert wurden. Dennoch sind

die Ergebnisse der Untersuchung belastbar, da dauerhaft unaufmerksames Fahren nicht möglich war. Alle Probanden wurden vor Versuchsantritt gewarnt, dass Kröten und vor allem Hasen des Öfteren die Strecke passieren, was durchaus der Realität am Hockenheimring entspricht und nahezu jeden Versuchsabend bestätigt werden konnte.

4.2 Fragebögen

Wie in Kapitel 3.4 erläutert, wurde jede Frage mit einem Wert von 1-3 bewertet, wobei „1“ für das sofortige Identifizieren der neuartigen Lichtverteilung bereits bei allgemeinen Fragen sprach, „3“ erst bei der konkreten Nachfrage nach dem Licht des anderen Fahrzeuges. Der Extremfall, dass das Baustellenlicht gar nicht bemerkt wurde, wurde mit „4“ bewertet. Die Häufigkeitsverteilung kann Abbildung 6 entnommen werden, der Mittelwert liegt bei 1,50. Zwar erwähnten 75% der Probanden direkt die Lichtverteilung, jedoch fühlten sich lediglich 35% aller Probanden (unabhängig vom Zeitpunkt der Erwähnung) überhaupt davon gestört. Hierfür mag es verschiedene Gründe geben, nicht nur die Lichtverteilung an sich. Zwei der Probanden gaben Blendung oder die Helligkeit als Grund an. Dies könnte noch am Prototypenstatus der Scheinwerfer liegen, eine Blendung durch die Lichtverteilung ist aufgrund der geringen Leuchtdichte eher unwahrscheinlich. Als weitere Ursache für die Störung wurden das Wackeln der Lichtverteilung aufgrund der Nickbewegungen bei Unebenheiten der Fahrbahn sowie das ungewohnte Erscheinungsbild genannt. Einige Antworten wie „Parallelfahrt“ oder „Das Licht“ können nur schwer interpretiert werden.

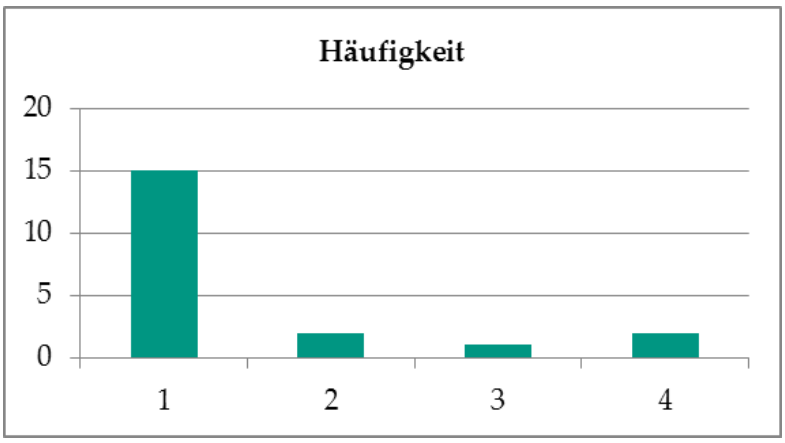

Abbildung 6: Histogramm der Fragennummer, wann das Baustellenlicht bemerkt wurde (1=sofort, 4=gar nicht; N=20).

Die übrigen Fragen sowie deren Antwortverteilung können den nachfolgenden Abbildungen entnommen werden.

