



Universität Ulm
Institut für Psychologie und Pädagogik
Abteilung Human Factors

Navigieren mit Augmented Reality

Auswirkungen von augmentierten Inhalten auf das Navigieren, die
Fahrerbeanspruchung und das Blickverhalten in uneindeutigen
Navigationssituationen

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
Doktor der Naturwissenschaften
– Dr.rer.nat. –

der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Informatik und Psychologie
der Universität Ulm

vorgelegt von
M.Sc.
Kassandra Bauerfeind aus Idar-Oberstein

Ulm, 2022

Amtierende Dekanin: Prof. Dr. Anke Huckauf
Gutachter: Prof. Dr. Martin Baumann
Gutachter: Prof. Dr. Mark Vollrath

Tag der Promotion: 17.11.2022

Erklärung

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Declaration

The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen Aktiengesellschaft.

Vorveröffentlichungen der Dissertation und Patentanmeldungen

Veröffentlichungen

Teile dieser Dissertation wurden bereits in folgenden Fachartikeln veröffentlicht:

Bauerfeind, K., Drüke, J., Bendewald, L., & Baumann, M. (2019). When does the driver benefit from AR-information in a navigation task compared to a Head-Up Display? Results of a driving simulator study. In D. de Waard, K. Brookhuis, D. Coelho, S. Fairclough, D. Manzey, A. Naumann, L. Onnasch, S. Röttger, A. Toffetti, and R. Wiczorek (Eds.) (2019). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2018 Annual Conference* (S. 219-230). ISSN 2333-4959 (online). Online-Vorveröffentlichung. Abgerufen von

<https://www.hfes-europe.org/wp-content/uploads/2018/10/Bauerfeind2018.pdf>

Rechte bei den Autoren

Bauerfeind, K., Drüke, J., Schneider, J., Haar, A., Bendewald, L., & Baumann, M. (2021). Navigating with Augmented Reality – How does it affect drivers’ mental load?. *Applied Ergonomics*, 94, 103398. Online-Vorveröffentlichung. Abgerufen von <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103398>

Modified and reprinted from (Bauerfeind et al., 2021), Copyright (2021), with permission from Elsevier.

Bauerfeind, K., Drüke, J., Bendewald, L., & Baumann, M. (2022). How does navigating with Augmented Reality information affect drivers’ glance behaviour in terms of attention allocation? *Front. Virtual Real.* 3:930117. doi: 10.3389/frvir.2022.930117. Online-Vorveröffentlichung. Abgerufen von

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frvir.2022.930117/full>

Modified and reprinted from (Bauerfeind et al., 2022), CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Patentanmeldungen

Patentanmeldungen, die im Rahmen dieser Dissertation entstanden und bereits für die Volkswagen AG offengelegt wurden:

Haar, A., Fernández Morales, D., Azzam, B., **Bauerfeind, K.** & Konrad, J. (Offenlegungstag: 12.05.2021). *Eindeutige Identifikation eines durchzuführenden Fahrmanövers in Navigationssituationen* (DE 10 2019 217 252 A1). Deutsches Patent- und Markenamt. <https://pdfstore.patentorder.com/pdf/de/252/de102019217252.pdf>

Haar, A., Fernández Morales, D., Azzam, B., **Bauerfeind, K.** & Konrad, J. (Offenlegungstag: 12.05.2021). *Identifikation eines durchzuführenden Fahrmanövers*

mittels zusätzlicher Bodenmarkierung (DE 10 2019 217 250 A1). Deutsches Patent- und Markenamt. <https://pdfstore.patentorder.com/pdf/de/250/de102019217250.pdf>

Patentanmeldungen, die im Rahmen meiner Tätigkeit im Forschungsfeld Augmented Reality entstanden und bereits für die Volkswagen AG offengelegt wurden:

Fernández Morales, Haar, A., **Bauerfeind, K.**, Wittkämper, M., Azzam, B. & Konrad, J. (Offenlegungstag: 24.06.2021). *Verfahren zum Anzeigen eines Objekts durch ein Head-Up-Display-Anzeigesystem und ein Head-Up-Display-Anzeigesystem* (DE 10 2019 220 301 A1). Deutsches Patent- und Markenamt. <https://pdfstore.patentorder.com/pdf/de/301/de102019220301.pdf>

Haar, A., Fernández Morales, D., Azzam, B., **Bauerfeind, K.** & Konrad, J. (Offenlegungstag: 29.07.2021). *Verfahren und Vorrichtung zum Einblenden von Zusatzinformationen in das Sichtfeld des Fahrers eines Fahrzeuges sowie Fahrzeug* (DE 10 2020 200 902 A1). Deutsches Patent- und Markenamt. <https://pdfstore.patentorder.com/pdf/de/902/de102020200902.pdf>

Haar, A., Fernández Morales, D., Azzam, B., **Bauerfeind, K.** & Konrad, J. (Offenlegungstag: 05.08.2021). *Verfahren zum Anzeigen einer Bodenhaftungs-Information betreffend einer Bodenhaftung eines Fahrzeugs auf einer Fahrbahn, sowie Anzeigevorrichtung und Fahrzeug* (DE 10 2020 201 420 A1). Deutsches Patent- und Markenamt. <https://pdfstore.patentorder.com/pdf/de/420/de102020201420.pdf>

Haar, A., Fernández Morales, D., Azzam, B., **Bauerfeind, K.** & Konrad, J. (Offenlegungstag: 16.09.2021). *Verfahren und Vorrichtung zur Darstellung von Informationen in einer erweiterten Realitätsanwendung und Server* (DE 10 2020 203 297 A1). Deutsches Patent- und Markenamt. <https://pdfstore.patentorder.com/pdf/de/297/de102020203297.pdf>

Haar, A., Fernández Morales, D., Azzam, B., **Bauerfeind, K.** & Konrad, J. (Offenlegungstag: 16.09.2021). *Verfahren zum Betreiben eines Fahrzeuges und Fahrzeug-Benutzeroberfläche* (DE 10 2020 203 352 A1). Deutsches Patent- und Markenamt. <https://pdfstore.patentorder.com/pdf/de/352/de102020203352.pdf>

Bauerfeind, K. (Offenlegungstag: 27.01.2022). *Verfahren und Vorrichtung zur Augmented-Reality-Darstellung von Sprachlerninhalten* (DE 10 2020 209 453 A1). Deutsches Patent- und Markenamt. <https://pdfstore.patentorder.com/pdf/de/453/de102020209453.pdf>

Bauerfeind, K. (Offenlegungstag: 17.02.2022). *Fahrzeug mit einer Vorrichtung zum Anleiten eines Nutzers bei kosmetischen Anwendungen* (DE 10 2020 210 329 A1). Deutsches Patent- und Markenamt. <https://pdfstore.patentorder.com/pdf/de/329/de102020210329.pdf>

Danksagung

Die Danksagung wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.

Zusammenfassung

Das Navigieren ist eine räumliche und kognitiv beanspruchende Aufgabe für Fahrende. Die neue Anzeigetechnologie Augmented Reality (AR) kann für das Navigieren eine Fahrerunterstützung erzielen. Es handelt sich um eine Weiterentwicklung des konventionellen Head-Up Displays (HUD). Durch AR ist die positionsgenaue Verortung der virtuellen Informationen in der realen Fahrsituation möglich. Die Informationen werden folglich im direkten Bezug zur Umwelt präsentiert. Bisherige Forschung zeigte, dass die Darstellung der Information direkt am Bezugsort zu einem schnellen und einfachen Verständnis führt.

Das Forschungsziel der vorliegenden Dissertation war die Untersuchung der Effektivität und Nutzerakzeptanz von AR-Informationen in uneindeutigen Navigationssituationen. Angenommen wurde, dass Fahrende besonders in uneindeutigen Navigationssituationen von AR-Informationen profitieren, da diese im direkten Bezug zur Umwelt dargestellt werden. Im Rahmen dieser Dissertation wurden drei Nutzerstudien durchgeführt, davon zwei im Fahrsimulator und eine Validierungsstudie im realen Straßenverkehr.

Bei der ersten Simulatorstudie handelte es sich um eine Grundlagenstudie. Die Aufgabe der Probanden war es mit dem AR Display bzw. dem HUD die richtige Zielabbiegung in uneindeutigen Navigationssituationen zu finden. Es wurde analysiert, ob AR-Informationen zu einer verbesserten Orientierung und gleichzeitig zu einer reduzierten mentalen Beanspruchung in uneindeutigen Navigationssituationen verhelfen können. Somit lag der Untersuchungsfokus auf dem Entscheidungspunkt für die korrekte Abbiegung in uneindeutigen Navigationsszenarien. Ein weiterer Fokus lag auf der Fahrerbeanspruchung mit den Anzeigarten AR Display bzw. HUD. Als Maß für die Fahrerbeanspruchung wurde die Leistung in einer kognitiven Nebenaufgabe analysiert, die eine indirekte Messung der Beanspruchung darstellt. Des Weiteren wurde die Navigationsleistung, das Fahrverhalten und das subjektive Erleben betrachtet. Die Ergebnisse zeigten, dass die Fahrenden mit einem AR Display die richtige Zielabbiegung in uneindeutigen Navigationsaufgaben frühzeitiger identifizieren konnten als mit einem HUD (Bauerfeind et al., 2019). Gleichzeitig führte das Navigieren mit AR-Informationen zu weniger Navigationsfehlern als mit einem HUD (Bauerfeind et al., 2019). Diese Daten deuten auf eine gesteigerte Orientierung in der Navigationsaufgabe durch AR-Informationen hin. Mit dem AR Display zeigten die Versuchspersonen eine bessere Leistung in der Nebenaufgabe. Abgeleitet werden kann, dass AR-Informationen mental weniger beanspruchend zu verarbeiten sind als Informationen im HUD (Bauerfeind et al., 2021). Weitere Daten belegen, dass die Probanden mit dem AR Display eine höhere Annäherungsgeschwindigkeit an die Zielabbiegung in uneindeutigen Navigationssituationen zeigten (Bauerfeind et al., 2021). Demgegenüber fuhren die Probanden mit einem HUD langsamer zur Zielabbiegung, was als ein Kompensationsverhalten interpretiert werden kann, um Zeit für die Entscheidung in der uneindeutigen Navigationssituation zu gewinnen. Die Probanden bewerteten das Navigieren mit dem AR Display als angenehmer und verständlicher (Bauerfeind et al., 2019). Des Weiteren wurde das AR Display als nützlicher als das HUD für uneindeutige Navigationssituationen eingeschätzt.

Im Rahmen der zweiten Studie wurde analysiert, ob das Navigieren mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD zu aufmerksamkeitsbindenden Effekten führt, die auf einen Cognitive-Capture-Effekt (Weintraub, 1987 nach Tufano, 1997) verweisen können. Dafür wurde das Blickverhalten, in Form der Blickstreuung, während des Navigierens mit den Anzeigearten (AR Display vs. HUD) in einer vorstädtischen Gegend mit uneindeutigen Navigationssituationen untersucht. Die Fahrten unterschieden sich hinsichtlich der Verkehrskomplexität (niedrig vs. hoch), um herauszufinden, ob die Fahrenden ihr Blickverhalten an veränderte Umweltbedingungen anpassen. Des Weiteren wurde untersucht, ob die Verkehrskomplexität Einfluss auf die Effektivität und Bewertung der AR-Informationen hat. Da die Informationen positionsgenau in der Umwelt verortet sind, kann es zu Überlagerungen kommen, welche womöglich als störend von Fahrenden wahrgenommen werden können. Die Verkehrskomplexität wurde in Form der Anzahl fahrender und parkender Fahrzeuge in den Fahrten variiert. Potentielle aufmerksamkeitsbindende Effekte wurden des Weiteren in einer komplexeren Situation, einer uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug, am Ende jeder Fahrt untersucht. Analysiert wurde, ob die Fahrenden dieses entgegenkommende Fahrzeug beachten und ein angemessenes Fahrverhalten mit der jeweiligen Anzeigeart zeigen. Dazu wurden die Fahrenden mit der Entscheidung konfrontiert, vor diesem abzubiegen oder ihn passieren zu lassen. Außerdem wurde analysiert, ob es mit einem AR Display zu einer reduzierten Blickwechselanzahl zwischen der Anzeige und der Zielabbiegung kommt, da die virtuellen Informationen bereits positionsgenau in der Umwelt verortet sind und die Fahrenden diese somit nicht mehr mental auf die reale Fahrsituation übertragen müssen. Für die Erfassung der Fahrerbeanspruchung absolvierten die Fahrenden eine kognitive Nebenaufgabe. Außerdem wurden die Navigationsfehler erfasst und die subjektive Bewertung analysiert. Die Daten zeigten, dass es weder durch das AR Display noch durch das HUD zu aufmerksamkeitsbindenden Effekten kam. Die Ergebnisse verdeutlichten des Weiteren, dass es während des Navigierens zu weniger Blickwechsel zwischen der Zielabbiegung und den AR-Navigationsinformationen als den HUD-Navigationsinformationen kam. Abgeleitet wird, dass ein mentaler Abgleich zwischen den virtuellen Informationen und der realen Fahrsituation, wie mit einem HUD erforderlich, nicht länger notwendig ist. Dies bedeutet, dass AR-Informationen nicht in die Umwelt übertragen werden müssen. Auch in dieser Studie wurden mit dem AR Display weniger Navigationsfehler gemacht als mit dem HUD. Das AR Display erzielte eine höhere Nutzerakzeptanz als das HUD. Die Überlagerung der AR-Informationen über andere Verkehrsobjekte wurde von den Versuchspersonen als wenig störend bewertet. Die Hälfte der Probanden bemerkte keinen Unterschied zwischen der niedrigen und der hohen Verkehrskomplexität, da die Verkehrskomplexität die Navigationsaufgabe zu wenig beeinflusste.

Die Realfahrtstudie diente der Validierung der gefundenen Potentiale der AR-Informationen im realen Straßenverkehr. Die technische Implementierung eines AR Displays in einem Realfahrzeug kann zu Einschränkungen führen, die Auswirkungen auf die Effektivität und die Nutzerakzeptanz der AR-Informationen zeigen können (Jansen, 2018; Pfannmüller et al., 2015b; Pfannmüller, 2017; Sadovitch, 2020). Beispielsweise können Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs ein Mitschwingen der präsentierten AR-Informationen bewirken und Sensorungenauigkeiten zu versetzten AR-Informationen führen. Somit sollte u.a. untersucht werden, ob diese Einschränkungen eine Aufmerksamkeitsbindung bewirken können. Dafür navigierten die Versuchsteilnehmer mit

Hilfe der Navigationsanzeigen über das Werksgelände der Volkswagen AG. In dieser Realfahrtstudie wurde der Einfluss der Anzeigearten (HUD vs. AR Display) und die Eindeutigkeit der Abbiegesituation (eindeutige vs. uneindeutige Abbiegungen) auf die Fahrerbeanspruchung, das Blickverhalten, die Navigationsleistung und das subjektive Erleben untersucht. Die Ergebnisse ließen auf keine aufmerksamkeitsbindenden Effekte bedingt durch das AR Display oder das HUD im realen Straßenverkehr schließen. Des Weiteren konnte, trotz Ungenauigkeiten im AR Display, eine hohe Nutzerakzeptanz in dieser Realfahrtstudie erzielt werden. Ferner bewerteten die Fahrenden die Navigationsaufgabe mit dem AR Display als leichter als mit dem HUD. Mit beiden Anzeigearten zeigten die Fahrenden eine gute Navigationsleistung. Die Fahrenden absolvierten die kognitive Nebenaufgabe mit beiden Anzeigearten gut, bewerteten das AR Display subjektiv jedoch als entlastender als das HUD.

Diese Dissertation trägt zu einem verbesserten Verständnis der Rolle von AR in uneindeutigen Navigationssituationen bei. Die Ergebnisse zeigen, dass AR-Informationen leicht und intuitiv von Fahrenden verstanden werden können. Die Fahrenden schienen mit AR-Informationen über mehr freie Ressourcen als mit einem HUD zu verfügen (Bauerfeind et al., 2021). Im Vergleich zu einem HUD, konnten sich die Fahrenden mit AR-Informationen frühzeitiger für die richtige Zielabbiegung in uneindeutigen Navigationssituationen entscheiden und zeigten eine verbesserte Orientierung. Dies kann zu einem gesteigerten Fahrerlebnis führen. Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit dienen der weiteren Entwicklung der AR basierten Mensch-Maschine-Interaktion, um das größtmögliche Potential von AR auszuschöpfen.

