

Physiologische Untersuchung von fahrzeugbasierten Fahrbahnprojektionen

*Tobias Glück, Max Caspar Sundermeier, Zhuoqun Dai, Roland Lachmayer
Institut für Produktentwicklung und Gerätebau
Deutschland, 30823 Garbsen, An der Universität 1*

Zusammenfassung

Bei Nachtfahrten haben fahrzeugbasierte Fahrbahnprojektionen das Potential die Sicherheit und den Komfort im Straßenverkehr zu steigern. Um den Einfluss von fahrzeugbasierten Fahrbahnprojektionen auf die sicherheitsrelevante Wahrnehmung des Fahrers zu untersuchen, wird mit einem Projektionssystem eine Probandenstudie durchgeführt.

Ziel der Untersuchung ist der Vergleich des Ablenkungspotentials bei Wegbeschreibungen über Head-Up Display, Smartphone in Halterung und Fahrbahnprojektion. Dazu werden drei Ziele, welche ein ähnliches Streckenprofil aufweisen, jeweils mit einem der drei Navigationssysteme angefahren und das Blickverhalten aufgezeichnet.

In einem Vergleich mit den Eye-Tracking Daten der anderen beiden Navigationssysteme ist festzustellen, dass sich der Blick des Fahrers bei der Symbolprojektion mehr im Bereich des Straßengeschehens befindet.

1 Einleitung

In der Dämmerung und Dunkelheit passieren im Verhältnis zur Verkehrsdichte nach wie vor mehr schwere Verkehrsunfälle als tagsüber. In Deutschland ist seit Anfang der Neunziger Jahre der Anteil der Verkehrstoten von rund 50 % auf 33 % im Jahr 2019 gesunken [1]. Die verbesserte Lichttechnik hat zu diesem Trend beigetragen, wie aus einem Vergleich mit den Verkehrsdaten der USA ersichtlich wird, da in den USA bis ins Jahr 2021 nur statische Lichtverteilung erlaubt waren und der Anteil der Verkehrstoten bei Dunkelheit nicht rückläufig ist [2].

Ein wichtiger Meilenstein in der Fahrzeuglichttechnik ist die Einführung von Matrix-Scheinwerfern im Jahr 2013, mit denen dauerhaft blendfreies Fernlicht möglich ist. Die optimierte Ausleuchtung des Verkehrsraums ermöglicht eine frühzeitigere Erkennung von Gefahren durch Fahrer und System. Bei Versuchen mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h wurde 0,6 s bzw. 11,5 m früher reagiert als mit einem statischen Frontbeleuchtungssystem, bei dem nur das Abblendlicht aktiviert ist [3,4].

Davon ausgehend werden Überlegungen bekräftigt, mithilfe der Fahrzeugbeleuchtung zusätzliche Informationen an die fahrende Person und andere Verkehrsteilnehmer zu kommunizieren [5-8]. Auf diese Weise kann die Sicherheit und der Komfort im Straßenverkehr weiter erhöht werden. Durch die Abbildung von Spurenprojektionen bzw. eines sogenannten

Lichtteppiches kann die fahrende Person das eigene Fahrzeug räumlich besser einordnen und ist über einen größeren Zeitraum mittig auf der eigenen Fahrspur (über 90% im Vergleich zu vorher mit 60 bis 80 %) [9]. Andere Untersuchungen befassen sich mit einem eventuellen, negativen Einfluss von Straßenprojektionen. GLÜCK et. al. zeigen, dass die meisten anderen Verkehrsteilnehmern die Projektionen nicht wahrnehmen. Selbst wenn die Projektion wahrgenommen wird, beträgt die Dauer einer Fixierung aber im Durchschnitt weniger als eine Sekunde und liegt damit unterhalb der kritischen Grenze von 1,6 s [10]. Selbst bei nassen Straßen blenden projizierende Scheinwerfer nicht mehr als übliches Abblendlicht [11].

Derzeit sind bereits 4 Lichtprojektionen für verschiedene Situationen zugelassen [12], allerdings ist bisher noch keine Studie durchgeführt worden, welche die Eignung dieser Projektionen im Rahmen der jeweiligen Situation im Vergleich mit dem HUD evaluiert [13].

2 Studiendesign

Die vorliegende Studie untersucht den Nutzen einer Projektion im Vergleich zu einem HUD im realen Straßenverkehr. Aufgrund der Verkehrssicherheit wird für die Studiendurchführung mit Navigationshinweisen eine nicht-sicherheitsrelevante Funktion als Projektionselement gewählt.