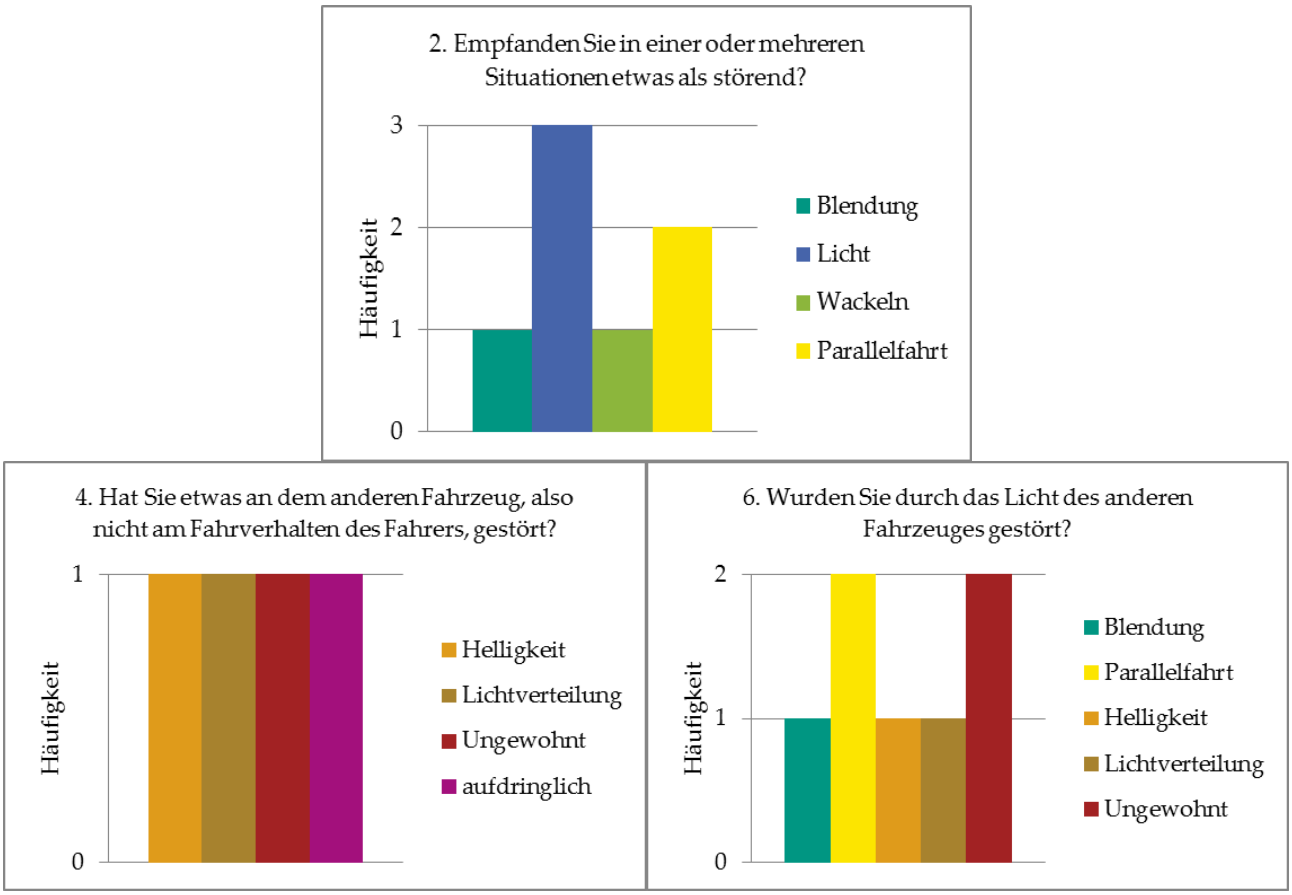

Abbildung 7: Verteilung der Antworthäufigkeiten nach der Störungsursache

Einen potenziellen Beitrag zur Verkehrssicherheit durch das Baustellenlicht sahen 15 Probanden, wohingegen nur 8 Probanden dem Baustellenlicht eine potenzielle Gefährdung zusprechen. Die Häufigste Erläuterung für einen Beitrag zur Verkehrssicherheit war das frühzeitige Erkennen eines Überholenden bzw. die fehlende Gefahr des toten Winkels (7 Mal), gefolgt von der Vermutung, dass man durch das hellere Vorfeld besser sehen kann (5 Mal). Ein Proband erwähnte auch die mögliche Prädiktion der Trajektorie des Überholenden, also z.B. Zeitpunkt und Distanz des Einschervorgangs. Dieser Effekt ist insofern bemerkenswert, als dass die Zahl der Unfälle mit Fahrzeugen, die in gleicher Richtung fahren (also genau die beiden untersuchten Situationen) sich im Jahr 2014 allein außerorts auf 6.913 belief. Nimmt man die Unfälle innerorts hinzu werden es gar 18.209 [4]. Einige dieser Unfälle wären durch das frühzeitige Erkennen des anderen Fahrzeuges sicher vermieden worden.

Als Risiko wurde überwiegend das ungewohnte Erscheinungsbild genannt (4 Mal) sowie die Möglichkeit der Blendung (2 Mal „es blendet“, einmal „es könnte blenden“). Es kann also davon ausgegangen werden, dass nach einer Gewöhnungsphase 16 der 20 Probanden kein Problem für die Verkehrssicherheit sehen würden.