Abstract

Navigating is a spatial and cognitive demanding task for the driver. The new display technology Augmented Reality (AR) can support the driver while navigating. It is a further development of a conventional head-up display (HUD). With AR information, it is possible to correctly superimpose information on relevant objects in the environment. Consequently, information is directly related to the environment. Previous research proved that presenting information directly at the reference location can lead to fast and easy understanding.

The research goal of this thesis is to examine the effectiveness and user acceptance of AR information in ambiguous navigation situations. It was assumed that AR information particularly benefits drivers in ambiguous navigation situations because it relates to the driving situation. For the purpose of this work, three user studies were conducted: two in a driving simulator, and one validation study in the real traffic.

The first driving simulator study was a fundamental study. The participants' task was to find the destination street in ambiguous navigation situations with the AR display compared with the HUD. Analysis was aimed at revealing whether AR information can reduce mental load and improve orientation in ambiguous navigation situations. Therefore, the investigation focused on the decision point for the destination street in ambiguous navigation situations. Further, drivers' mental load was examined with both display types: AR display and HUD. Thus, performance in a cognitive non-driving-related (NDRT) task was analysed to indirectly measure mental load. Further, navigating and driving performance and subjective ratings were analysed. Results showed that drivers identified the ambiguous destination street earlier with an AR Display than with an HUD (Bauerfeind et al., 2019). Moreover, AR information led to less navigation errors than an HUD (Bauerfeind et al., 2019). This indicates an improved orientation in the navigation task with AR information. The participants performed better in the NDRT with AR information than with an HUD. It can be derived that AR information are less demanding to process than information in an HUD (Bauerfeind et al., 2021). Further data showed that participants had a higher velocity approaching the ambiguous destination street with the AR display (Bauerfeind et al., 2021). By contrast, participants drove slower with the HUD, which might indicate a compensation behaviour to gain time for the decision in the ambiguous navigation situation. Participants rated navigating with the AR display as more pleasant and comprehensible than the HUD (Bauerfeind et al., 2019). Additionally, the AR display was seen as more useful than the HUD for ambiguous navigation situations.

The second study focused on analysing whether navigating with AR information causes attention capture effects, which can hint at a cognitive capture effect (Weintraub, 1987 cited Tufano, 1997) compared with a HUD. Therefore, glance behaviour in terms of visual attention distribution while navigating with the display types in an urban area with ambiguous navigation situations was analysed. The drives differed in traffic complexity (low vs. high) to examine whether drivers adapt glance behaviour in altered environmental conditions. Furthermore, it was examined whether traffic complexity influenced the effectiveness and user acceptance of AR information. As the information is superimposed over the real traffic situation, it can interfere with other traffic participants, which might disturb the driver. The traffic complexity referred to the number of parked and driving

vehicles. Potential attention capture effects were also analysed in a more complex situation: an ambiguous left turn with an oncoming car at the end of each drive. It was examined whether drivers pay attention to the oncoming car and show appropriate driving behaviour with the respective display type. Hence, the drivers had to decide to take the turn in front of the car or let it pass. Furthermore, it was analysed whether AR information leads to less switching glances between the navigation information and the target intersection as AR information is superimposed on the real driving situation. Thus, drivers do not have to mentally map the information onto the situation. To measure drivers' mental load, participants had to perform a cognitive NDRT. Furthermore, navigation errors and subjective ratings concerning the display types were analysed. The results did not show attention capture effects caused by the AR display or the HUD. Also, participants showed fewer switching glances between the destination street and the AR information while navigating compared with the HUD information. It can be derived that drivers do not have to mentally map AR information on the real driving situation, which is necessary with HUD information. Furthermore, participants made fewer navigation errors with the AR display than with the HUD. The AR display resulted in higher user acceptance than the HUD. Participants rated the superimposition of AR information over other traffic participants as little disturbing. Half of the participants did not observe a difference between the low and the high traffic complexity as the traffic complexity affected the navigation task too little.

The real driving study was aimed at validating the observed potential of AR information in a real traffic situation. However, implementing an AR display in a real car might have constraints that can affect the effectiveness and the user acceptance of AR information (Jansen, 2018; Pfannmüller et al., 2015b; Pfannmüller, 2017; Sadovitch, 2020). For instance, pitch and roll motions of the car might lead to a resonance of the AR information or sensor inaccuracies might lead to an offset of the presented AR information. Thus, it had to be examined whether these constraints result in attention capture effects. Therefore, participants navigated with the navigation information over the plant premises of the Volkswagen AG. In this real driving study, the impact of display type (HUD vs. AR display) and the unambiguousness of the navigation situation (unambiguous vs. ambiguous situation) were tested on drivers' mental load, glance behaviour, navigation performance, and subjective ratings. The results did not show attention capture effects caused by the AR display or the HUD in a real driving situation. Moreover, the AR display obtained a high user acceptance in this real driving study despite the constraints. As a result, the participants rated the navigation task with the AR display as easier than with the HUD. The participants showed good navigation performance with both display types and performed well on the NDRT with both display types, but rated the mental load as more reduced with the AR display than with the HUD.

This thesis contributes to a better understanding of AR information's role in ambiguous navigation situations. The results showed that drivers understand AR information easily and intuitively. Fewer mental resources appear necessary while navigating with AR information (Bauerfeind et al., 2021). Results showed that drivers identified the ambiguous destination street earlier with an AR Display than with an HUD and had an improved orientation in the navigation task, which can result in an improved driving experience. The results of this research contribute to the development of AR human machine interfaces and harnessing the greatest possible potential of AR.

Inhaltsverzeichnis

Vorveröffentlichungen der Dissertation und Patentanmeldungen	VII
Danksagung.....	IX
Zusammenfassung	XI
Abstract	XV
Inhaltsverzeichnis	XVII
Abbildungsverzeichnis	XXI
Tabellenverzeichnis	XXV
1 Einleitung	27
1.1 Motivation	27
1.2 Aufbau der Dissertation.....	30
2 Definition und technische Erklärung eines Augmented Reality Displays	31
2.1 Definition Augmented Reality und Abgrenzung zum HUD	31
2.2 Technische Beschreibung der AR-Technologie.....	33
2.2.1 Aufbau und Funktionsprinzip eines Head-Up Displays.....	33
2.2.2 Aufbau und Funktionsprinzip eines Augmented Reality Displays	35
3 Menschliche Informationsverarbeitung von augmentierten Inhalten.....	39
3.1 Modelle der Fahraufgabe und der menschlichen Informationsverarbeitung.....	39
3.2 Wahrnehmung und Aufmerksamkeit	40
3.3 Kognitive Verarbeitung	44
3.4 Entscheiden und Handlungsausführung	49
3.5 Potential von AR-Informationen für das Navigieren in uneindeutigen Navigationssituationen	51
4 Zielsetzung dieser Dissertation	53
5 Simulatorstudie I: Untersuchung der Effektivität und Beanspruchung von AR- Informationen	57
5.1 Zielsetzung	57
5.2 Methodik.....	58
5.2.1 Fahrstrecken	58
5.2.2 Anzeigarten für die Navigation	58
5.2.3 Aufgabe der Versuchspersonen.....	60
5.2.4 Stichprobe.....	61
5.2.5 Untersuchungsdesign.....	62
5.2.6 Fahrsimulator.....	67
5.2.7 Versuchsablauf	68

5.3	Ergebnisse.....	69
5.3.1	Datenaufbereitung und –auswertung.....	69
5.3.2	Entscheidungspunkt für die richtige Zielabbiegung.....	70
5.3.3	Fahrerbeanspruchung	71
5.3.4	Fahrleistung	73
5.3.5	Subjektive Bewertung	76
5.4	Diskussion und Zusammenfassung	80
6	Simulatorstudie II: Untersuchung aufmerksamkeitsbindender Effekte bedingt durch AR-Informationen.....	87
6.1	Zielsetzung	87
6.2	Methodik.....	88
6.2.1	Fahrstrecken	88
6.2.2	Anzeigearten für die Navigation	89
6.2.3	Aufgabe der Versuchspersonen.....	92
6.2.4	Stichprobe.....	92
6.2.5	Untersuchungsdesign.....	92
6.2.6	Fahr Simulator und Eye-Tracker.....	102
6.2.7	Versuchsablauf.....	103
6.3	Ergebnisse der insgesamt sieben uneindeutigen Abbiegungen	104
6.3.1	Datenaufbereitung und –auswertung.....	104
6.3.2	Fahrerbeanspruchung	105
6.3.3	Blickverhalten	106
6.3.4	Fahrleistung	108
6.3.5	Subjektive Bewertung	109
6.4	Ergebnisse der letzten uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug.....	114
6.4.1	Datenaufbereitung und –auswertung.....	114
6.4.2	Blickverhalten	115
6.4.3	Fahrleistung	120
6.4.4	Subjektive Bewertung	120
6.5	Diskussion und Zusammenfassung	125
7	Realfahrtstudie: Validierung der Effektivität von AR-Informationen	133
7.1	Zielsetzung	133
7.2	Methodik.....	134
7.2.1	Fahrstrecken	134
7.2.2	Anzeigearten für die Navigation	135
7.2.3	Aufgabe der Versuchspersonen.....	138
7.2.4	Stichprobe.....	139
7.2.5	Untersuchungsdesign.....	139
7.2.6	Fahrzeuge, Eye-Tracker und Nebenaufgabe	145
7.2.7	Versuchsablauf.....	146
7.3	Ergebnisse.....	147
7.3.1	Datenaufbereitung und –auswertung.....	147
7.3.2	Blickverhalten	149
7.3.3	Fahrerbeanspruchung	153

7.3.4 Fahrleistung	154
7.3.5 Subjektive Bewertung	154
7.4 Diskussion und Zusammenfassung	166
8 Diskussion und kritische Auseinandersetzung	173
8.1 Diskussion der Ergebnisse.....	173
8.2 Kritik der Studien	178
8.3 Praktische Implikationen dieser Dissertation	180
9 Ausblick und Fazit	183
Literaturverzeichnis	185
Anhang	195
Fragebögen Studie 1	195
Fragebögen Studie 2	203
Fragebögen Studie 3	214
Farbtest	226
Lebenslauf	227
Veröffentlichungsliste.....	228

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum	32
Abbildung 2.2: Navigationsinformationen in einem HUD vs. in einem AR Display	32
Abbildung 2.3: Aufbau und Funktionsprinzip eines Head-Up Displays	34
Abbildung 2.4: Funktionsprinzip eines AR Displays	36
Abbildung 2.5: Positionsgenaue Verortung von AR-Informationen in der Umwelt durch monokulare Tiefenkriterien.	36
Abbildung 3.1: Die drei Dimensionen der Fahraufgabe	39
Abbildung 3.2: Modell der menschlichen Informationsverarbeitung.....	40
Abbildung 3.3: Realfahrtstudie von Schneider et al. (2019)	44
Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Effekts Perceptual Tunneling.....	48
Abbildung 3.5: Vorausschauende Kartenanzeige in einem AR Display in der Simulatorstudie von Kim & Dey (2009)	50
Abbildung 5.1: Lenkradtaste für die Nebenaufgabe	61
Abbildung 5.2: Within-subjects Design der Studie 1.	62
Abbildung 5.3: Exemplarische Darstellung der Annäherung an die Zielkreuzung am Ende jeder Versuchsfahrt mit den abhängigen Variablen der Studie 1	64
Abbildung 5.4: 15-Punkte Kategorienunterteilungsskala	67
Abbildung 5.5: Bilder vom Versuchsaufbau der Studie 1	68
Abbildung 5.6: Boxplots der Entscheidungspunkte für die richtige Zielabbiegung mit dem AR Display und dem HUD	71
Abbildung 5.7: Lineare Verläufe aller vorhergesagten Antwortzeiten der NDRT in Sekunden.....	72
Abbildung 5.8: Anzahl der Navigationsfehler	74
Abbildung 5.9: Boxplots der Distanz zur Zielabbiegung für das Lösen des Gaspedals mit dem AR Display und dem HUD	74
Abbildung 5.10: Annäherungsgeschwindigkeit an die Zielabbiegung	75
Abbildung 5.11: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich des Gefallens der Anzeige, des angenehmen Fahrens mit der Anzeige, der Verständlichkeit der Anzeige, der Entlastung durch die Anzeige, der Nützlichkeit der Anzeige und der Eignung der Anzeige für die Navigationsaufgabe	77
Abbildung 5.12: Boxplot der subjektiven Evaluation bezüglich der Ablenkung durch die Navigationsanzeige.....	78
Abbildung 5.13: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Schwierigkeit und Anstrengung der Fahraufgabe (Navigationsaufgabe & Nebenaufgabe) und der Nebenaufgabe	80

Abbildung 6.1: Bilder der Versuchsstrecken mit unterschiedlichen Verkehrskomplexitäten.....	89
Abbildung 6.2: Untersuchungsdesign der Studie 2.....	93
Abbildung 6.3: Exemplarische Darstellungen der Annäherung an eine der sieben uneindeutigen Abbiegesituationen mit den abhängigen Variablen	95
Abbildung 6.4: Schematische Darstellung des Cognitive-Capture-Effekts.....	96
Abbildung 6.5: Exemplarische Darstellungen der Annäherung an die letzte uneindeutige Linksabbiegung mit entgegenkommendem Fahrzeug mit den zusätzlich ausgewerteten abhängigen Variablen	100
Abbildung 6.6: Ausschnitt aus der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug am Ende jeder Versuchsfahrt.....	101
Abbildung 6.7: Markierte Bereiche für die Erfassung der Häufigkeit der Blickwechsel zwischen dem entgegenkommenden Fahrzeug, der Abbiegung und der Anzeige	101
Abbildung 6.8: Statische Sitzkiste der Group Innovation der Volkswagen AG.....	103
Abbildung 6.9: Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der X-Achse	107
Abbildung 6.10: Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der Y-Achse	108
Abbildung 6.11: Anzahl der Navigationsfehler	109
Abbildung 6.12: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich des Gefallens der Anzeige, des angenehmen Fahrens mit der Anzeige, der Verständlichkeit der Anzeige, der Entlastung durch die Anzeige, der Nützlichkeit der Anzeige und der Eignung der Anzeige für die Navigationsaufgabe	110
Abbildung 6.13: Boxplot der subjektiven Evaluation bezüglich der Ablenkung durch die Navigationsanzeige.....	111
Abbildung 6.14: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich des Gefallens der Gestaltung, der Sichtbarkeit, der Positionierung, der Anzeigegröße und der Transparenz.....	112
Abbildung 6.15: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Schwierigkeit der Fahraufgabe (Navigationsaufgabe & Nebenaufgabe) und der Anstrengung der Nebenaufgabe	113
Abbildung 6.16: Boxplots der aufsummierten Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug [s]	117
Abbildung 6.17: Interaktion zwischen der Anzeigeart und der Verkehrskomplexität in Bezug auf die aufsummierte Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug [s]	117
Abbildung 6.18: Boxplots der aufsummierten Blickdauer auf die Gegenfahrbahn [s]	118