Im Rahmen der Versuchsplanung werden zunächst die relevanten Parameter identifiziert, welche einen Einfluss auf die Studienergebnisse haben. Dazu wird ein Ishikawa-Diagramm (siehe Abbildung 1) erstellt, um die relevanten Parameter zu kategorisieren. Eine detaillierte Erläuterung der fünf Gruppen erfolgt in den jeweiligen Unterkapiteln.

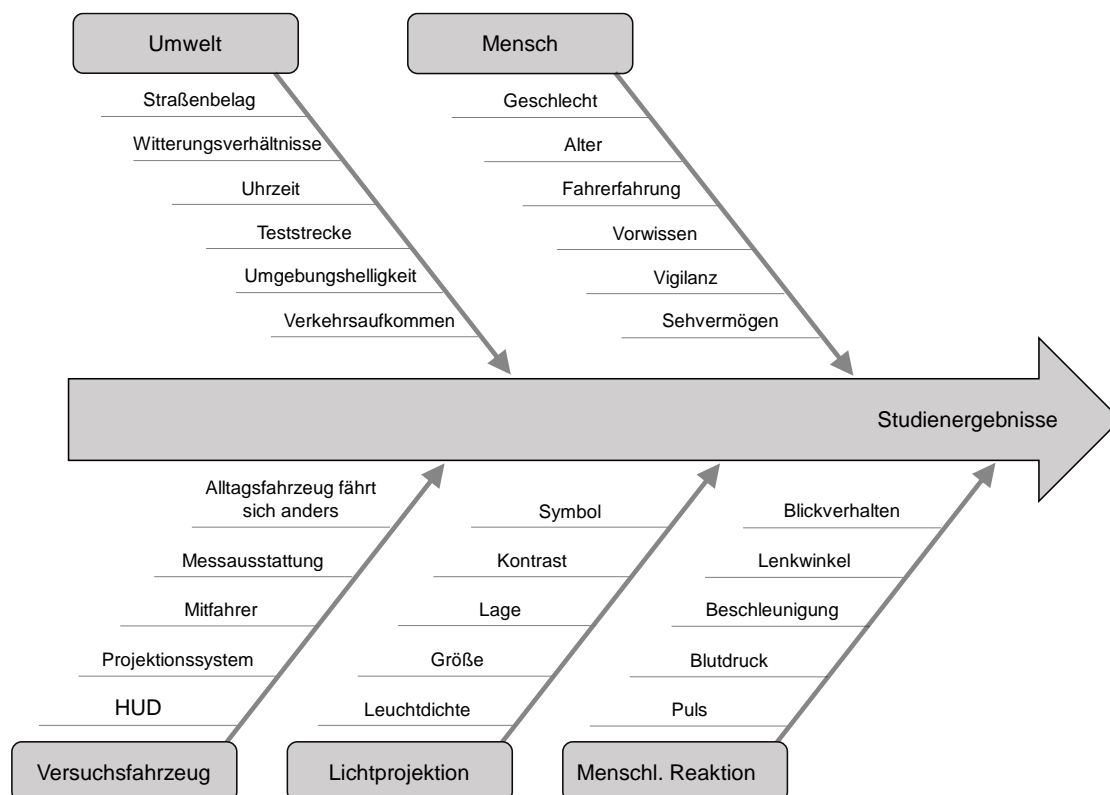


Abb. 1: Ishikawa Diagramm mit Einflussfaktoren auf die Studienergebnisse dieser Probandenstudie im Straßenverkehr

2.1 Umwelt

Die volldynamische Probandenstudie findet im within-subjects-design statt. Dabei durchläuft jeder Proband jeden Testabschnitt der Studie. Zur Vermeidung von Positionseffekten ist die Reihenfolge der Testabschnitte randomisiert und ebenso die Navigationsart des jeweiligen Abschnittes. Die Probandenfahrt findet in der Stadt Hannover (Deutschland) statt und die Abschnitte sollen dabei möglichst ähnlich aufgebaut sein. Dazu werden drei Start-/Endpunkte (A, B und C) in Hannover festgelegt, welche in Abbildung 2 hervorgehoben sind, die in zufällig abwechselnder Richtung je Fahrt abgefahren werden und dabei randomisiert eine der drei Navigationsarten zugeteilt bekommt. Die Dauer der jeweiligen Abschnitte soll zeitlich, soweit es möglich ist, übereinstimmen. Eine Probandenfahrt besteht aus drei Teilen und wird dreiecksartig abgefahren.