Alle Antworten finden sich in den nachfolgenden Abbildungen wieder. Es sei darauf hingewiesen, dass aufgrund der freien Antwortmöglichkeit manche Probanden auch mehr als eine Begründung angaben, weshalb die kumulierte Häufigkeit der Antworten größer ist als die Nennung der 15 Probanden im Text.

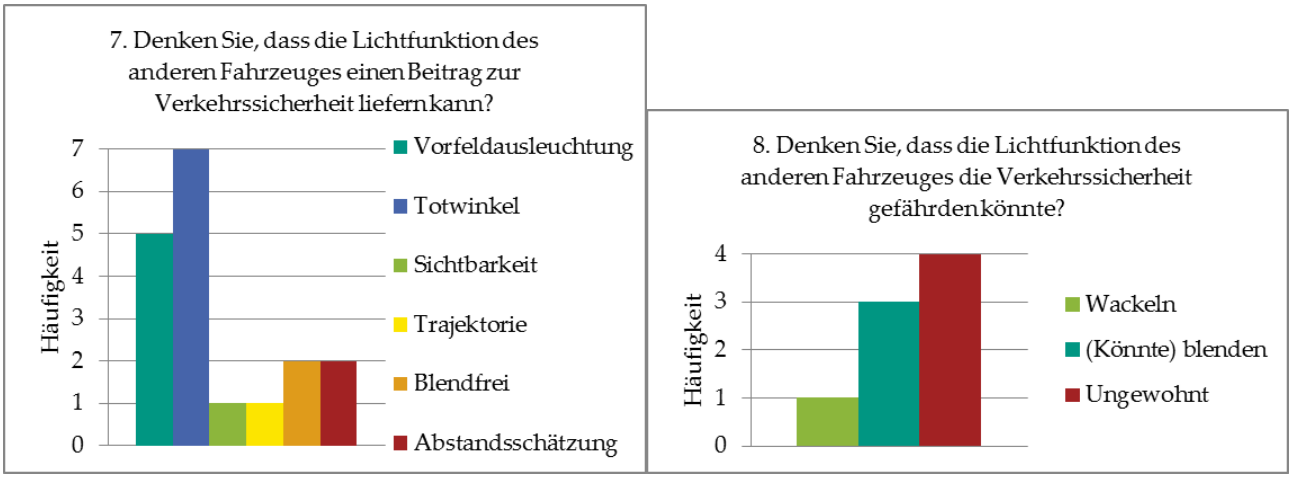

Abbildung 8: Verteilung der Antworthäufigkeit eines potenziellen Sicherheitsgewinns und -risikos

5 Fazit

Aus den Eye-Tracking-Daten geht hervor, dass das Baustellenlicht grundsätzlich ein visuell attraktives Muster darstellt. So war der Anteil der Blickzuwendungsdauer auf die linke Fahrspur bei eingeschalteter Lichtfunktion signifikant höher, als wenn diese deaktiviert war. Dennoch konnten die Blickzuwendungen insgesamt als unkritisch bewertet werden.

Die subjektive Datenerhebung über Fragebögen bestätigte die These. Da die Probanden den Untersuchungsgegenstand an sich bis zum Ende nicht kannten, sind einige scheinbare Kritikpunkte nicht auf die Funktionalität an sich zurückzuführen.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass das System nach Implementierung einer aktiven Regelung gegen Bodenwellen sowie abschwächen der harten Kanten seltener als störend empfunden wird. Dies, sowie ein langfristiger Gewöhnungseffekt, kann aber nur durch weitere Untersuchungen bestätigt werden.

6 Quellen

[1] AUDI AG, *Lichtsysteme der Zukunft* (2015), www.audi.de/content/dam/vorsprung_durch_technik/Video/2015/03/Audi%20lighting%20technology/W2015052_Matrix_Laser_Animation_de_prev.mp4 (20.05.2016).

[2] J. C. Stutts, D. W. Reinfurt, E. A. Rodgman, *Annual proceedings / Association for the Advancement of Automotive Medicine. Association for the Advancement of Automotive Medicine* **2001**, *45*, 287.

[3] B. Trefflich, *Videogestützte Überwachung der Fahreraufmerksamkeit und Adaption von Fahrerassistenzsystemen*, 1st ed., Audi Dissertationsreihe, Bd. 26, Cuvillier, Göttingen, 2010.

[4] Statistisches Bundesamt, *Verkehrsunfälle 2014*, Wiesbaden, 2014.