Abbildung 6.19:Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Schwierigkeit der Abbiegesituation in der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug, der Beachtung des Gegenverkehrs, der Leichtigkeit der Entscheidung für das Abbiegen vor bzw. hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug und der Beanspruchung durch die Nebenaufgabe in der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug	122
Abbildung 6.20:Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Nützlichkeit der Anzeige, wie hilfreich die Anzeige war, der Entlastung durch die Anzeige, der Ablenkung durch die Anzeige, der Verständlichkeit der Anzeige und der störenden Überlagerung durch die AR-Informationen in der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug.....	124
Abbildung 7.1: Zu analysierende Abbiegesituationen der Realfahrtstudie	134
Abbildung 7.2: Vogelperspektive der Versuchsstrecke für das AR Display.....	135
Abbildung 7.3: Vogelperspektive der Versuchsstrecke für das HUD	135
Abbildung 7.4: Fehlerhafte Darstellungen der AR-Informationen in einer zweiten uneindeutigen Abbiegesituation	138
Abbildung 7.5: Druckknöpfe an den Daumen der Versuchspersonen für die Beantwortung der Nebenaufgabe	139
Abbildung 7.6: Untersuchungsdesign der Realfahrtstudie.	139
Abbildung 7.7: Exemplarische Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Annäherung an die uneindeutige Abbiegesituation mit den abhängigen Variablen der Realfahrtstudie	141
Abbildung 7.8: 15-Punkte Kategorienunterteilungsskala	145
Abbildung 7.9: Versuchsfahrzeuge der Realfahrt.....	145
Abbildung 7.10:Versuchsetting der Realfahrt.....	146
Abbildung 7.11:Ein Marker an der A-Säule und ein Marker über dem Mittelkonsolendisplay dienten der Auswertung des Blickverhaltens im markerbasierten Koordinatensystem.	148
Abbildung 7.12:Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der X-Achse (horizontale Blickstreuung) in Grad (N = 27). Ergebnisse der markerbasierten Auswertung des rechten Markers an der Mittelkonsole.	150
Abbildung 7.13:Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der X-Achse (horizontale Blickstreuung) in Grad (N = 27). Ergebnisse der markerbasierten Auswertung des linken Markers an der A-Säule.	151
Abbildung 7.14:Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der Y-Achse (vertikale Blickstreuung) in Grad (N = 27). Ergebnisse der markerbasierten Auswertung des rechten Markers an der Mittelkonsole.	152

- Abbildung 7.15: Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der Y-Achse (vertikale Blickstreuung) in Grad (N = 27). Ergebnisse der markerbasierten Auswertung des linken Markers an der A-Säule. 153
- Abbildung 7.16: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich des Gefallens der Anzeige, des angenehmen Fahrens mit der Anzeige, der Verständlichkeit der Anzeige, der Entlastung durch die Anzeige, der Nützlichkeit der Anzeige und der Eignung der Anzeige für die Navigationsaufgabe 156
- Abbildung 7.17: Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Reihenfolge bezüglich der Entlastung durch die Anzeige 157
- Abbildung 7.18: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Ablenkung und der Aufmerksamkeitsbindung durch die Navigationsanzeige sowie der störenden Überlagerung der AR-Informationen über andere Verkehrsobjekte 158
- Abbildung 7.19: Akzeptanzbewertung (Van der Laan et al., 1997) unterteilt in Usefulness, Satisfying und den Globalscore für die Anzeigearten AR Display und HUD. 158
- Abbildung 7.20: Ergebnisse der einzelnen Items und des Globalscores für den Driver Activity Load Index (Pauzié, 2008) für die beiden Anzeigearten 160
- Abbildung 7.21: Ergebnisse der User Experience (Schrepp et al., 2017) 161
- Abbildung 7.22: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich des Gefallens der Gestaltung, der Anzeigengröße, der Positionierung der Anzeige und der Transparenz 162
- Abbildung 7.23: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Schwierigkeit der Fahraufgabe, der Schwierigkeit der Navigationsaufgabe, der Leichtigkeit die Abbiegung zu finden, der Anstrengung der Nebenaufgabe, der Ablenkung durch die Nebenaufgabe und der Beanspruchung durch die Nebenaufgabe 165
- Abbildung 7.24: Boxplot der subjektiven Evaluation bezüglich des Handlings des Fahrzeugs 166

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Kernaussagen der menschlichen Informationsverarbeitung von AR-Informationen.....	50
Tabelle 3.2:	Abstraktionsebenen (Rasmussen, 1985) an dem Beispiel des manuellen Navigierens mit AR-Informationen.....	52
Tabelle 5.1:	Navigationsinformationen in den Anzeigearten HUD (links) und AR Display (rechts).....	60
Tabelle 5.2:	Überblick über die erfassten Daten der Studie 1.	63
Tabelle 5.3:	Art und Zeitpunkt der Fragebögen mit den Items der Studie 1.	66
Tabelle 5.4:	Hierarchisch lineares Modell für die vorhergesagten mittleren Antwortzeiten [s]	73
Tabelle 5.5:	Hierarchisch lineares Modell der mittleren Annäherungsgeschwindigkeit [km/h].....	76
Tabelle 5.6:	Ergebnisse der Studie 1.	84
Tabelle 6.1:	Navigationsinformationen in den Anzeigearten HUD (links) und AR Display (rechts).....	91
Tabelle 6.2:	Überblick über die erfassten Daten der Studie 2 - sieben uneindeutige Abbiegungen.....	94
Tabelle 6.3:	Art und Zeitpunkt der Fragebögen mit den Items der Studie 2.	98
Tabelle 6.4:	Überblick über die erfassten Daten der Studie 2 - letzte uneindeutige Linksabbiegung.....	99
Tabelle 6.5:	Items des Fragebogens für die uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug.	102
Tabelle 6.6:	Mittelwert und Standardabweichung für die mittlere Häufigkeit korrekter Antworten [1/s] für die sieben Abbiegungen, getrennt nach der Anzeigeart und der Verkehrskomplexität.	106
Tabelle 6.7:	Mittelwert und Standardabweichung für die mittlere Standardabweichung der Pupillenposition	107
Tabelle 6.8:	Anzahl der Navigationsfehler, getrennt nach der Anzeigeart und der Verkehrskomplexität.....	109
Tabelle 6.9:	Mittelwert und Standardabweichung der aufsummierten Blickdauer [s] auf das entgegenkommende Fahrzeug und die Gegenfahrbahn	116
Tabelle 6.10:	Generalisiertes lineares Modell der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen Zielabbiegung und Anzeige	119
Tabelle 6.11:	Generalisiertes lineares Modell der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen entgegenkommendem Fahrzeug und Zielabbiegung	119

Tabelle 6.12:	Generalisiertes lineares Modell der durchschnittlichen Blickwechsellanzahl zwischen Anzeige und entgegenkommendem Fahrzeug.....	120
Tabelle 6.13:	Häufigkeiten der Entscheidungen, vor oder hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug in der uneindeutigen Linksabbiegung abzubiegen	120
Tabelle 6.14:	Ergebnisse der Studie 2.	130
Tabelle 7.1	Navigationsinformationen in den Anzeigearten HUD (links) und AR Display (rechts).....	137
Tabelle 7.2:	Überblick über die erfassten Daten der Realfahrtstudie.	140
Tabelle 7.3:	Art und Zeitpunkt der Fragebögen mit den Items der Studie 3.	144
Tabelle 7.4:	Mittelwert und Standardabweichung für die mittlere Standardabweichung der Pupillenposition auf der X-Achse [°]	150
Tabelle 7.5:	Mittelwert und Standardabweichung für die mittlere Standardabweichung der Pupillenposition entlang der Y-Achse [°].....	152
Tabelle 7.6:	Mittelwert und Standardabweichung der Häufigkeit korrekter Antworten [1/s], getrennt nach der Anzeigeart und der Eindeutigkeit der Situation.	153
Tabelle 7.7:	Mittelwert und Standardabweichung für die mittlere Antwortzeit [s], getrennt nach der Anzeigeart und der Eindeutigkeit der Situation.	154
Tabelle 7.8:	Anzahl der Navigationsfehler, getrennt nach der Anzeigeart und der Eindeutigkeit der Situation	154
Tabelle 7.9:	Ergebnisse der Akzeptanzbewertung (Van der Laan et al., 1997)	159
Tabelle 7.10:	Ergebnisse des Driver Activity Load Index (Pauzié, 2008).	160
Tabelle 7.11:	Ergebnisse des User Experience Questionnaire (Schrepp et al., 2017).	161
Tabelle 7.12:	Ergebnisse der Studie 3.	171
Tabelle 8.1:	Haupterkennnisse dieser Dissertation.....	177

1 Einleitung

1.1 Motivation

Augmented Reality (AR) ist bereits in verschiedenen Bereichen des alltäglichen Lebens vorzufinden. Beispielsweise bietet der Gaming Markt längst zahlreiche AR-Spiele für das Smartphone oder die Spielekonsole an. In TV-Sportsendungen wird AR eingesetzt, um das Übertragungsbild mit visuellen Informationen anzureichern, die dem Zuschauer helfen können Spielzüge und Entscheidungen leichter nachzuvollziehen. Beispielsweise wird durch die Einblendung der virtuellen Abseitslinie im Fußball dem Zuschauer unmittelbar kenntlich gemacht auf welcher Höhe des Spielfeldes sich der angreifende Spieler zum Zeitpunkt des Passspiels befand. Die Sightseeing-Tour in einer neuen Stadt wird durch AR-Informationen auf dem Smartphone interaktiver. Im Bereich der Kultur, wie beispielsweise in Museen, kann AR eingesetzt werden, um nicht ausgestellte Exponate digital zugänglich zu machen. Möbelhäuser bieten die Möglichkeit über das eigene Smartphone das gewünschte Möbelstück in der eigenen Wohnung virtuell zu platzieren. Im Journalismus kann AR genutzt werden, um komplexe Sachverhalte in Printausgaben leicht nachvollziehbar zu präsentieren: So können sich Leser vertieft mit einem Thema auseinandersetzen, indem sie zusätzlich bereitgestellte Informationen, wie detaillierte Grafiken, eingehend studieren (Schart & Tschanz, 2016). Zusätzlich können Inhalte jederzeit aktualisiert werden. Im Bereich der Weiterbildung kann das praktische Erlernen von komplexen Aufgaben mit AR unterstützt werden, wodurch Wissen einfach vermittelt werden kann. Beispielsweise können virtuelle Montageanleitungen mit direktem Bezug zu den jeweiligen Werkstücken oder Maschinen angezeigt werden. Auch im medizinischen Sektor findet AR Anwendung. Die nötigen Informationen werden dem behandelnden Arzt im primären Blickfeld angezeigt. Des Weiteren kann die virtuelle Präsentation nicht sichtbarer Körperbereiche, Organe und Nervenbahnen an den jeweiligen Körperregionen Eingriffe erleichtern und beschleunigen (Janczura, 2021; Noll, o. D.). Im Militär wird AR u.a. eingesetzt, um Soldaten zu einem gesteigerten Situationsbewusstsein zu verhelfen, indem die eigene Position, sowie die Position der Kameraden und der Angreifer visualisiert werden (Abramovich, o. D.).

All diese Beispiele zeigen, dass AR-Informationen ein schnelles Verständnis durch die positionsgenaue Darstellung ermöglichen. Sie sorgen für eine bessere und schnellere Orientierung, da diese Informationen schnell zugänglich sind und unterstützen ein zielgerichtetes Vorgehen.

In der Automobilindustrie verspricht AR neben der Unterstützung bei Montage- und Wartungsarbeiten in der Produktion und der Erleichterung der Entwicklung auch Potential für den Individualverkehr. Die manuelle Navigation ist ein primäres Anwendungsgebiet für AR-Informationen. Während des Fahrens stellt das Navigieren eine grundlegende Aufgabe dar. Es handelt sich um eine räumliche Aufgabe, da Fahrende ihre Route planen und sich in ihrer Umgebung orientieren müssen. Das Navigieren in einer fremden Umgebung oder in uneindeutigen Situationen erfordert wissensbasiertes Verhalten (Rasmussen, 1983). Somit kann die Navigationsaufgabe eine kognitiv beanspruchende Aufgabe für Fahrende darstellen. Eine Fahrerunterstützung kann durch neuartige Anzeigetechnologien, wie einem AR Display, ermöglicht werden. Durch die fortschreitende Digitalisierung nimmt auch die

Verfügbarkeit an verkehrsrelevanten Informationen zu, die den Fahrenden angezeigt werden können. Sichergestellt werden sollte jedoch, dass Fahrende diese Informationen schnell und einfach verstehen können und Ablenkung vermieden wird. Bei einem AR Display handelt es sich um eine Weiterentwicklung des konventionellen Head-Up Displays (HUD). Wie bei einem HUD werden die visuellen Informationen durch eine Projektion in die Windschutzscheibe und somit im primären Blickfeld der Fahrenden realisiert. Durch AR ist zusätzlich die positionsgenaue Verortung der virtuellen Informationen in der Realität in Echtzeit möglich. Die Informationen werden somit im direkten Bezug zur Umwelt präsentiert. So scheint es als sei das reale Objekt virtuell markiert. Im Bereich der Navigation beispielsweise scheint die zu fahrende Route in der Umwelt virtuell hervorgehoben. Die Darstellung der Information direkt am Bezugsort kann zum Vorteil haben, dass diese schnell und leicht verstanden werden.

Die Forschung zu AR-Informationen im Fahrbereich befindet sich noch am Anfang, hat jedoch in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Erste Studien verweisen auf das Potential von AR-Informationen für verschiedene Informationsarten, wie die Navigation, Warnungen oder unterstützende Informationen von Fahrerassistenzsystemen. Im Bereich Warnungen zeigt sich, dass das Fahren mit AR-Informationen zu kürzeren Reaktionszeiten führt im Vergleich zu einem Mittelkonsolendisplay (Kim et. al, 2013; Tönnis, 2008) und die Aufmerksamkeit der Fahrenden gezielt auf kritische Verkehrereignisse gelenkt werden kann (Rusch et. al., 2013). Im Bereich der Navigation können mit einem AR Display Navigationsfehler im Vergleich zu einem HUD reduziert werden (Israel, 2012; Kim & Dey, 2009). Vermutet wird, dass sich AR-Informationen besonders für uneindeutige Navigationssituationen eignen. Dabei stellt sich die Frage, ob die positionsgenaue Verortung der AR-Informationen uneindeutige Navigationssituationen für Fahrende erleichtern. Angenommen wird ferner, dass das Verstehen und Interpretieren der AR-Navigationsinformationen weniger mental beanspruchend ist als virtuelle Informationen im HUD, die nicht in der Umwelt verortet präsentiert werden (Bengler et al., 2015; Israel, 2012; Kim & Dey, 2009; Pauzie, 2015; Pfannmüller, 2017; Pfannmüller et al., 2015a). Subjektive Einschätzungen zeigen, dass sich Fahrende mit AR mental weniger beansprucht fühlen im Vergleich zu einer Kartenanzeige (Medenica et al., 2011). Jedoch können subjektive Daten Verzerrungen wie der sozialen Erwünschtheit unterliegen. Um Ableitungen hinsichtlich der Potentiale von AR treffen zu können, bedarf es objektiver Performance-Daten in Bezug auf die Fahrerbeanspruchung und daraus resultierende Leistungsparameter.

Neben den Vorteilen werden auch Herausforderungen dieser neuen Technologie aufgezeigt. So sollte eine reduzierte und minimalistisch gestaltete Anzeige angestrebt werden, um eine Reizüberflutung im primären Blickfeld der Fahrenden zu vermeiden. In der Literatur wird ebenfalls diskutiert, ob AR-Informationen die Aufmerksamkeit der Fahrenden stark auf sich ziehen, sodass resultierende Tunnelblicke ein Verpassen von fahrrelevanten Umweltereignissen verursachen könnten (Gish & Staplin, 1995).

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurden Potentiale und Herausforderungen des manuellen Navigierens mit AR-Informationen näher untersucht. Im Speziellen wurde mit dieser Dissertation ein verbessertes Verständnis der Rolle von AR-Informationen in uneindeutigen Navigationssituationen erlangt. Das Forschungsziel dieser Dissertation war die Untersuchung der Beanspruchung und Effektivität von AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD in uneindeutigen Navigationssituationen.

Dies setzte ein verbessertes Verständnis der menschlichen Informationsverarbeitung von augmentierten Inhalten während des manuellen Navigierens voraus. Hinsichtlich der menschlichen Informationsverarbeitung wurde in dieser Dissertation die Informationsaufnahme, die kognitive Verarbeitung, das Entscheiden und die ausgeführte Handlung mit augmentierten Inhalten genauer betrachtet.