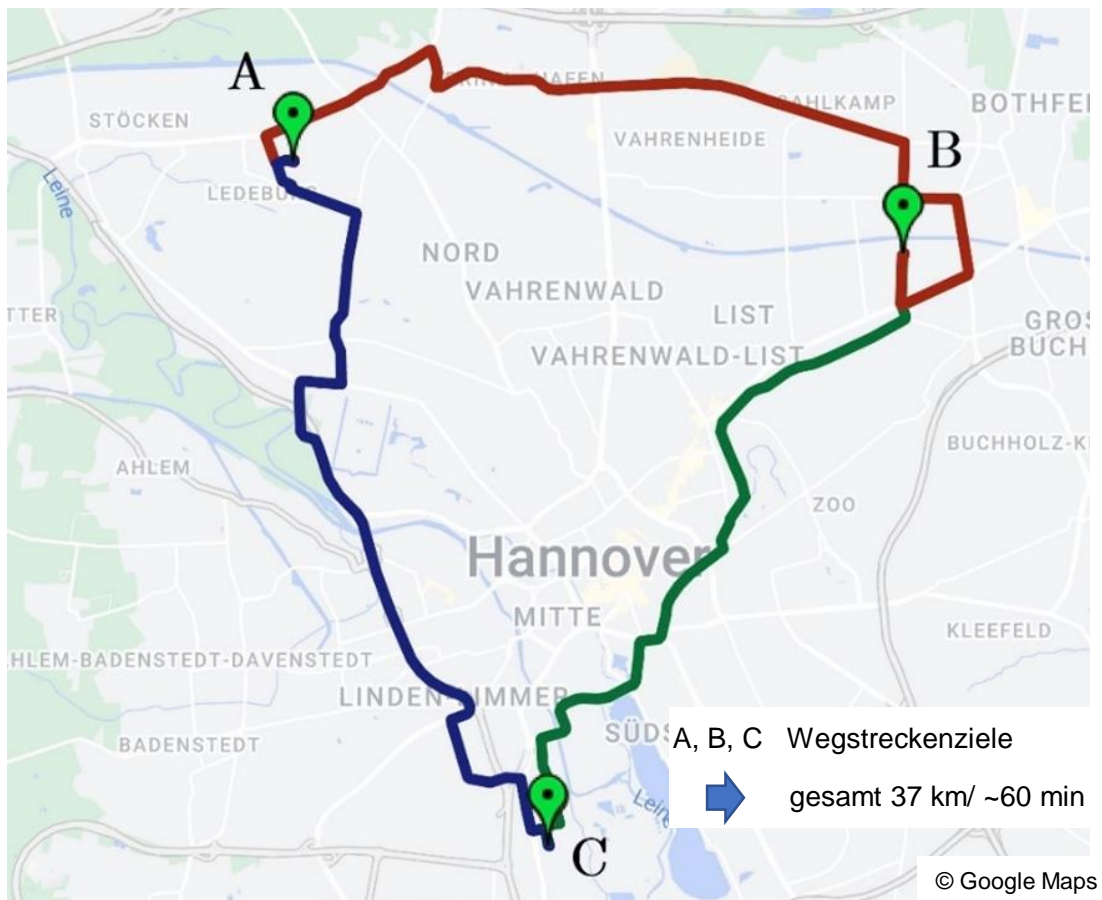


Abb. 2: Die 3 Ziele sind mit A, B und C markiert und mit der schnellsten Route ohne Verkehr verbunden [14]

Für eine ausreichende Sichtbarkeit der Projektion findet die Probandenfahrt im Dunkeln statt. Startzeitpunkt der Probandenfahrt ist frühestens bei Beginn der nautischen Dämmerung. In der Winterzeit sind damit Probandenfahrten bereits ab 17 Uhr möglich, welche dann im Feierabendverkehr stattfinden. Dieser hat eine komplexere Beleuchtungssituation zur Folge, bei der sich die Straßenprojektion bewähren soll. In statischen Situationen beträgt die Umgebungsleuchtdichte ohne künstliche Lichtquellen ungefähr 0,3 lx und unter Straßenlaternen durchschnittlich 16 lx.

Der Zustand des Straßenbelags ist für die Sichtbarkeit der Projektion ebenfalls entscheidend, weshalb die Beschaffenheit bei jeder Fahrt festgehalten wurde. Regenfälle, die während der Fahrt aufgekommen sind und die Fahrbahn beeinflusst haben, konnten allerdings nicht gänzlich verhindert werden.