Um die Informationsaufnahme zu untersuchen, wurde in dieser Dissertation das Blickverhalten analysiert. Systematisch untersucht wurde, ob diese Anzeigart Tunnelblicke begünstigt. Die kognitive Verarbeitung bezog sich auf die Untersuchung der Fahrerbeanspruchung. Das Entscheiden wurde mit Hilfe des Entscheidungspunktes für das nächste Navigationsmanöver erfasst. Die ausgeführte Handlung bezog sich in dieser Dissertation auf das richtige Navigieren und das Fahrverhalten während der Annäherung an die uneindeutige Navigationssituation mit AR-Informationen.

Im Rahmen dieser Promotion wurden drei empirische Studien durchgeführt. In der ersten Studie wurde ein grundlegendes Verständnis der Interaktion mit AR-Informationen in uneindeutigen Navigationsaufgaben erarbeitet. Angenommen wurde, dass AR-Informationen im Vergleich zu HUD-Informationen zu schnelleren und vereinfachten Entscheidungen in uneindeutigen Navigationssituationen führen. Der Untersuchungsfokus lag somit auf dem Entscheidungspunkt für die korrekte Abbiegung in uneindeutigen Navigationsszenarien (Bauerfeind et al., 2019). Ein weiterer Fokus lag auf der Fahrerbeanspruchung, die in Interaktion mit den Anzeigarten AR Display bzw. HUD entsteht (Bauerfeind et al., 2021). Vermutet wurde, dass das AR Display in einer Navigationsaufgabe weniger beansprucht als ein HUD. Für eine umfassende Analyse wurden ebenfalls die Navigationsleistung, das Fahrverhalten und das subjektive Erleben betrachtet.

Im Rahmen der zweiten Studie wurde untersucht, ob das Navigieren mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD zu aufmerksamkeitsbindenden Effekten führt, die auf einen Cognitive-Capture-Effekt (Weintraub, 1987 nach Tufano, 1997) hindeuten können. Die Fahrten unterschieden sich hinsichtlich der Verkehrskomplexität (niedrig vs. hoch), um herauszufinden, ob die Fahrenden ihr Blickverhalten an veränderte Umweltbedingungen anpassen. Des Weiteren wurde eine komplexere Situation, eine uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug, am Ende jeder Fahrt untersucht. Dies hatte zum Ziel zu untersuchen, ob die Fahrenden dieses entgegenkommende Fahrzeug beachten und ein angemessenes Fahrverhalten mit der jeweiligen Anzeigart zeigten. Analysiert wurde außerdem, ob es mit einem AR Display zu einer reduzierten Blickwechselanzahl zwischen der Anzeige und der Zielabbiegung kommt, da die virtuellen Informationen bereits positionsgenau in der Umwelt verortet sind und die Fahrenden diese somit nicht mehr mental auf die reale Fahrsituation übertragen müssen (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Des Weiteren wurden die Fahrerbeanspruchung, die Navigationsleistung und die subjektive Einschätzung analysiert.

Im Rahmen der dritten Studie erfolgte eine Validierung in realen Navigationssituationen. Die technische Umsetzung eines AR Displays in einem realen Fahrzeug kann zu Einschränkungen führen, die sich auf die Effektivität und die Nutzerakzeptanz der AR-Informationen auswirken können (Jansen, 2018; Pfannmüller et al., 2015b; Pfannmüller, 2017; Sadovitch, 2020). So können Sensorungenauigkeiten zu versetzten AR-Informationen führen und Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs ein Mitschwingen der AR-Informationen verursachen. Ziel der Realfahrtstudie war die Validierung der

gefundenen Potentiale eines AR Displays im Vergleich zu einem HUD in einer realen Navigationsaufgabe. In dieser Realfahrtstudie wurden der Einfluss der Anzeigearten (HUD vs. AR Display) und die Eindeutigkeit der Abbiegesituation (eindeutige vs. uneindeutige Abbiegungen) auf die Fahrerbeanspruchung, das Blickverhalten, die Navigationsleistung und das subjektive Erleben untersucht.

1.2 Aufbau der Dissertation

Die vorliegende Dissertation beginnt mit der Definition von Augmented Reality. Da es sich bei einem AR Display um eine Weiterentwicklung des HUDs handelt, wird in Kapitel 2 außerdem die Abgrenzung zwischen diesen beiden Technologien aufgezeigt. Des Weiteren wird der technische Aufbau eines HUDs und eines AR Displays erläutert und gegenübergestellt. In Kapitel 3 wird das Fahren mit AR-Informationen näher betrachtet. Dabei steht die menschliche Informationsverarbeitung von augmentierten Inhalten während der Fahrt im Fokus. In diesem Kapitel werden aus Sicht der menschlichen Informationsverarbeitung die Vor- und Nachteile der positionsgenauen Verortung von AR-Informationen beschrieben. Das Kapitel unterteilt sich dafür in die drei Bereiche (1) Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, (2) kognitive Verarbeitung und (3) Entscheiden und Handlungsausführung. Im Rahmen der kognitiven Verarbeitung wird näher auf aufmerksamkeitsbindende Effekte, im Speziellen auf den Cognitive-Capture-Effekt eingegangen. Abschließend wird das Potential von AR-Informationen für das Navigieren in uneindeutigen Navigationssituationen aufgezeigt. In Kapitel 4 werden die Zielsetzung und die Forschungsfragen der vorliegenden Dissertation abgeleitet. Die empirische Arbeit, die zwei Fahrsimulatorstudien und eine Realfahrtstudie umfasst, wird in Kapitel 5 bis 7 vorgestellt. Die Studien gliedern sich jeweils in Zielsetzung, Methodik, Ergebnisse und Diskussion. Die Diskussion der Gesamtergebnisse folgt in Kapitel 8. Ein Ausblick auf offene Fragestellungen und Ableitungen für weitere Forschung sowie ein Fazit werden in Kapitel 9 gegeben.

2 Definition und technische Erklärung eines Augmented Reality Displays

Die Forschung zu AR hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen, befindet sich jedoch noch am Anfang. In diesem Kapitel wird die AR-Technologie im Fahrkontext vorgestellt. Der Begriff Augmented Reality wird definiert und die Abgrenzung zu einem HUD aufgezeigt (Kapitel 2.1). In Kapitel 2.2 folgt die technische Erklärung dieser visuellen Anzeige. Es werden Potentiale, aber auch Herausforderungen in Interaktion mit AR identifiziert. Dieses Kapitel befasst sich nicht mit Vor- und Nachteilen der positionsgenauen Verortung von AR-Informationen aus Sicht der menschlichen Informationsverarbeitung. Dies folgt in Kapitel 3.

2.1 Definition Augmented Reality und Abgrenzung zum HUD

Unter AR wird die Anreicherung der realen Welt durch virtuelle Objekte verstanden, die den Eindruck erwecken am jeweiligen Ort der realen Welt zu koexistieren (Azuma, 1997; Azuma et al., 2001). Dabei nimmt der Nutzer die virtuellen Informationen als positionsgenaue Überlagerung der Realität in Echtzeit wahr. Azuma et al. (2001) definieren AR mit den folgenden drei Eigenschaften:

1. Kombination realer und virtueller Objekte in der realen Umwelt,
2. Interaktion in Echtzeit und
3. Registrierung / Ausrichtung virtueller und realer Objekte miteinander, d.h. virtuelle Objekte werden dreidimensional mit realen Objekten verknüpft.

Nach Milgram et al. (1994) wird Augmented Reality der Mixed Reality zugeordnet (Abbildung 2.1). Mit Hilfe des Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums nach Milgram et al. (1994) werden visuelle Anzeigen hinsichtlich ihren Anteilen zur Realität bzw. Virtualität eingeordnet. Milgram et al. (1994) erklären die Realität und die Virtualität als jeweilige Enden des Kontinuums, nicht jedoch als gegensätzlich. Das Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums verdeutlicht, dass AR näher an der Realität als an der Virtualität eingeordnet wird. Ein Abbild der realen Welt ist an physikalische Gesetze gebunden. Von einer virtuellen Umgebung dagegen wird angenommen, dass es sich um das Eintauchen in eine synthetische Welt handelt. Diese muss nicht zwingend die Eigenschaften der realen Welt abbilden. Es kann sich um reale aber auch um fiktive Inhalte handeln. Dabei müssen physikalische Gesetze, wie die der Gravitation, der Zeit oder von Materialeigenschaften, nicht mehr zum Tragen kommen. Beispielsweise könnte in einer virtuellen Umgebung die Schwerkraft außer Kraft gesetzt, die Zeit vor oder zurück gespult werden oder die Umgebung an eine Comic-Welt erinnern.

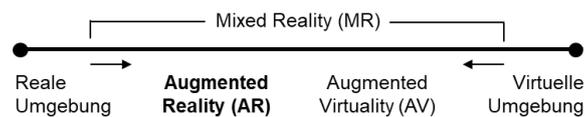


Abbildung 2.1: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (eigene Darstellung nach Milgram et al., 1994).

Im Fahrkontext handelt es sich bei einem Augmented Reality Display um eine Weiterentwicklung eines Head-Up Displays (HUD). Die Unterschiede zwischen den beiden Anzeigearten werden in Abbildung 2.2 deutlich. Die ersten HUDs wurden vom Militär basierend auf der Technologie des Reflexvisiers in den späten 1950er Jahren entwickelt und in den frühen 1960er Jahren im Flugbereich angewendet (Newman, 1995; Prinzel & Risser, 2004). Bedingt durch das transparente Display können sowohl die Umwelt als auch die dargestellten flugrelevanten Informationen simultan im primären Blickfeld des Piloten wahrgenommen werden.

Im Automobilkontext wurde das erste seriengefertigte HUD 1988 im Fahrzeug Oldsmobile Cutlass Supreme Indianapolis 500 Pace Car Parade Convertible eingeführt (Weihrauch et al., 1989). Die HUD-Technologie umfasst eine Projektion in die Windschutzscheibe oder auf ein sogenanntes Combiner Display, eine separate Glasscheibe vor der Windschutzscheibe. Somit wird die Präsentation von virtuellen Informationen in das primäre Blickfeld der Fahrenden ermöglicht. In Abbildung 2.2 wird deutlich, dass diese Informationen am unteren Rand des Fahrerblickfeldes angezeigt werden. Durch eine Projektion von ca. 2 m scheinen die Informationen über der Motorhaube zu schweben. Dabei wird die Verschiebung der Fokussentfernung über das Spiegel- und Linsensystem des HUDs ermöglicht (nähere Erklärungen in Kapitel 2.2.1). Somit müssen Fahrende den Blick nicht mehr nach unten ins Kombiinstrument richten, um beispielsweise Navigations- oder Geschwindigkeitsinformationen zu erhalten. Stattdessen behalten Fahrende ihren „Kopf oben“ (head up).



Abbildung 2.2: Navigationsinformationen in einem HUD vs. in einem AR Display - In einem HUD werden die Navigationsinformationen schwebend über der Motorhaube angezeigt (links). In einem AR Display werden die Navigationsinformationen positionsgenau in der Umwelt platziert (rechts).

Die Forschung zu HUDs verweist besonders in Bezug auf fahrrelevante Informationen auf zahlreiche Vorteile. Flehmer (2020)¹ bietet einen Überblick über diese. Vorrangig zu

¹ Frau Franziska Flehmer fertigte im Rahmen der vorliegenden Dissertation eine Masterarbeit an.

nennen ist, dass Blickabwendungen von der Straße im Vergleich zu Head-Down Displays (HDD), wie dem Kombiinstrument, verringert werden (Kiefer, 1991; Knoll, 2015). Kim et al. (2013) zeigten, dass vor allem Blickabwendungen von der Straße zu geteilter Aufmerksamkeit führen, somit von der Fahraufgabe ablenken und das Unfallrisiko erhöhen können. Da Kopf- und Augenbewegungen in Interaktion mit einem HUD erleichtert werden, sind kürzere Ablesezeiten möglich (Schneid, 2009). In Studien konnte außerdem gezeigt werden, dass mit einem HUD wichtige Informationen und Ereignisse, wie Hindernisse auf der Straße, von Fahrenden schneller detektiert und identifiziert werden als mit einem HDD (Horrey et al., 2003; Grant et al., 1995). Resultierend zeigen sich reduzierte Reaktionszeiten (Gish & Staplin, 1995; Liu & Wen, 2004). Die Literatur belegt außerdem, dass das Fahren mit einem HUD als weniger beanspruchend bewertet wird als mit einem HDD (Horrey et al., 2003; Milicic, 2010; Sandbrink, 2019). Des Weiteren ist die Akkommodation im Vergleich zu HDDs erleichtert. Es wird angenommen, dass besonders ältere Fahrende aufgrund von reduzierten Blickabwendungen von der Straße und einer verringerten Akkommodationszeit von HUDs profitieren (Gish & Staplin, 1995).

Jedoch werden die Informationen in einem HUD ohne Bezug zur Umwelt präsentiert. Wie in Abbildung 2.2 zu erkennen ist, scheinen die präsentierten Navigationsinformationen über der Motorhaube zu schweben und sind somit nicht direkt mit der zu fahrenden Route verknüpft. Somit müssen Fahrende einen mentalen Abgleich zwischen der angezeigten virtuellen Information und der realen Fahrsituation durchführen (Pfanmüller, 2017). Im Gegensatz dazu werden die virtuellen Informationen durch die AR-Technologie in Echtzeit positionsgenau in der Umwelt verortet. Abbildung 2.2 zeigt, dass in diesem Beispiel die zu fahrende Navigationsroute Blau markiert erscheint. Der Einfluss der positionsgenauen Verortung der AR-Informationen auf die menschliche Wahrnehmung und Verarbeitung wird in Kapitel 3 näher beleuchtet.

2.2 Technische Beschreibung der AR-Technologie

Im Folgenden wird der Aufbau und die grundlegende Funktionsweise eines AR Displays beschrieben (Kapitel 2.2.2). Es handelt sich hierbei um eine weiterführende Technologie des HUDs (Kapitel 2.2.1). Anhand des HUDs werden die Unterschiede zwischen den beiden Technologien aufgezeigt. Detailliertere Informationen zur Technologie der HUDs und AR Displays bieten Israel (2012), Pfanmüller (2017), Schneid (2009) und Sadovitch (2020).

Anzumerken ist, dass sich die technische Umsetzung von AR Displays in kopfgetragene AR Displays (Head-Mounted) und Monitor basierte AR Displays untergliedert. Zum Zeitpunkt dieser Dissertation befanden sich die kopfgetragenen Systeme in einem frühen Entwicklungsstand. Damit gehen Unsicherheiten hinsichtlich Regularien einher, wie beispielsweise der Frage, ob diese Systeme überhaupt von Fahrenden getragen werden dürfen oder ob es Einschränkungen bezüglich der Crash-Sicherheit gibt. Folglich wird in dieser Dissertation nicht weiter auf diese Systeme eingegangen.

2.2.1 Aufbau und Funktionsprinzip eines Head-Up Displays

Das HUD befindet sich im Fahrzeug zwischen dem Kombiinstrument und der Windschutzscheibe sowie zwischen dem Armaturenbrett und der Lenksäule (Lutz, im

Erscheinen). Es setzt sich aus den drei Hauptbestandteilen der Bildquelle, dem optischen System und der Windschutzscheibe (bzw. der Combiner-Scheibe) zusammen (Abbildung 2.3). Die zu präsentierenden Informationen werden von der Bildquelle erzeugt und anschließend über das optische System auf einen Combiner bzw. die Windschutzscheibe gelenkt. Der Combiner bzw. die Windschutzscheibe stellt den letzten Spiegel des Gesamtsystems dar und reflektiert die Lichtstrahlen in den Bereich der Eyebox, in dem sich die Augen des Fahrenen befinden.

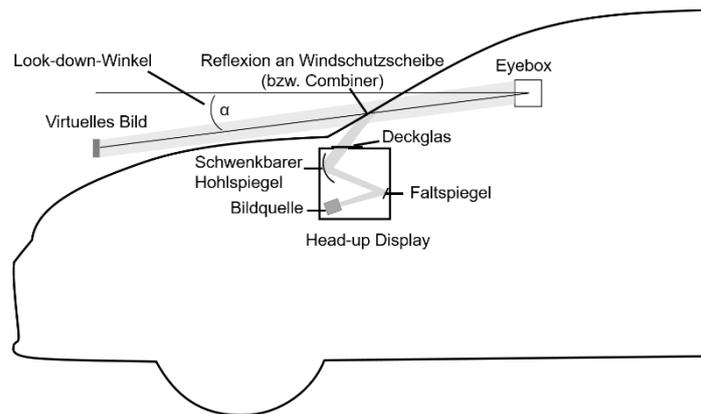


Abbildung 2.3: Aufbau und Funktionsprinzip eines Head-Up Displays (eigene Darstellung nach Schneid, 2009; Sadovitch, 2020).