2.2 Mensch

Für die Probandenfahrt werden Menschen mit unterschiedlicher Fahrerfahrung ausgewählt, welche für jeden Probanden dokumentiert wird und möglichst gut unter den Probanden verteilt sein soll. Die Probanden erhalten vor Beginn der Fahrt die gleichen Informationen, um möglichst gleich auf die Fahrt vorbereitet zu sein. Ebenfalls wird festgehalten, ob der Proband eine Brille trägt oder andere Sehschwächen aufweist.

Im Rahmen dieser Probandenstudie haben insgesamt 11 Personen die Probandenfahrt absolviert. Davon sind 9 Probanden männlich und zwei weiblich. 3 Probanden haben während der Fahrt eine Brille getragen. Das Durchschnittsalter der Probanden liegt bei 27 Jahren, der jüngste Proband ist 23 und der älteste Proband 31 Jahre alt. Die Fahrleistung liegt zwischen unter 1000 km bis 20.000 km.

2.3 Versuchsfahrzeug

Das Versuchsfahrzeug ist ein SUV der oberen Mittelklasse. Die Einrichtung des Testfahrzeug bleibt bei allen Probandenfahrten gleich und wird nur der Größe des Probanden angepasst. Gleichzeitig wird dem Probanden vor der Testfahrt die Möglichkeit gegeben, sich mit dem Auto auseinander zu setzen und derjenige muss zunächst eine kleine Strecke zum Versuchsort fahren. Die Navigation kann für den Probanden neben einem Smartphone mit Halterung an der Windschutzscheibe, auch über ein Smartphone als HUD sowie dem Projektionssystem auf dem Dach erfolgen.

2.4 Lichtprojektion

Zur Vergleichbarkeit der Versuchsdurchführung werden die physikalischen Parameter der Systeme konstant gehalten. Dazu gehören der Lichtstrom des Beamers, der Projektionswinkel, die Lage und Größe der Projektion und die Art der Projektion. Der Beginn der Projektion ist ungefähr 8 m von dem Probanden entfernt und die Breite der Projektion entspricht in etwa der Breite des Fahrzeugs. In Abbildung 3 wird die Projektion mit eingeschaltetem Abblendlicht auf trockenem Asphalt ohne weitere Umgebungsbeleuchtung sowohl in der Perspektive eines Radfahrers/ Fußgängers rechts neben dem Fahrzeug als auch die Fahrerperspektive dargestellt.



Abb. 3: Darstellung der Straßenprojektion mit eingeschaltetem Abblendlicht auf trockenem Asphalt

Um die Helligkeit der Projektion zu quantifizieren, wird eine Leuchtdichtenmessung mit einer Leuchtdichtekamera durchgeführt. Die Leuchtdichtemessung findet auf stadttähnlichem Asphalt statt. Die Kamera wird auf Kopfhöhe des Probanden platziert. Bei der in Abbildung 3 gezeigten Messung beträgt die minimale Leuchtdichte $1,2 \text{ cd/m}^2$ im Bereich vor der Projektion und die maximale Leuchtdichte $6,3 \text{ cd/m}^2$ innerhalb der Projektion. Die Projektion erreicht somit im vorliegenden Szenario nach DIN EN ISO 15008 ein maximales Kontrastverhältnis von 5,25:1. Am oberen Teil des Pfeils lässt der Kontrast allerdings nach, da der Abstand zum Projektionsgerät steigt. Bei vergleichbaren Bedingungen kann die Projektion aus der Probandenstudie GLÜCK et al. einen maximalen Kontrast von 1,875:1 erzielen [10].

In Tabelle 1 sind weitere Werte zur Leuchtdichtemessung für typische Szenarien bei der Probandenfahrt zu sehen. Das Kontrastverhalten bei nasser und trockener Fahrbahn ist etwa gleich, wobei bei nasser Fahrbahn die Kontrastwerte etwas höher sind, die maximalen Leuchtdichten jedoch deutlich geringer. Für die HUD-Darstellung ist ein Kontrastwert von 32:1 im abgedunkelten Bereich und ein Kontrastwert von 7,5:1 im Bereich mit Laternen gemessen worden.