Schneid (2009) beschreibt einen Leuchtdichteverlust von 80% bedingt durch das optische System. Resultierend muss die Bildquelle (Picture Generating Unit, PGU) hohen Anforderungen hinsichtlich eines hellen und kontrastreichen virtuellen Bildes genügen, um die präsentierten Informationen auch unter sehr hellen Wetterbedingungen lesen zu können. Für das virtuelle Bild wird eine Leuchtdichte von ca. 10.000 cd/m^2 (Israel, 2012) und ein Kontrast von ca. 500:1 (Schneid, 2009) empfohlen. Weitere Anforderungen betreffen die Robustheit hinsichtlich Temperaturen (von -40°C bis $+85^\circ\text{C}$ [Schneid, 2009]) und Stößen. Schneid (2009) verweist außerdem auf die Notwendigkeit der Anzeigedimmung auf 1% der maximalen Helligkeit, was u.a. bei Nachtfahrten von großer Bedeutung ist, sodass eine Blendung der Fahrenen vermieden wird. Des Weiteren gibt Schneid (2009) einen Überblick über geeignete Displaytechnologien für ein HUD.

Das optische System eines HUDs setzt sich aus planaren Spiegel, Hohlspiegel und Linsen zusammen. Schneid (2009) erklärt, dass der Strahlengang mit planaren Spiegel gefaltet werden kann und somit zu einer Einsparung des Bauraums im Fahrzeug verhilft. Konvexlinsen (Lupen) hingegen brechen den Strahlengang, sodass eine Vergrößerung des Bildes erreicht wird. Asphärische Hohlspiegel besitzen faltende und brechende Eigenschaften und bewähren sich somit für den Einsatz in einem HUD (Schneid, 2009). Der letzte Hohlspiegel im HUD ist schwenkbar, sodass die Position der Eyebox auf die Augenhöhe des Fahrenen angepasst werden kann (Schneid, 2009). Die vertikale Bildposition der präsentierten virtuellen Informationen wird über den Look-down-Winkel der Eyebox bestimmt (Sadovitch, 2020).

Die letzte Reflexion des Strahlengangs findet am Combiner- bzw. an der Windschutzscheibe statt. Handelt es sich um ein Combiner-HUD befindet sich eine separate Glasscheibe im Fahrzeuginnenraum vor der Windschutzscheibe. Im Fall eines

Windschutzscheiben-HUDs bedarf es komplexeren Anforderungen. Da die Windschutzscheibe das letzte Element im optischen System des HUDs ist, unterliegt sie strengen Fertigungstoleranzen hinsichtlich Lage und Form. Ferner werden die zu präsentierenden HUD-Informationen abhängig der Windschutzscheibenform und –lage digital vorverzerrt (Schneid, 2009), um Verzerrungen, die durch die Windschutzscheibe entstehen, auszugleichen. Da die Windschutzscheibe aus Sicherheitsgründen doppelt verglast ist, würden Fahrende ein Doppelbild der präsentierten HUD-Informationen sehen. Um dies zu verhindern, wird eine keilförmige Folie zwischen den beiden Scheiben verbaut (Ablaßmeier, 2009; Schneid, 2009). Resultierend nehmen Fahrende eine Überlagerung beider Spiegelungen wahr.

Zusammenfassend erklärt Schneid (2009), dass mit einem HUD die präsentierten Informationen an einer anderen Stelle wahrgenommen werden als sie tatsächlich entstehen. Der Bildentstehungsort ist die Displayoberfläche des HUDs, wahrgenommen werden sie jedoch am unteren Rand des primären Blickfeldes der Fahrenden, über der Motorhaube schwebend. Dabei wird die Verschiebung der Fokulentfernung über das Spiegel- und Linsensystem des HUDs ermöglicht.

2.2.2 *Aufbau und Funktionsprinzip eines Augmented Reality Displays*

Bei einem AR Display handelt es sich um eine Weiterentwicklung des HUDs. 1975 wurde das erste AR Display prototypisch im Fahrzeug von Bubb realisiert (Bubb, 1975). Die zu präsentierenden Informationen können in einem AR Display mit einem direkten Umweltbezug dargestellt werden und sind somit positionsgenau in der Fahrumgebung verortet. Dafür bedarf es einem größeren Field of View (FOV) als bei einem HUD. Jedoch muss angemerkt werden, dass durch die Beschränkung des zur Verfügung stehenden Bauraums im Fahrzeug aktuell noch keine windschutzscheibengroßen AR Displays realisierbar sind. Daimler bietet in der neuen S-Klasse ein FOV von $10^\circ \times 5^\circ$ an (Wie Daimler die S-Klasse zum digitalen Wohnzimmer macht, 2020). Zukünftig soll ein FOV von bis zu $15^\circ \times 5^\circ$ umsetzbar sein (Jachens et al., 2017).

Des Weiteren wird in einem AR Display eine größere Bildentfernung als 2-3 m, wie in einem HUD, ermöglicht (Abbildung 2.4). Schneid (2009) erklärt jedoch, dass in aktuellen AR Displays die Informationen physikalisch nicht in der korrekten Distanz platziert werden können. Folglich muss die menschliche Wahrnehmung mit Hilfe von Tiefenkriterien beeinflusst werden (Abbildung 2.5). Durch Tiefenkriterien erscheinen die AR-Informationen korrekt verortet, obwohl es sich um eine fixe, stehende Bildebene handelt. Schneid (2009) schlägt dazu vor, das virtuelle Bild in einer genügend großen Entfernung darzustellen, sodass der Einfluss der binokularen Tiefenkriterien (Querdisparation) minimiert wird. In der Literatur wird hierzu eine Entfernung von sechs Metern angegeben (Birbaumer & Schmidt, 2007). Da die Sichtstrahlen der Augen nun annähernd parallel verlaufen und somit auch die Konvergenzbewegung der Augen parallel ist, kann die Tiefenwahrnehmung rein über monokulare Tiefenkriterien, wie beispielsweise das Prinzip der relativen Größe oder der linearen Perspektive, erreicht werden (Birbaumer & Schmidt, 2007; Schneid, 2009). Weitere monokulare Tiefenkriterien stellt Goldstein (2008) vor. Somit ist ab einer Distanz von sechs Metern keine Akkommodation der Augen zwischen den präsentierten virtuellen Informationen und der realen Umwelt mehr nötig (Goldstein, 2008).

Aktuelle Serienfahrzeuge projizieren die AR-Informationen auf eine senkrecht stehende virtuelle Bildebene. Diese liegt in einer Fokussentfernung von ca. zehn Meter vor den Fahrenden (ID-Familie von Volkswagen [Von der Luxusklasse ins Kompaktsegment: Das Augmented-Reality-Head-Up-Display, 2020]; Q4 e-tron und Q4 Sportback e-tron von Audi [Augmented Reality Head-up-Display, 2021]; S-Klasse von Daimler [Wie Daimler die S-Klasse zum digitalen Wohnzimmer macht, 2020]). Die räumliche Tiefe der präsentierten virtuellen Informationen werden ausschließlich über monokulare Tiefenkriterien wie beispielsweise das Prinzip der relativen Größe oder die lineare Perspektive erzeugt. So werden die präsentierten AR-Informationen beispielsweise an bzw. entlang realer Objekte in der Fahrumgebung, wie der Fahrspurbegrenzungen oder des Fahrbahnrandes, verortet.

Ferner ist es möglich, die Tiefenwahrnehmung durch eine stereoskopische Darstellung zu erreichen. Jedoch bedeutet das auch, dass für beide Augen ein leicht unterschiedliches Bild erzeugt werden muss. Resultierend beschränkt sich die Eyebox auf einen kleinen Bereich, sodass Fahrende in ihren Bewegungen beschränkt wären (Schneid, 2009).

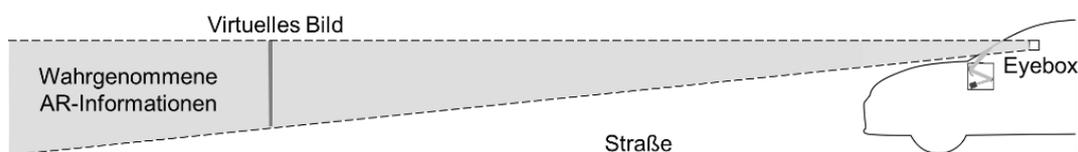


Abbildung 2.4: Funktionsprinzip eines AR Displays (eigene Darstellung nach Bergmeier, 2009; Lutz, im Erscheinen).



Abbildung 2.5: Positionsgenaue Verortung von AR-Informationen in der Umwelt durch monokulare Tiefenkriterien.

Des Weiteren spielen Fahrzeugdaten, wie beispielsweise die Beschleunigung und die Fahrzeugverortung auf Kartenmaterial eine entscheidende Rolle. Auch die Umfelderkennung, die über Sensorik und Kameras realisiert wird, muss Berücksichtigung finden. Nähere Informationen bietet Sadovitch (2020).

Anzumerken ist, dass es im Rahmen der technischen Umsetzung einer AR-Anzeige im Fahrzeug aktuell noch zu Einschränkungen kommen kann. Diese Limitationen sind Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung und werden zukünftig zu bewältigen sein. Diese technischen Einschränkungen können sich auf die Effektivität und die Nutzerakzeptanz der AR-Informationen auswirken (Jansen, 2018; Pfannmüller et al., 2015b; Pfannmüller, 2017; Sadovitch, 2020). So können Ungenauigkeiten in der Sensorik und im Kartenmaterial zu räumlich versetzten bzw. ungenau dargestellten AR-Informationen führen. Eine weitere Herausforderung sind zeitliche Abweichungen, die

bedingt durch Latenzen entstehen. Sadovitch (2020) bewertete unterschiedliche Arten von Registrierungsfehlern und entwickelte fehlertolerante Gestaltungsansätze, um Registrierungsfehler zu kompensieren. Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs können wiederum ein Mitschwingen der AR-Informationen verursachen. Lutz (im Erscheinen) erarbeitete einen Lösungsansatz zur Kompensation der Nick-Wank-Bewegungen. Zu erwähnen ist außerdem, dass das beschränkte FOV in der Konzeptgestaltung berücksichtigt werden muss.

Zusammenfassend unterscheidet sich das AR Display von einem HUD durch die positionsgenaue Platzierung der Informationen in die reale Fahrumgebung. In diesem Kapitel wurden Potentiale, aber auch Herausforderungen in Interaktion mit AR identifiziert. Bisher liegen jedoch wenig kognitionspsychologische Erkenntnisse zur Interaktion mit AR vor. Im folgenden Kapitel wird aus Sicht der menschlichen Informationsverarbeitung auf die Vor- und Nachteile der positionsgenaue Verortung von AR-Informationen eingegangen.

3 Menschliche Informationsverarbeitung von augmentierten Inhalten

Im Folgenden wird das Fahren mit AR-Informationen näher betrachtet. Dabei steht die menschliche Informationsverarbeitung von augmentierten Inhalten während der Fahrt im Fokus. Das Modell von Theeuwes (2001) bietet einen konzentrierten Einblick in die Anforderungen der Fahraufgabe (Kapitel 3.1). Nachfolgend wird das Modell der menschlichen Informationsverarbeitung von Wickens et al. (2016) komprimiert vorgestellt. Dieses dient in dieser Dissertation für die strukturelle Gliederung des folgenden Kapitels. Folglich unterteilt sich das Kapitel in die drei Bereiche (1) Wahrnehmung und Aufmerksamkeit (Kapitel 3.2), (2) kognitive Verarbeitung (Kapitel 3.3) und (3) Entscheiden und Handlungsausführung (Kapitel 3.4). Abschließend wird das Potential von AR-Informationen für das Navigieren in uneindeutigen Navigationssituationen aufgezeigt (Kapitel 3.5)

3.1 Modelle der Fahraufgabe und der menschlichen Informationsverarbeitung

Die Fahraufgabe ist laut Theeuwes (2001) in drei Dimensionen gegliedert (Abbildung 3.1). Die primäre Fahraufgabe umfasst die drei Ebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung (Donges, 1982). Fahrende werden somit auf jeder Ebene hinsichtlich fertigkeitsbasiertem, regelbasiertem und wissensbasiertem Verhalten (Rasmussen, 1983) gefordert. Diese Aufgaben beanspruchen Fahrende unterschiedlich stark, da das Maß der Geübtheit und damit einhergehend die Anforderungen an die Fahrerressourcen eine Rolle spielen (Pfanmüller, 2017). Auf der dritten Dimension ist nach Theeuwes (2001) die menschliche Informationsverarbeitung (Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung und Handlung) dargestellt.

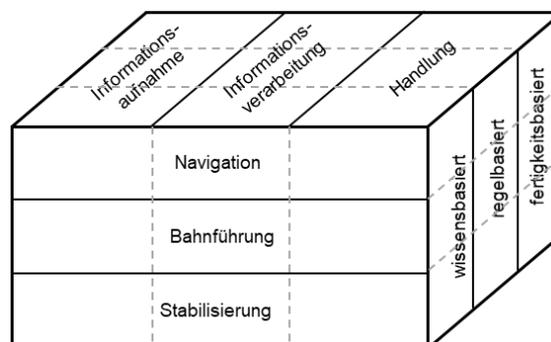


Abbildung 3.1: Die drei Dimensionen der Fahraufgabe (eigene Darstellung nach Theeuwes, 2001; Darstellung in Anlehnung an Pfanmüller, 2017).

Die einzelnen Stufen der Informationsverarbeitung werden nach Wickens et al. (2016) weiter untergliedert (Abbildung 3.2). Wickens et al. (2016) machen außerdem auf den Einfluss der Aufmerksamkeit und der Ressourcen auf alle Verarbeitungsschritte aufmerksam. Das Ergebnis der Informationsverarbeitung ist die Handlungsauswahl, die

schließlich zu einer Handlungsausführung führt. Wie sich die einzelnen Prozesse spezifisch aufeinander auswirken wird in beiden Modellen nicht näher erläutert.

Das folgende Kapitel orientiert sich strukturell am Modell der menschlichen Informationsverarbeitung (Wickens et al., 2016). Die menschliche Informationsverarbeitung von augmentierten Inhalten während der Fahrt wird in den folgenden Kapiteln in die Bereiche (1) Wahrnehmung und Aufmerksamkeit (Kapitel 3.2), (2) kognitive Verarbeitung (Kapitel 3.3) und (3) Entscheiden und Handlungsausführung (Kapitel 3.4) unterteilt.

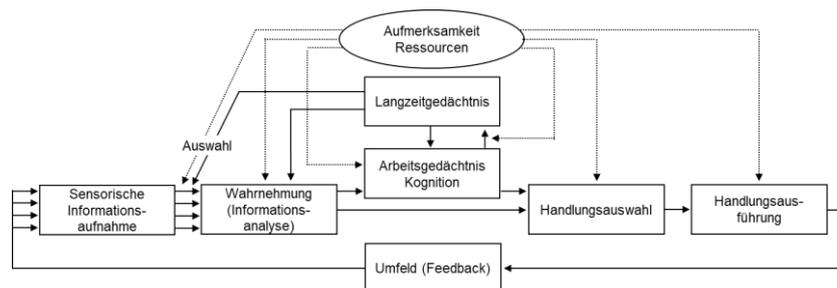


Abbildung 3.2: Modell der menschlichen Informationsverarbeitung (eigene Darstellung nach Wickens et al., 2016).

3.2 Wahrnehmung und Aufmerksamkeit

Die Fahrzeugführung ist eine stark visuelle Aufgabe, bei der mehr als 90% der relevanten Informationen visueller Natur sind (Hills, 1980). Auch AR-Informationen werden visuell wahrgenommen. Folglich wird die Wahrnehmung von visuellen Informationen näher erläutert.