Tab. 1: Werte der Leuchtdichtemessung und Kontraste für verschiedene Szenarien

Art des Szenarios	L_{\min} in cd/m^2	L_{\max} in cd/m^2	Kv
Projektion abgedunkelt	1,2	6,3	5,3
Projektion abgedunkelt nass	0,3	2,0	6,7
Projektion abgedunkelt ohne ABL	0,2	5,8	32,6
Projektion abgedunkelt ohne ABL nass	0,1	1,7	34,0
Projektion Laterne	2,4	6,0	2,5
Projektion Laterne nass	0,7	1,9	2,7

2.5 Menschliche Reaktion

Die Reaktionen der Probanden lassen sich aus den Veränderungen von Blutdruck, Puls oder Augenbewegungen ableiten. Starke Lenkbewegungen sowie eine starke Beschleunigung oder Verzögerung können ebenfalls mögliche Reaktionen auf den Straßenverkehr darstellen. Für diese Studie wird das Blickverhalten der Probanden als die entscheidende Reaktion betrachtet, da Blicke weg von dem Verkehrsgeschehen als mögliche Ablenkung bzw. mehr Blicke in die Zone des Verkehrsgeschehens für eine höhere Verkehrssicherheit gewertet werden können. Die betrachtete Zone wird mit einem Eye-Tracking-System erfasst. Für eine weitgehend automatisierte Auswertung, die möglichst unabhängig von den Kopfbewegungen der Probanden ist, werden QR-Code-ähnliche Quadrate als statische IR-Marker im Testfahrzeug verwendet (siehe Abbildung 4). Auf diese Weise können fahrzeugbezogene Areas of Interest (AOI) für den Auswerteprozess definiert werden.

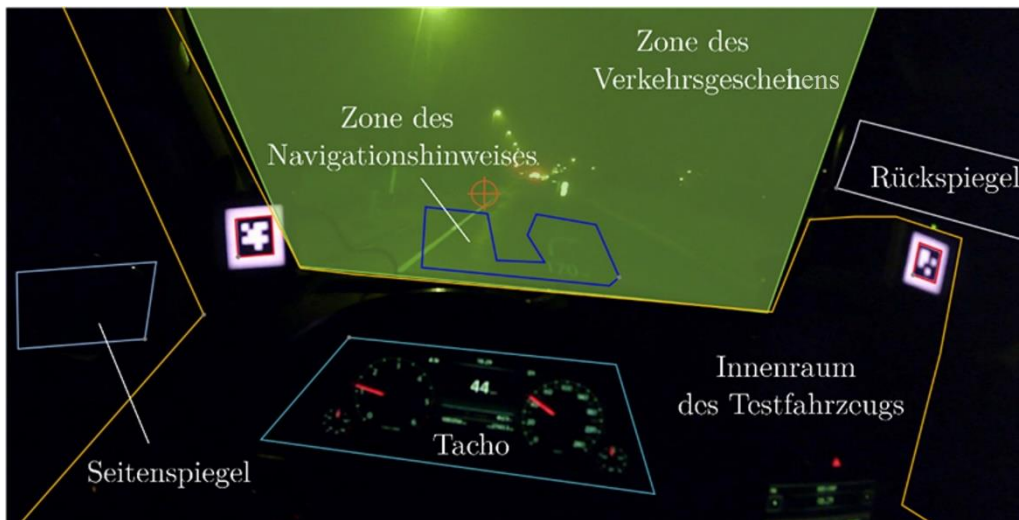


Abb. 4: Eye-Tracking-Aufnahme mit eingezeichneten AOIs. Das rote Fadenkreuz zeigt die Blickrichtung an

3 Studienergebnisse

Von den 11 Fahrten haben 3 bei trockener, 5 bei leicht feuchter und 3 bei feuchtnasser Straße stattgefunden. Bei einer der Fahrten ist nach einiger Zeit ein starker Regenfall aufgetreten. Dabei wird festgestellt, dass die Projektion nicht mehr auf der Straße zu erkennen ist.

Bei den Studienergebnissen werden die objektiven Eye-Tracking Daten und subjektiven Antworten aus den Fragebögen getrennt voneinander vorgestellt.

3.1 Eye-Tracking Daten

Aufgrund eines technischen Problems sind nur von 10 Probanden die Eye-Tracking Daten vorhanden. Durch weitere Umstände wie Justierungsfehler, Ausfall von Systemen und Unwettervorkommnisse sind einzelne Streckenabschnitte nicht auswertbar, sodass sich insgesamt 8 vollständige Probandenfahrten ergeben.

Die Blickdaten werden nur während der Fahrt ausgewertet, da das Blickverhalten bei Standzeiten, wie z.B. vor roten Ampeln, von dem Blickverhalten während der Fahrt abweicht. Für die Studie werden die AOIs „Innenraum des Testfahrzeugs“, „Zone des Verkehrsgeschehens“ und „Zone des Navigationshinweises“ betrachtet. Die „Zone des Navigationshinweises“ wird an die jeweilige Navigation angepasst, sodass die Blickanteile auf die Bereiche der Navigationshinweise bei der Mobiltelefonhalterung (MH) mit unter den Bereich Innenraum des Autos und die Blickanteile beim HUD und bei der Projektion mit in den Blickanteil des Verkehrsgeschehens fallen.

Blicke unter 120 ms werden nach DIN EN ISO 15007-1 nicht betrachtet. Aus diesen Daten kann die relative Blickverteilung zwischen den AOIs berechnet werden. Blickanteile abseits des Verkehrsgeschehens und des Innenraums des Autos werden unter Sonstiges beschrieben. Der Blickanteil des MH liegt bei 3,54%, beim HUD bei 7,81% sowie 9,81% bei der Projektion und ist in Abbildung 5 blau schraffiert dargestellt.

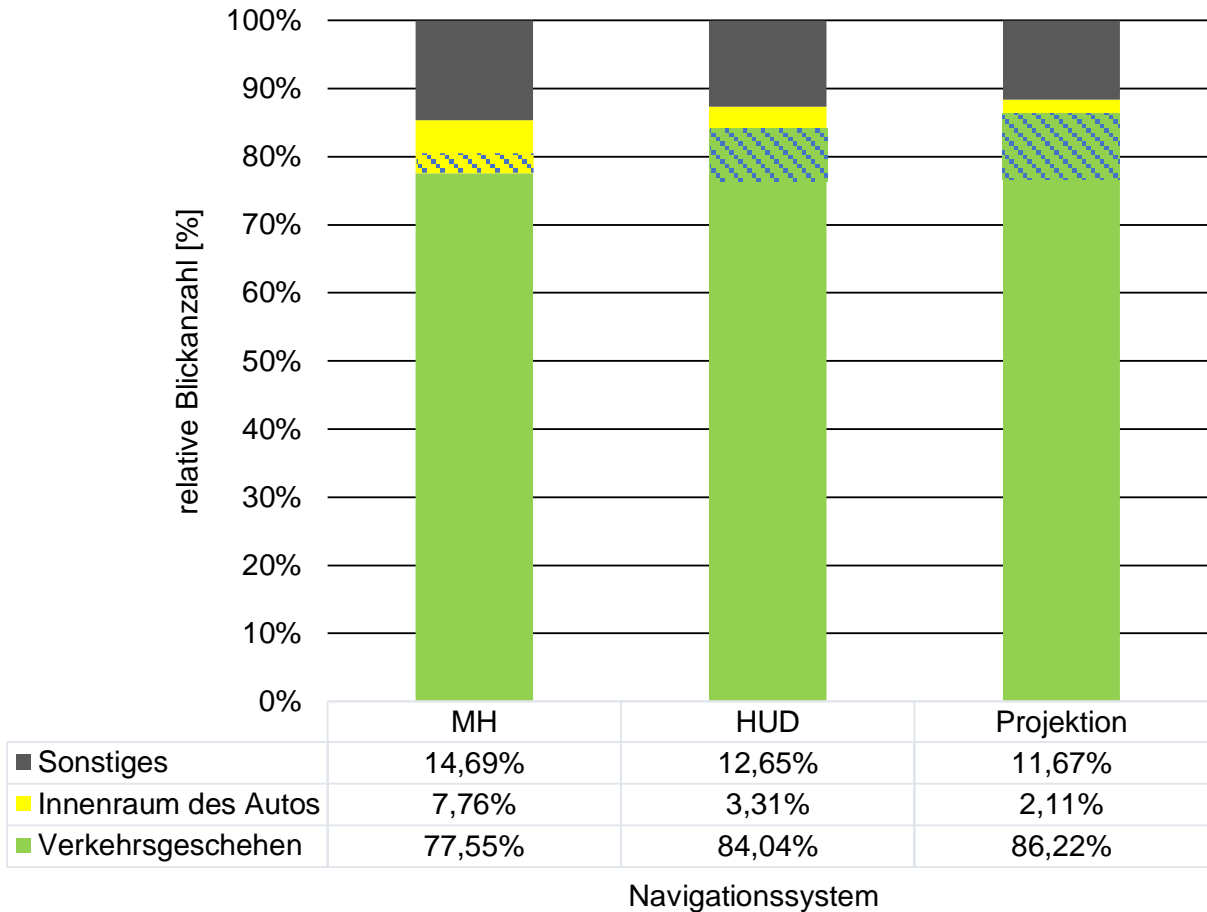


Abb. 5: Relative Blickanzahl während der Fahrt mit verschiedenen Navigationssystemen