Eine alltägliche Fahrsituation konfrontiert uns mit vielen perzeptuellen Reizen. Jedoch würde die gleichzeitige Verarbeitung aller verfügbaren Reize die Hirnkapazität übersteigen. So ist die primäre Aufgabe der visuellen Aufmerksamkeit die Informationsselektion (Evans et al., 2011). Mit Hilfe der selektiven Aufmerksamkeit werden gezielt fahrrelevante Informationen aus allen verfügbaren ausgewählt. Durch den Mechanismus irrelevante Informationen (hier nicht fahrrelevante Informationen) zu hemmen und ausschließlich ausgewählte Informationen wahrzunehmen, wird die Komplexität der Fahrsituation reduziert und eine Informationsüberlastung verhindert. Mechanismen der selektiven Aufmerksamkeit sind das Blickverhalten und die bewusste Aufmerksamkeit (Goldstein, 2008). Das Blickverhalten setzt sich aus Fixationen und dem peripheren Sehen zusammen. Unter Fixationen versteht man das gezielte Richten der Aufmerksamkeit auf einen Ort, beispielsweise um fahrrelevante Informationen aufzunehmen (Goldstein, 2008). Dabei sind mehr als 90% der fahrrelevanten Informationen visueller Natur (Hills, 1980). Bei einer Fixation fällt das Abbild des Objekts auf die Fovea, der Teilbereich des Auges, der die höchste Detailauflösung besitzt und scharfes Sehen ermöglicht. Zeitgleich zu einer Fixation wird die Fahrumgebung peripher wahrgenommen. In Bezug auf den Blickpunkt nimmt die periphere Wahrnehmung nach außen hin ab (Hills, 1980).

Da AR-Informationen zentral im primären Blickfeld positioniert sind, sind sie für Fahrende einfach und schnell zugänglich. Im Gegensatz dazu präsentiert das HUD die Informationen

am unteren Rand des primären Blickfeldes, sodass Fahrende ihren Blick unterhalb des Horizonts richten müssen. Für das Ablesen von Informationen, die auf peripher gelegeneren Displays, wie dem Kombiinstrument oder dem Mittelkonsolendisplay dargestellt werden, können außerdem Kopfbewegungen nötig sein.

Nach Wickens (2002) wird die Führung des Fahrzeugs in der Mitte der eigenen Fahrspur ambient gesehen und somit automatisiert wahrgenommen. Da die virtuellen AR-Navigationsinformationen die reale Straße überlagern und kein Detailsehen voraussetzen, wird angenommen, dass diese ebenfalls ambient und somit automatisiert wahrgenommen werden können. Dagegen wird in Interaktion mit einem HUD das Ressourcen beanspruchendere fokale Sehen erforderlich. Fahrende benötigen Detailsehen, um die Informationen, die über der Motorhaube zu schweben scheinen, zu erkennen.

Für die Fahrzeugführung ist jedoch neben der selektiven Aufmerksamkeit besonders die geteilte Aufmerksamkeit relevant. Die Aufmerksamkeit der Fahrenden gilt der Fahrumgebung, dem eigentlichen Fahrzeugführen, der Navigationsanzeige und fahrfremden Tätigkeiten, wie der Unterhaltung mit dem Beifahrer bzw. der Beifahrerin. Wenn die Aufgaben jedoch die Aufmerksamkeitsressourcen der Fahrenden übersteigen, wird es zu Einbußen in einer oder mehreren Teilaufgaben kommen. Entgegen der Filtertheorie (Broadbent, 1958), die besagt, dass jeweils nur ein Stimulus wahrgenommen werden kann, erklärt Kahnemann (1973), dass die parallele Verarbeitung von mehreren Einheiten möglich ist. Jedoch wird dafür auf einen gemeinsamen „Pool“ der Kapazität bzw. der Aufmerksamkeit zurückgegriffen. Die detaillierte Analyse mehrerer Einheiten ist somit limitiert (Kahnemann, 1973).

Da AR-Informationen am Bezugsort angezeigt werden, herrscht eine räumliche Nähe zwischen den virtuellen und den realen Objekten (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Somit müssen Fahrende ihre Aufmerksamkeitsressourcen nicht mehr zwischen der virtuellen Information und der Umwelt aufteilen (Gabbard et al., 2014), wie es bei einem HUD nötig ist. Es wird angenommen, dass Fahrende auf Blickwechsel zwischen der AR-Information und der realen Fahrsituation verzichten können und es resultierend zu einer reduzierten geteilten Aufmerksamkeit kommt (Kim & Dey, 2009). In Studien konnte gezeigt werden, dass mit AR, im Vergleich zu einer digitalen Karte, ein verbessertes Fahrverhalten (u.a. Spurposition, Lenkradwinkel, benötigte Zeit, Anzahl der Verstöße) erreicht wurde (Kim & Dey, 2009; Medencia et al., 2011). Durch eine kontaktanaloge Engstellenunterstützung zeigten die Versuchspersonen eine bessere Spurhaltung und durch einen kontaktanalogen Abstandsregeltempomat konnte eine Reduzierung des Workloads erreicht werden (Israel, 2012). Auch präferierten die Fahrenden AR-Informationen gegenüber der konventionellen Darstellung im HUD (Pfannmüller, 2017). Zugleich kann bedingt durch die räumliche Nähe der virtuellen und realen Informationen auf eine Akkommodation in Interaktion mit AR verzichtet werden, da diese ab sechs Metern nicht mehr nötig ist (Goldstein, 2008).

Es stellt sich nun jedoch die Frage, wie der Fokus der Aufmerksamkeit bestimmt wird. Die Aufmerksamkeitsverteilung wird durch die Prozesse Bottom-up und Top-down beeinflusst (Evans et al., 2011). Der Bottom-up-Prozess bezieht sich auf Reiz basierende Faktoren, es handelt sich somit um eine automatische Aufmerksamkeitslenkung. So kann beispielsweise eine auffällige Warnung im Fahrzeug eine reizgesteuerte Aufmerksamkeitslenkung, die automatisch geschieht, verursachen. Bei dem Top-down-Prozess hingegen handelt es sich um nutzergetriebene Faktoren, die durch Wissen und Ziele geleitet werden und somit eine

willentliche Aufmerksamkeitslenkung darstellt. Ein Blick auf das Tachometer zur Geschwindigkeitsüberprüfung stellt solch eine wissensgesteuerte Aufmerksamkeitslenkung, die willentlich durchgeführt wird, dar.

Wickens und Holland (2000) erklären, dass diese Prozesse schnell und automatisch ablaufen und wenig Aufmerksamkeitsressourcen benötigen. Das SEEV-Modell (Wickens et al., 2001) beschreibt wie die visuelle Aufmerksamkeit durch die Prozesse Bottom-up und Top-down bestimmt wird. Dazu nehmen die Autoren eine Einteilung in vier Einflussfaktoren vor: Salience (Salienz), Effort (Anstrengung), Expectancy (Erwartung) und Value (Wert). Im Bereich der Human-Factors Forschung findet das SEEV-Modell besonders in der Displaygestaltung Anwendung (Wickens et al., 2001). Sowohl die Positionierung als auch die Inhalte einzelner Displays im Fahrzeuginnenraum sollten sich an den vier Einflussfaktoren in Bezug auf die visuelle Aufmerksamkeit orientieren. So sollten relevante Informationen besonders salient gestaltet werden. Demensprechend sollten weniger wichtige Informationen in geringerem Maße salient umgesetzt werden, um eine angemessene Aufmerksamkeitsverteilung des Nutzers zu gewährleisten (Wickens et al., 2001). Des Weiteren können häufig genutzte Displays nebeneinander angeordnet werden, um die Informationsaufnahme zu erleichtern (Wickens et al., 2001).

AR-Informationen werden auf der Sichtachse der Fahrenden angezeigt, wodurch der Bottom-up-Prozess der Aufmerksamkeitslenkung erleichtert ist. Laut des SEEV-Modells ist somit die „Anstrengung“ (Effort) der Informationsaufnahme reduziert. Resultierend kann auf die visuelle Suche der benötigten Informationen verzichtet werden. Folglich entstehen keine Suchkosten für Fahrende in Interaktion mit einem AR Display. Des Weiteren kann durch einen erleichterten Bottom-up-Prozess, die Aufmerksamkeit mit AR gezielt auf kritische Ereignisse gelenkt werden (Rusch et al., 2013; Tönnis, 2008), wodurch verkehrsrelevante Informationen frühzeitig entdeckt werden können und es zu einer reduzierten Reaktionszeit der Fahrenden kommen kann im Vergleich zu einem Mittelkonsolendisplay (Kim et al., 2013; Tönnis, 2008). AR-Informationen eignen sich somit für zeitkritische Warnungen.

Des Weiteren wird erwartet, dass sich das Fahren mit AR-Informationen auf Top-down-Prozesse auswirkt. Durch die positionsgenaue Platzierung der AR-Informationen ist ein vorausschauendes Fahren möglich. So sollte sich beispielsweise das frühzeitige Erkennen der richtigen Abbiegung auf die Erwartungshaltung (Expectancy) der Fahrenden hinsichtlich der kommenden Fahrsituation auswirken.

Nach der sensorischen Informationsaufnahme folgt die Wahrnehmung. Hier werden die fahrrelevanten Informationen verarbeitet und interpretiert. Es handelt sich somit um eine Informationsanalyse. Funktionen wie die Objektwahrnehmung spielen hier eine große Rolle. Ein grundlegendes Verständnis der Objektwahrnehmung wurde durch die Gestaltpsychologie, gegründet von Max Wertheimer, erreicht (Goldstein, 2008). Neben dem bekannten Leitsatz, dass „das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile“ (Goldstein, 2008, S. 107) wurden auch die Gestaltprinzipien postuliert. Die Gestaltprinzipien beschreiben wie einzelne Elemente zu einem Ganzen zusammengefügt wahrgenommen werden (Goldstein, 2008). Diese lauten:

1. Das Prinzip der Ähnlichkeit: Ähnliche Elemente (z.B. Form, Farbe, Größe oder Orientierung) werden als zusammengehörig wahrgenommen.

2. Das Prinzip der Nähe: Elemente, die sich nah beieinander befinden, werden als zusammengehörig gesehen.
3. Das Prinzip der Prägnanz (der Einfachheit / der guten Gestalt): Einzelne Elemente werden so wahrgenommen, dass das resultierende Muster so einfach wie möglich ist.
4. Das Prinzip des guten Verlaufs: Linien werden als durchgehend und wenig gekrümmt erkannt. Linien werden so gesehen, als folgten sie dem einfachsten Weg.
5. Das Prinzip des gemeinsamen Schicksals: Elemente mit der gleichen Bewegungsrichtung werden als zusammengehörig wahrgenommen.
6. Das Prinzip der Vertrautheit (der Bedeutung): Elemente werden als zusammengehörig gesehen, wenn sie zusammen als vertraut erscheinen oder mit einer Bedeutung versehen sind.

Der Prozess der Wahrnehmung verdeutlicht die Notwendigkeit einer eindeutigen und gut erkennbaren Anzeige. In der Literatur lassen sich Gestaltungsempfehlungen für AR-Informationen finden, die im Folgenden komprimiert vorgestellt werden.

Exkurs: Gestaltungsempfehlungen für AR-Informationen

Für ein schnelles Verstehen und Interpretieren der AR-Informationen wird eine gute Qualität der zu präsentierenden Informationen vorausgesetzt. AR-Informationen sollten leicht verständlich angezeigt werden. Außerdem sollte eine zu hohe Informationsdichte im AR Display (Visual Clutter) vermieden werden, um eine Reizüberflutung und resultierend eine Überforderung auszuschließen. Des Weiteren sollte die Verdeckung und Maskierung sicherheitsrelevanter Elemente in der Umwelt vermieden (Gabbard et al., 2014; Pautz, 2015) bzw. auf ein Minimum reduziert werden (Schneider et al., 2019). Es wird empfohlen, ausschließlich fahrrelevante Informationen im AR Display zu präsentieren (Bengler et al., 2015; Pfannmüller, 2017), um Ablenkung zu minimieren (Ng-Thow-Hing et al., 2013).

Außerdem wird empfohlen, die Informationen nur situativ und nicht dauerhaft anzuzeigen (Bengler et al., 2015; Pfannmüller, 2017). Steht kein Fahrmanöver bevor, sollten auch keine AR-Informationen sichtbar sein. Es handelt sich somit um eine situative Manöverunterstützung, die für die Interaktion mit AR empfohlen wird (Bengler et al., 2015; Eyraud et al., 2015; Pfannmüller, 2017; Wang et al., 2021).

Um den menschlichen Wahrnehmungsprozess zu unterstützen, ist eine eindeutige und gut erkennbare Anzeige essentiell. Damit AR-Navigationsinformationen ambient und somit automatisch wahrgenommen werden können, sollte sich auf reduzierte AR-Informationen beschränkt werden. Um möglichst wenig Ressourcen zu beanspruchen und aufmerksamkeitsbindende Effekte bedingt durch die Anzeige zu vermeiden, sollte ebenfalls eine minimalistische Gestaltung angestrebt werden. Bedacht werden sollte außerdem, dass sich eine zu saliente Gestaltung der virtuellen Informationen (siehe SEEV-Modell) aufmerksamkeitsziehend auswirken könnte (Pfannmüller, 2017). So wird beispielsweise eine wohl überlegte und reduzierte Anwendung von Animationen empfohlen, da sie durch ihre saliente Natur die Fahreraufmerksamkeit Bottom-up gesteuert leicht auf sich ziehen können (Merenda et al., 2018; Pfannmüller, 2017). Um den Wahrnehmungsprozess, im Speziellen die Objekterkennung der Displayinhalte im Rahmen der Anzeigegestaltung zu unterstützen, kann auf die Gestaltungsprinzipien zurückgegriffen werden (Schneider et al.,

2019). Schneider et al. (2019) empfehlen eine fragmentierte Anzeige, um Maskierungs- und Verdeckungseffekte zu vermeiden. Eine subjektive Bewertung zeigte, dass eine gepunktete Fischgrätenanzeige die Umwelt weniger verdeckt als eine durchgängige Fischgrätenanzeige (Schneider et al., 2019; Abbildung 3.3). Dabei werden die einzelnen AR-Elemente dennoch als Gesamtanzeige wahrgenommen.



Abbildung 3.3: Realfahrtstudie von Schneider et al. (2019) - Eine gepunktete AR-Fischgrätenanzeige wird als weniger verdeckend als eine durchgängige Fischgrätenanzeige wahrgenommen.

3.3 Kognitive Verarbeitung

Der grundsätzliche Unterschied zwischen der Wahrnehmung und der Kognition ist, dass das letztgenannte wesentlich mehr Aufmerksamkeit, mentalen Aufwand und somit mehr Zeit bedarf (Wickens & Holland, 2000). Die Fahrzeugführung, besonders das Navigieren (Abbildung 3.1), erfordert kognitive Operationen wie beispielsweise das Schlussfolgern, das Planen oder das Diagnostizieren. Diese involvieren das Arbeitsgedächtnis (Baddeley & Hitch, 1974). Bei diesem handelt es sich um einen temporären Speicher der Informationen. Es sind bewusste Aktivitäten, die Informationen aufrechterhalten oder umwandeln (Wickens & Holland, 2000). Das Arbeitsgedächtnis ist jedoch hinsichtlich seiner Kapazität begrenzt (Norman & Bobrow, 1975). Miller postulierte 1956, dass das menschliche Gehirn 7 ± 2 Informationselemente, Chunks genannt, gleichzeitig aufrechterhalten kann.