3.2 Fragebögen

Nach der Probandenfahrt werden mit den Probanden eine Befragung durchgeführt. Die Probanden bewerten die Sichtbarkeit der Projektion von einer Skala von 1 (sehr gut) bis 10 (sehr niedrig). Die Bewertung der Probanden ist in Abbildung 6 zu sehen. Die Sichtbarkeit ist mit einer Ausnahme von den meisten Probanden mit gut bis sehr gut bewertet worden. Die schlechtere Bewertung wurde von dem Probanden bei der oben beschriebenen Regenfahrt vergeben. Einen Zusammenhang zwischen Feuchtezustand der Straße und Bewertung der Sichtbarkeit gibt es hingegen nicht.

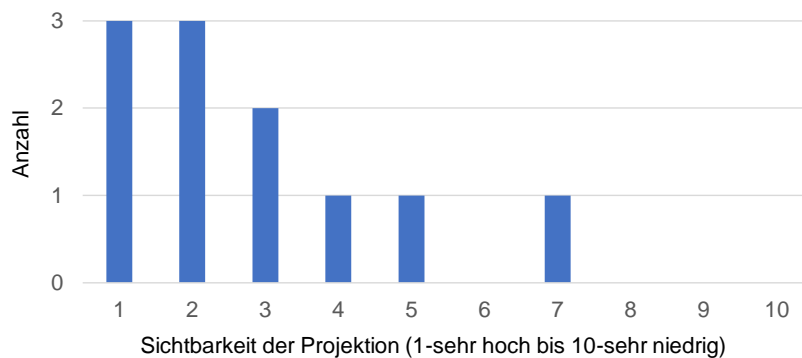


Abb. 6: Sichtbarkeit der Projektion bewertet von den Probanden

Das Projektionssystem besitzt jedoch einige Schwächen, die die Sichtbarkeit im Stadtverkehr teilweise vollkommen unterbinden. Zum einen sind andere Fahrzeuge direkt vor dem Probandenfahrzeug problematisch, da so die Projektion direkt auf den hinteren Teil des Autos projiziert wird. Zum anderen unterbinden Objekte, die beim Abbiegen oder anderen Manövern vor dem Auto auftauchen, die Sicht auf die Projektion. Dadurch ist diese schwer oder gar nicht zu lesen. Zudem schwingt die Projektion gerade bei holpriger Straße vermehrt, was die Lesbarkeit beeinflusst. Der Großteil der Probanden hat berichtet, dass die Projektion selbst bei komplexen Beleuchtungssituationen noch zu sehen ist.

Die Probanden sollen abschließend bewerten, welches der drei Systeme dem Probanden am besten und am schlechtesten gefallen hat. Dabei wird Platz eins dreifach und Platz zwei doppelt gewichtet. Die Bewertung der Probanden ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Subjektive Bewertung der Navigationssysteme zueinander

Navigationssystem hat den Probanden...	Projektion	HUD	MH
...am besten gefallen. (x3)	6	2	3
...mittelmäßig gefallen. (x2)	1	6	4
...am schlechtesten gefallen. (x1)	4	3	4
Gesamtbewertung	24	21	21

4 Diskussion

Die Probandenanzahl bei dieser Studie ist mit 11 Personen vergleichsweise gering. Für eine bessere Aussagekraft muss die Studie weitergeführt werden und weitere Probandenfahrten durchgeführt werden. Dabei sollten vor allem ältere Probanden als Fahrer das System testen, da bei diesen gerade die nicht benötigte Adaption bei der Projektion einen größeren Unterschied machen kann, als bei jüngeren Menschen. Ebenfalls ist die Geschlechterverteilung innerhalb der hier untersuchten Probanden unausgeglichen, sodass bei weiteren Fahrten der Frauenanteil steigen soll. Viele der Probanden kommen aus einem ähnlichem Beschäftigungsfeld und haben somit ggf. eine ähnliche Wahrnehmung bzw. Stellen ähnliche Anforderungen an das System.

Für einen genaueren Vergleich zwischen dem HUD und der Projektion, wird ein besser integriertes HUD benötigt. Vor allem die Doppelspiegelung in der Windschutzscheibe hat die Ergebnisse beeinflusst.

Durch eine andere Befestigung des Beamers innerhalb der Dachbox, können starke Ruckler, die gerade auf holpriger Straße innerhalb der Projektion entstehen, reduziert werden und somit die Qualität der Projektion weiter gesteigert werden. Zudem sind während der Fahrt Ausfälle im GPS-Signal entstanden, die durch Anpassung der Systemtechnik während der Fahrt verhindert werden können.