Das Überführen von Informationen in das Langzeitgedächtnis ermöglicht eine längere Verfügbarkeit dieser Informationen. Dies geschieht durch den Prozess des Lernens und des Wiederholens (Wickens et al., 2016). Diese erlernten Informationen formen wiederum die Erwartungshaltung, die als Top-down-Verarbeitung zukünftig zum Einsatz kommen wird. Im Rahmen der kognitiven Verarbeitung von fahrrelevanten Informationen soll auch die mentale Beanspruchung, welche auch als Workload bezeichnet wird, Erwähnung finden. Sheridan und Stassen (1979) beschreiben mentale Beanspruchung als die eigentliche geleistete menschliche Informationsverarbeitung und erlebten emotionalen Stress. Zu unterscheiden gilt es zwischen der Beanspruchung und der Belastung. Die DIN EN ISO 10075-1 (Deutsches Institut für Normung, 2018) beschreibt die psychische Belastung und die psychische Beanspruchung. Die psychische Belastung ist definiert als die „Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse, die von außen auf einen Menschen zukommen und diesen psychisch beeinflussen.“ (Deutsches Institut für Normung, 2018, DIN EN ISO 10075-1, S. 6). Hingegen versteht man unter der psychischen Beanspruchung die „Unmittelbare

Auswirkung der psychischen Belastung im Individuum in Abhängigkeit von seinem aktuellen Zustand.“ (Deutsches Institut für Normung, 2018, DIN EN ISO 10075-1, S. 7). Beispiele für beeinflussende Faktoren des Zustands können Fertigkeiten, Bewältigungsstrategien, Alter, Geschlecht, Müdigkeit und Stimmung sein (Deutsches Institut für Normung, 2018, DIN EN ISO 10075-1). Somit werden äußere Gegebenheiten, die für jeden Menschen gleich sind, als Belastung verstanden. Die Beanspruchung dagegen bezeichnet die Auswirkung auf die Person mit individuellen Eigenschaften (Deutsches Institut für Normung, 2018, DIN EN ISO 10075-1). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept (Rohmert, 1984) verdeutlicht die subjektiv unterschiedlich empfundene Beanspruchung, die durch eine objektive Belastung ausgelöst wird. In Bezug auf die Fahrzeugführung bedeutet das, dass Belastungen ausgehend vom Fahrzeug und von der Umgebung auf die Fahrenden einwirken können (Vollrath & Schießl, 2004).

Angenommen wird, dass AR-Informationen eine reduzierte mentale Beanspruchung in Bezug auf das Verstehen und Interpretieren der präsentierten Informationen im Vergleich zu einem HUD bewirken (Bengler et al., 2015; Israel, 2012; Kim & Dey, 2009; Pauzie, 2015; Pfannmüller, 2017; Pfannmüller et al., 2015a). Dies ist begründet durch die positionsgenaue Verortung der AR-Informationen. Es wird angenommen, dass keine Blickwechsel zwischen der virtuellen Information und der realen Fahrsituation nötig sind (Kim & Dey, 2009). Ferner ist ein mentaler Abgleich für Fahrende nicht erforderlich (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Im Gegensatz dazu, müssen Fahrende mit einem HUD die virtuellen Informationen in die Umwelt übertragen, was sich auf das Beanspruchungslevel auswirken kann. Da das Arbeitsgedächtnis begrenzt ist, sind auch die verfügbaren Ressourcen begrenzt. Angenommen wird, dass in Interaktion mit AR wenig Ressourcen für das Verstehen der präsentierten Informationen benötigt werden. Subjektive Daten zeigten, dass sich Fahrende weniger beansprucht fühlten, wenn Informationen mit einem AR Display präsentiert wurden als mit anderen Navigationssystemen, wie beispielsweise einer Kartenanzeige (Medenica et al., 2011). Jedoch können subjektive Daten Verzerrungen wie der sozialen Erwünschtheit unterliegen. Um Ableitungen hinsichtlich der Potentiale von AR-Informationen treffen zu können, bedarf es objektiver Performance-Daten in Bezug auf die Fahrerbeanspruchung und daraus resultierende Leistungsparameter. Somit wird weitere Forschung benötigt, um die Frage zu beantworten, ob das Wegfallen eines mentalen Abgleichs zu einer reduzierten mentalen Beanspruchung und resultierend zu einer gesteigerten Performance führt.

Durch den Wegfall eines zu leistenden Abgleichs, eignen sich AR-Informationen besonders für das Navigieren. Aufgrund der räumlichen Nähe der präsentierten virtuellen AR-Informationen und der Umwelt (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017) kann es zu einer Reduzierung von Navigationsfehlern kommen (Israel, 2012; Kim & Dey, 2009). Die Voraussetzung für eine vereinfachte kognitive Verarbeitung ist jedoch eine fehlerfreie Verortung der AR-Informationen. Eine fehlerhafte Verortung beansprucht Fahrerressourcen, um die Information zu verstehen und lenkt die Fahreraufmerksamkeit vom Fahrgeschehen weg. Außerdem erhöht sich die Fehlerwahrscheinlichkeit. So wurden in einer Realfahrtstudie die meisten Navigationsfehler verursacht, als es Verortungsprobleme mit dem AR Display gab (Schneider et al., 2019).

Eine weitere Aufgabe, die für den Menschen herausfordernd sein kann, ist das Einschätzen von Distanzangaben. Ein Experiment zeigte, dass Fahrende Distanzen unterschätzten (Mocker, 2015). In einem HUD wird die verbleibende Distanz zum nächsten Manöver in

Form einer digitalen Zahl oder einer sich reduzierenden Balkenanzeige präsentiert. In einem AR Display kann bedingt durch die positionsgenaue Verortung der Informationen in der Umwelt auf eine Distanzangabe in der Navigation verzichtet werden. Da die Distanzangabe somit in der Darstellung integriert ist, sind die AR-Informationen weniger komplex.

In Bezug auf die kognitive Verarbeitung, eignet sich AR ebenfalls, um Beziehungen zwischen Objekten vereinfacht zu verstehen (Tönnis, 2008). Der automatische Abstandstempomat (ACC) stellt hier ein Beispiel dar: Wird die einzustellende Distanz zum Vorfahrenden auf die Straße projiziert, können Fahrende diese einfacher einschätzen als eine abstrakte Balkenanzeige im Kombiinstrument.

Zusammenfassend wird angenommen, dass das Fahren mit einem AR Display weniger Ressourcen benötigt und somit im Vergleich zu einem HUD zu einer reduzierten mentalen Beanspruchung führt. Jedoch werden im Rahmen der Forschung neben den Potentialen auch potentielle aufmerksamkeitsbindende Effekte bedingt durch AR-Informationen diskutiert.

Cognitive Capture und Inattentional Blindness

Eine potentielle Gefahr von Displayanzeigen in Bezug auf die kognitive Verarbeitung wird als Cognitive Capture bezeichnet und wird im Folgenden näher erläutert. Im Rahmen der Flugforschung mit Head-Up-Systemen wurde in den 1980er Jahren der Effekt Cognitive Capture (Weintraub, 1987 nach Tufano, 1997) bekannt. Angemerkt werden muss, dass es sich bei einem HUD im Flugzeug immer um eine kontaktanaloge Anzeige (positionsgenaue Verortung der Informationen) handelt.

Die Literatur zeigt eine Vielfalt von Beschreibungen des Cognitive-Capture-Effekts auf (Bossi et al., 1997; Pauzie, 2015; Pfannmüller, 2017; Prinzel & Risser, 2004; Tönnis, 2006), jedoch wurde sich im Rahmen dieser Dissertation für die Beschreibung von Boston und Braun (1996) entschieden. Demnach kommt es zu Cognitive Capture “when a pilot fails to switch his attention, thus inappropriately fixating on HUD symbology at the expense of other HUD or external scene information“ (Boston & Braun, 1996, S. 57). Somit beschreibt dieser Effekt die Unfähigkeit die Aufmerksamkeit situationsangemessen zwischen dem HUD und der Umwelt zu verteilen (Gish & Staplin, 1995). Gish und Staplin (1995) verweisen auf Studien, in denen Piloten der Aufmerksamkeitswechsel zwischen einem HUD und der Primäraufgabe nicht gelang. Resultierend kann es zu einem Verpassen von Umweltreizen und zu verzögerten Reaktionen kommen (Gish & Staplin, 1995). Das HUD wirkt somit als eine Art Aufmerksamkeitsfalle, sodass HUD-Informationen gegenüber Umweltreizen bevorzugt verarbeitet werden (Gish & Staplin, 1995). Tufano (1997, S. 306) schreibt dazu: “One of the paradoxes of HUDs is that they may do their job too well. Their salience, legibility, and head-up location may command too much of the operator's visual attention, a phenomenon labeled by Weintraub (1987) as cognitive capture.”

Somit sieht Tufano (1997) die Ursache von Cognitive Capture in der Salienz bzw. der Position der HUD-Informationen. Gish und Staplin (1995) nehmen an, dass visuelle Reize des HUDs und der Umwelt nicht von separaten Verarbeitungskanälen verarbeitet werden und die gleichzeitige Verarbeitung von zwei visuellen Reizen nicht möglich ist. Pfannmüller (2017) gibt einen Überblick über weitere Erklärungen in der Literatur. So erklären Jarmasz et al. (2005) Cognitive Capture mit objektbasierter visueller Aufmerksamkeit. Folglich werden HUD-Informationen perzeptuell gruppiert und als ein

Objekt wahrgenommen. Dieses wird unabhängig von der Umwelt erkannt. Sie verweisen des Weiteren darauf, dass resultierend die Verarbeitung der Informationen aus der Umwelt unterdrückt wird. Kim und Dey (2009) erklären die Ursache von Cognitive Capture mit der „Kognitiven Distanz“, die sich sowohl auf die Aufmerksamkeitsverschiebung von der Umwelt auf das HUD bezieht, als auch auf die Distanz, die überwunden werden muss, um virtuelle HUD-Informationen in die Umwelt zu übertragen. Pausie (2015) argumentiert, dass zu viele Informationen im HUD die Gefahr von Cognitive Capture birgt. Gish und Staplin (1995) erklären, dass eine hohe mentale Beanspruchung Cognitive Capture begünstigt. In der Literatur wird neben Cognitive Capture von Cognitive Tunneling oder Attentional Tunneling gesprochen. Jedoch können diese Begriffe nach Gish und Staplin (1995) als Synonyme zu Cognitive Capture verwendet werden.

Da dieser Effekt jedoch im Rahmen der Flugforschung bekannt wurde, ist die Übertragung auf den Automobilkontext zu diskutieren. Um die Gemeinsamkeiten und die Unterschiede in Bezug auf das Fliegen eines Flugzeugs im Vergleich zu dem Führen eines Fahrzeugs in Interaktion mit einem HUD besser zu verstehen, werden diese im Folgenden kurz beschrieben.

Wenngleich der Start und die Landung eines Flugzeugs manuell absolviert werden, kommt der Autopilot in der Luft zum Einsatz. Piloten arbeiten nun zahlreiche Prozeduren ab. Sie richten ihren Blick auf das HUD, das unter anderem dazu dient die Flugroute und die Flughöhe zu kontrollieren, aber auch um auf andere Flugzeuge aufmerksam zu werden.

Dagegen gelten die Blicke eines Fahrzeugführenden vermehrt der Umgebung. Entscheidungen, wie das Reagieren auf andere Verkehrsteilnehmer, müssen schnell getroffen werden. Diese Entscheidungen sind situationsgetrieben und die Verkehrssituation kann sich innerhalb von Sekunden ändern.

Sowohl das Fliegen als auch das Autofahren beanspruchen vorwiegend den visuellen Sinneskanal. Beim Fliegen handelt es sich jedoch vor allem um prozedurgetriebenes Handeln, wohingegen das Fahrzeugführen situationsgetrieben ist. Diese Unterschiede in den Aufgaben lassen auf ein von Grund auf unterschiedliches Blickverhalten schließen.

Folglich lassen Erkenntnisse der Luftforschung hinsichtlich Cognitive Capture keine Ableitungen auf das Fahrzeugführen zu. Es bedarf systematischen Untersuchungen des Cognitive-Capture-Effekts im Simulator und im realen Fahrzeug, um Aussagen für den Automobilbereich ableiten zu können.

Gish und Staplin (1995) leiten im Rahmen ihrer Meta-Analyse mögliche Ursachen von Cognitive Capture für den Automotivbereich ab. Sie resümieren, dass das Auftreten von Cognitive Capture bei den folgenden Bedingungen am wahrscheinlichsten ist:

- hohe Anzahl von Reizen in der Umwelt und im HUD,
- örtliche und zeitliche Unsicherheit wichtiger Ereignisse in der Umwelt,
- niedrige Auffälligkeit wichtiger Ereignisse in der Umwelt und
- niedrigere relative Rate der Ereignisse in der Umwelt als im HUD (bezieht sich auf beanspruchende Ereignisse).

Die Auswirkung des Cognitive-Capture-Effekts ist eine Verengung des peripheren Blickfeldes (Milicic, 2010). Dies wird als Perceptual Tunneling bezeichnet (Bossi et al.,

1997; Milicic, 2010) und ist schematisch in der Abbildung 3.4 dargestellt. Resultierend werden Umgebungsreize im peripheren Blickfeld seltener entdeckt.

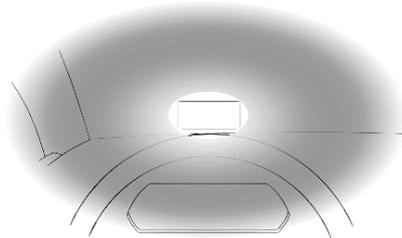


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Effekts Perceptual Tunneling, bei dem sich das periphere Blickfeld verengt.

Während des Fahrens mit einem HUD blieb das Auftreten von Cognitive Capture und Perceptual Tunneling bisher unbestätigt (Horrey et al., 2003; Milicic, 2010). Im Vergleich zu einem HUD werden AR-Informationen jedoch auf der primären Sichtachse der Fahrenden angezeigt und sind somit salienter.

Kim und Gabbard (2019) untersuchten das Ablenkungspotential von AR-Anzeigen für Fußgängerwarnungen und fanden heraus, dass dieses von der grafischen Gestaltung der AR-Elemente abhängig ist. Dafür wendeten sie eine modifizierte SAGAT-Methode an, um die Versuchspersonen auf ihr Situationsbewusstsein zu testen. Außerdem wurde das Blickverhalten, die Beanspruchung und das Selbstvertrauen in die eigenen Antworten erfasst.

Wang et al. (2021) untersuchten, ob AR-Informationen zu Inattentional Blindness führen können (Rock et al., 1992). Hierbei handelt es sich um das Unvermögen ein sichtbares, jedoch unerwartetes Objekt zu bemerken, weil die Aufmerksamkeit auf andere Objekte, Aufgaben oder Ereignisse gerichtet war (Simons, 2007). Dafür sahen die Versuchspersonen Videos von Fahrten mit einem AR Display und mussten auf kritische Ereignisse reagieren. Jedoch wurden ausschließlich die Reaktionen auf Fußgänger, die die Straße überquerten, analysiert. Die Daten zeigten, dass AR-Informationen Inattentional Blindness verursachten, wenn Fußgänger nicht augmentiert waren. Wenn diese jedoch augmentiert waren, konnte Inattentional Blindness vermindert werden.

Kim et al. (2016) betonen, dass AR Displays bedacht gestaltet werden müssen, sodass die Aufmerksamkeit des Fahrers geführt und nicht gebunden wird. So sollte die Aufmerksamkeit der Fahrenden situationsangemessen über die Fahrumgebung und die präsentierten Informationen streuen, sodass relevante Verkehrsteilnehmer wahrgenommen und situationsangemessenes Verhalten gezeigt werden kann.

Eyraud et al. (2015) untersuchten Auswirkungen von AR-Informationen auf die Aufmerksamkeitsverteilung. Die Versuchspersonen sahen dafür Videos von Fahrsituationen. Sie wurden per Sprachansage aufgefordert ein Manöver durchzuführen und mussten entscheiden, ob es die Situation zulässt. Getestet wurden augmentierte manöverspezifische Hinweise versus augmentierte generelle Fahrhinweise versus augmentierte manöverspezifische und generelle Fahrhinweise versus keine augmentierten Hinweise. Die Fixationshäufigkeit und die prozentuale Blickverweildauer wurden

analysiert. Eyraud et al. (2015) stellten fest, dass AR-Informationen die Aufmerksamkeitsverteilung reduzierten, wenn Fahrer mit augmentierten generellen Fahrhinweisen ein Manöver durchführten. Mit augmentierten manöverspezifischen Hinweisen verbesserte sich jedoch die Aufmerksamkeitsverteilung. Des Weiteren beeinflussten AR-Informationen die Aufmerksamkeitsverteilung während der Entscheidungsphase (Eyraud et al., 2015; Abdi & Meddeb, 2017).