5 Zusammenfassung

In dieser Studie wird der Nutzen einer Projektion im Vergleich zu einem HUD im realen Straßenverkehr untersucht. Aufgrund der Verkehrssicherheit wird für die Studiendurchführung mit Navigationshinweisen eine nicht-sicherheitsrelevante Funktion als Projektionselement gewählt. Anhand des Blickverhalten der Probanden kann gezeigt werden, dass die Probanden bei der Navigation mit dem HUD und der Projektion weniger in den Innenraum schauen als beim Smartphone in der Halterung. Tendenziell schauen die Probanden bei der Projektion noch weniger in den Innenraum als beim HUD, aber dieser Unterschied ist bei der gegebenen Probandenzahl nicht signifikant. Damit lässt sich der Nutzen der Projektion gegenüber einem HUD weder belegen noch widerlegen.

Die aus dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse sollen für eine Studie mit deutlich mehr Probanden genutzt werden. So soll ein besseres HUD ohne Doppelspiegelung an der Windschutzscheibe bei der nächsten Studie zum Einsatz kommen. Damit wird ein besserer Vergleich zwischen Projektion und HUD als in dieser Studie möglich.

Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle – Zeitreihen 2021. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-zeitreihen-pdf-5462403.html> [23.02.2023]
- [2] National Highway Traffic Safety Administration: Fatal Crashes by Weather Condition and Light Condition. Online verfügbar unter: <https://www.fars.nhtsa.dot.gov/Crashes/CrashesTime.aspx> [23.02.2023]
- [3] Austerschulte, A.; Dreier, B.; Rosenhahn, E.-O.: Analysis of Safety Aspects for LED Matrix High Beam Functions. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting: ISAL 2013. München: Herbert Utz Verlag GmbH, S. 321-330, 2013
- [4] Hamm, M.: Safety Improvement generated by Pioneering New Matrix and Direction Indicator Functionalities. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting: ISAL 2013. München: Herbert Utz Verlag GmbH, S. 310-320, 2013
- [5] Kloppenburg, G.; Wolf, A.; Lachmayer, R. High-resolution vehicle headlamps: Technologies and scanning prototype. Adv. Opt. Technol. 2016, 5, 147–155. <https://doi.org/10.1515/aot-2016-0001>
- [6] Krahnstöver, A.Z.: Licht Führt!? Konzeption Und Evaluation Von Fahrmanöverunterstützung Durch Lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme; (AutoUni–Schriftenreihe 98); Springer: Wiesbaden, Germany, 2017
- [7] Knöchelmann, M.; Held, M.P.; Kloppenburg, G.; Lachmayer, R. High-resolution headlamps—Technology analysis and system design. Adv. Opt. Technol. 2019, 8, 33–46. <https://doi.org/10.1515/aot-2018-0060>
- [8] Li, Y.; Knöchelmann, M.; Lachmayer, R. Beam Pre-Shaping Methods Using Lenslet Arrays for Area-Based High-Resolution Vehicle Headlamp Systems. In: Appl. Sci. Vol. 10 No. 13, 2020 <https://doi.org/10.3390/app10134569>

- [9] Rosenhahn, E.-O.; Link, F.: Traffic Safety Benefits provided by High Resolution Headlamp Systems. In: Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lighting: ISAL 2019. München: Herbert Utz Verlag GmbH, S. 317-332, 2019
- [10] Glück, T.; Biermann, T.; Wolf, A.; Budig, S.; Ziebehl, A.; Knöchelmann, M.; Lachmayer, R.: Distraction Potential of Vehicle-Based On-Road Projection. In: Appl. Sci. Vol. 11 No. 24, 2021 <https://doi.org/10.3390/app112412030>
- [11] Hamm, M.: Real Driving Benefits and Research Findings with Digital Light Functions. In: Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lighting: ISAL 2019. München: Herbert Utz Verlag GmbH, S. 229-238, 2019
- [12] The International Automotive Lighting and Light Signalling Expert Group (GTB): GRE-85-33. Ausgabedatum: 29.10.2021
- [13] Jahn, P.: Bewertungsmodell zur Evaluation hochauflösender, lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme. Dissertation. Universität Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Scientific Publishing, 2020
- [14] Fahrstrecke von Spörckenstraße 17, 30419 Hannover über Gerrit-Engelke-Straße 31, 30177 Hannover nach Hugo-Preuß-Straße 17, 30459 Hannover und zurück zum Ursprung, 2023, <https://www.google.de/maps>