Abgeleitet werden kann, dass AR-Informationen die Fahreraufmerksamkeit führen und somit das Blickverhalten verbessern können, wenn es sich um eine situative Manöverunterstützung handelt (Bengler et al., 2015; Eyraud et al., 2015, Pfanmüller, 2017). Des Weiteren spielt die grafische Gestaltung der AR-Informationen eine große Rolle hinsichtlich des Ablenkungspotentials. Es bedarf weiteren systematischen Untersuchungen, um Aussagen zu potentiellen aufmerksamkeitsbindenden Effekten bedingt durch AR-Informationen im Fahrkontext treffen zu können.

3.4 Entscheiden und Handlungsausführung

Die Handlungsauswahl ist das Ergebnis der vorangegangenen mentalen Prozesse. Fahrende haben die relevanten Informationen wahrgenommen und verarbeitet und sind nun fähig zukünftige Schritte abzuleiten (Antizipation im Modell Situation Awareness, Endsley, 1988). Auf dieser Wissensbasis treffen Fahrende nun die Entscheidungen für ihr Handeln.

Für eine kontrollierte Bewegung im Rahmen der Handlungsausführung wird die präzise Koordination von Muskeln benötigt. Dies ist nicht Fokus dieser Dissertation und wird somit nicht näher beleuchtet.

In Bezug auf die Handlungsauswahl und die Handlungsausführung wirken sich AR-Informationen insoweit positiv aus, dass eindeutige und klar verständliche Informationen den Fahrenden präsentiert werden. Resultierend ist ein zielgerichtetes und direktes Handeln bzw. Reagieren möglich. Diskutiert wird jedoch, ob AR-Informationen zu viel Vertrauen der Fahrenden hervorrufen und es resultierend zu reduzierten oder gar ausbleibenden Kontrollblicken kommt. Hierzu beziehen sich Gabbard et al. (2014) auf die Flugforschung (Wickens et al., 1999), in der die Neigungen zu übersteigertem Vertrauen in Systeme beschrieben wird. Die Autoren zeigen auf, dass dies auf das Fahren mit AR übertragen werden kann. Gabbard et al. (2014) diskutieren, dass es sicherlich Situationen gibt, in denen Fahrende AR-Informationen zu viel Vertrauen schenken und fahrrelevante Umweltreize ignorieren. Gegenteilig verweisen sie außerdem darauf, dass Fahrende relevante AR-Informationen ignorieren könnten, wenn AR-Informationen in der Vergangenheit fehlerhaft waren.

In Bezug auf das Ableiten einer angemessenen Handlung wird außerdem diskutiert, dass das Antizipieren mit AR in bestimmten Situationen erschwert ist. Pauzie (2015) erklärt, dass das Antizipieren mit AR schwieriger sein könnte als mit einer Anzeige, die auf jegliche zukünftige Ereignisse hinweist. Begründet liegt dies in der Positionsgenauigkeit der AR-Informationen. Befindet sich die kommende Situation noch nicht im FOV des Fahrers, kann diese nicht vorausschauend wahrgenommen werden und das Antizipieren ist erschwert. Kim & Dey (2009) schlugen ein AR-Konzept vor, dass das Antizipieren der nächsten Situation erleichtert, auch wenn diese noch nicht im FOV des Fahrenden liegt. Dafür wird die kommende Situation als eine Art Kartenanzeige in den Himmel projiziert (Abbildung

3.5). Angemerkt werden muss jedoch, dass einige Fahrende früher abgebogen sind als angezeigt. Andere Fahrende interpretierten die Anzeige als eine Art Vorfahrtsregelung unabhängig der Ampelphase.



Abbildung 3.5: Vorausschauende Kartenanzeige in einem AR Display in der Simulatorstudie von Kim & Dey (2009).

Tabelle 3.1 zeigt die Kernaussagen der menschlichen Informationsverarbeitung von AR-Informationen.

Tabelle 3.1: Kernaussagen der menschlichen Informationsverarbeitung von AR-Informationen

Potential von AR-Informationen:
<ul style="list-style-type: none"> - intuitives Verständnis durch positionsgenaue Verortung (Pfanmüller, 2017) - einfache und schnelle Zugänglichkeit durch Positionierung im zentralen primären Blickfeld - Reduzierung der Reaktionszeit durch erleichterte Aufmerksamkeitslenkung (Bottom-up gesteuert) (Kim et al., 2013; Rusch et al., 2013; Tönnis, 2008) - Reduzierung der geteilten Aufmerksamkeit (Kim & Dey, 2009; Gabbard et al., 2014) - Möglichkeit der Visualisierung von Beziehungen zwischen Objekten (Tönnis, 2008) - Minimierung des Akkommodationsaufwands der Augen - keine Blickwechsel und somit kein mentaler Abgleich zwischen AR-Informationen und der realen Fahrsituation nötig durch positionsgenaue Verortung (Kim & Dey, 2009; Pfanmüller, 2017) - Reduzierung der mentalen Beanspruchung (Bengler et al., 2015; Israel, 2012; Kim & Dey, 2009; Medenica et al., 2011; Pauzie, 2015; Pfanmüller, 2017; Pfanmüller et al., 2015a) → wenig Fahrerressourcen benötigt - Präferenz gegenüber anderen Darstellungsarten (Pfanmüller, 2017) - Förderung von zielgerichtetem und direktem Handeln bzw. Reagieren, durch eindeutige und klar verständliche Informationen
Zu vermeiden für AR-Informationen:
<ul style="list-style-type: none"> - hohe Informationsdichte - Verdeckung und Maskierung von Umweltreizen (Gabbard et al., 2014; Pauzie, 2015; Schneider et al., 2019) - zu saliente Gestaltung; Empfehlung: ausschließlich fahrrelevante AR-Informationen bzw. eine situative Manöverunterstützung, um Ablenkung bzw. Aufmerksamkeitsbindung zu vermeiden (Bengler et al., 2015; Eyraud et al., 2015; Ng-Thow-Hing et al., 2013; Pfanmüller, 2017; Wang et al., 2021)

Zusammenfassend wird in Bezug auf die menschliche Informationsverarbeitung von AR angenommen, dass je näher die präsentierten Informationen an der natürlichen räumlichen Orientierung und am Wahrnehmungsprozess liegen, desto besser bzw. schneller kann eine Entscheidung getroffen bzw. ein Verhalten gezeigt werden. Das wiederum wirkt sich positiv auf das subjektive Empfinden aus.

3.5 Potential von AR-Informationen für das Navigieren in uneindeutigen Navigationssituationen

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Potentiale von AR-Informationen zur Unterstützung der Fahrenden hinsichtlich der Informationsaufnahme, der kognitiven Verarbeitung, des Entscheidens und der Handlung aufgezeigt. Des Weiteren wurden auch Voraussetzungen und Herausforderungen dieser neuen Anzeigeart diskutiert. Im Folgenden wird gezeigt, inwieweit AR-Informationen Fahrende in einer uneindeutigen Navigationsaufgabe unterstützen, was Fokus der vorliegenden Dissertation ist.

Das Navigieren ist eine grundlegende Aufgabe beim Fahren. Es handelt sich um eine räumliche Aufgabe, da Fahrende ihre Route planen und sich in ihrer Umgebung orientieren müssen. Das Navigieren in einer fremden Umgebung oder in uneindeutigen Situationen erfordert wissensbasiertes Verhalten (Rasmussen, 1983). Dazu greifen Fahrende auf ihre mentalen Ressourcen zurück. Somit kann die Navigationsaufgabe eine kognitiv beanspruchende Aufgabe für Fahrende sein. Es wird angenommen, dass Fahrende in der Navigation durch neue Anzeigetechnologien, wie dem AR Display, unterstützt werden können. Durch die fortschreitende Digitalisierung nimmt auch die Verfügbarkeit an verkehrsrelevanten Informationen zu, die Fahrern angezeigt werden. Angezeigt werden können beispielsweise Informationen zur geplanten Route, Warnungen oder erkannte Verkehrszeichen. Sichergestellt werden sollte jedoch, dass Fahrende diese Informationen schnell und einfach verstehen können und Ablenkung vermieden wird.

Die Tabelle 3.2 zeigt, wie AR-Navigationsinformationen, die ortsgenau in der Umgebung platziert werden, eine Reduzierung von Navigationsfehlern in uneindeutigen Navigationssituationen erzielen können. Das erwartete Potential eines AR Displays für das manuelle Navigieren in einer uneindeutigen Navigationssituation wird anhand der Einordnung in fünf Abstraktionsebenen (Rasmussen, 1985) aufgezeigt. Die Einordnung in die Abstraktionshierarchie verdeutlicht die verschiedenen Aspekte bzw. Ebenen des Fahrens mit AR-Informationen. Bei den fünf Abstraktionsebenen handelt es sich um den Funktionszweck (functional purpose), die abstrakte Funktion (abstract function), die verallgemeinerte Funktion (generalised function), die physische Funktion (physical function) und die physische Form (physical form).

Die Reduzierung von Navigationsfehlern in einer uneindeutigen Navigationssituation stellt das übergeordnete Ziel, das Gesamtziel, dar (Tabelle 3.2). Dafür sollte die Navigationsanzeige einfach und schnell zu verstehen sein. Der Funktionszweck beschreibt folglich das Hauptziel. In diesem Fall handelt es sich um die optimale Orientierung in der uneindeutigen Navigationssituation. Des Weiteren wird die Reduzierung der mentalen Beanspruchung des Fahrers in der uneindeutigen Navigationssituation angestrebt. Die abstrakte Funktion bezieht sich auf die zugrundeliegenden Prinzipien, die für die

Erreichung des Funktionszwecks eingehalten werden müssen. Hier handelt es sich um das Bewusstsein der eigenen Verortung in der uneindeutigen Navigationssituation, sowie das Bewusstsein für die Zielabiegung, um folglich einen Überblick über die Situation zu erlangen. Die verallgemeinerte Funktion erklärt die nötigen Prozesse und Funktionen zur Umsetzung der Prinzipien der abstrakten Funktion. Fahrende werden folglich durch eine vereinfachte Informationsdarstellung informiert. Die ortsgenaue Platzierung der Navigationsinformationen in der Umwelt stellt hier die geeignete Darstellungsform dar. Bei den visuellen Navigationsinformationen handelt es sich um die physische Funktion. Diese bezieht sich auf die notwendigen Bestandteile. Dahingegen beschreibt die physische Form die unterste Ebene, die Eigenschaften der Bestandteile, wie der Zustand, das Aussehen, das Material und die Position. Das sind hier die AR-Elemente in der Windschutzscheibe: die Trajektorie und der Pfeil, der in die Zielabiegung zeigt.

Tabelle 3.2: Abstraktionsebenen (Rasmussen, 1985) an dem Beispiel des manuellen Navigierens mit AR-Informationen in einer uneindeutigen Navigationssituation.

Abstraktionsebenen (abstraction hierarchy)	Augmented Reality Display für das manuelle Navigieren in einer uneindeutigen Navigationssituation
Gesamtziel (overall purpose)	Reduzierung von Navigationsfehlern in einer uneindeutigen Navigationssituation & Navigationsanzeige soll einfach und schnell zu verstehen sein
Funktionszweck (functional purpose)	Optimale Orientierung in einer uneindeutigen Navigationssituation & Reduzierung der mentalen Beanspruchung des Fahrers in einer uneindeutigen Navigationssituation (Ressourcen sparen)
Abstrakte Funktion (abstract function)	Bewusstsein der eigenen Verortung in einer uneindeutigen Navigationssituation & Bewusstsein für die Zielabiegung (Überblick über die Navigationssituation)
Verallgemeinerte Funktion (generalised function)	Informieren des Fahrers durch vereinfachte Informationsdarstellung → Informationen werden ortsgenau in der Umwelt platziert
Physische Funktion (physical function)	Visuelle Navigationsinformationen
Physische Form (physical form)	AR-Elemente (Trajektorie und Pfeil, der in die Zielabiegung zeigt) in Windschutzscheibe

4 Zielsetzung dieser Dissertation

Das Navigieren ist eine grundlegende Aufgabe beim Fahren. Diese kann eine kognitiv beanspruchende Aufgabe für Fahrende darstellen, wie beispielsweise das Navigieren in einer fremden Umgebung oder in uneindeutigen Situationen (Bauerfeind et al., 2021). Dazu greifen Fahrende auf ihre mentalen Ressourcen zurück. Es wird angenommen, dass Fahrende in uneindeutigen Navigationssituationen durch neue Anzeigetechnologien, wie dem AR Display, unterstützt werden können. Durch die fortschreitende Digitalisierung nimmt auch die Verfügbarkeit an verkehrsrelevanten Informationen zu, die ein Fahrzeug Fahrenden anzeigen kann. Sicherergestellt werden sollte jedoch, dass Fahrende diese Informationen schnell und einfach verstehen können und Ablenkung vermieden wird.

Die Technologie Augmented Reality hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Bisherige Studien zeigen, dass Fahrende in verschiedenen Bereichen, wie Navigation, Warnungen oder unterstützenden Informationen von Fahrerassistenzsystemen, von AR profitieren können. Im Vergleich zu einem konventionellen HUD werden AR-Informationen positionsgenau in der Umwelt verortet. Resultierend können präsentierte Informationen schneller und vereinfacht verstanden werden. Im Vergleich zu einem HUD wird erwartet, dass durch die positionsgenaue Verortung der AR-Informationen Fahrende weniger hinsichtlich visuellen, räumlichen Ressourcen beansprucht werden (Pfanmüller, 2017). Subjektive Daten zeigen, dass sich Fahrende weniger beansprucht fühlen, wenn Informationen mit einem AR Display präsentiert wurden als mit anderen Navigationssystemen, wie beispielsweise einer Kartenanzeige (Medenica et al., 2011). Jedoch können subjektive Daten Verzerrungen wie der sozialen Erwünschtheit unterliegen. Um Aussagen zum Beanspruchungslevel in Interaktion mit AR-Informationen treffen zu können, bedarf es objektiver Performance-Daten in Bezug auf die Fahrerbeanspruchung und daraus resultierende Leistungsparameter (Bauerfeind et al., 2021).

Resultierend stellte ein erster Schwerpunkt dieser Dissertation die Untersuchung der objektiven Fahrerbeanspruchung in Interaktion mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD dar (Bauerfeind et al., 2021). Dafür wurde ein verbessertes Verständnis der menschlichen Informationsverarbeitung von augmentierten Inhalten während der Fahrt erarbeitet. Diese umfasste die Informationsaufnahme, die kognitive Verarbeitung, die Entscheidungsfindung sowie die Handlungsausführung, hier das Navigieren in uneindeutigen Situationen mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD.

Neben den Potentialen von AR-Informationen wurden auch diskutierte Herausforderungen untersucht. Ein weiterer Forschungsfokus stellte somit die Untersuchung einer potentiellen Aufmerksamkeitsbindung bedingt durch AR-Informationen während der Navigation dar. Analysiert wurde, ob AR-Informationen zu Tunnelblicken führen können und somit Hinweise auf einen Cognitive-Capture-Effekt (Weintraub, 1987 nach Tufano, 1997) geben. Ausgelöst durch den Cognitive-Capture-Effekt sind Fahrende kognitiv stark gebunden, sodass ihnen der situationsangemessene Aufmerksamkeitswechsel zwischen der Umwelt und der Anzeige nicht mehr gelingt. Resultierend können fahrrelevante Informationen in der Fahrumgebung übersehen werden. Dieser erstmals in der Flugforschung diskutierte Effekt wurde im Automobilkontext bisher nicht gefunden (Horrey et al., 2003; Milicic, 2010). Es bedarf systematischen Untersuchungen und einem verbesserten Verständnis der

Informationsaufnahme von AR-Informationen im Fahrkontext, um Aussagen für den automobilen Kontext ableiten zu können.

Zusätzlich wurde der Einfluss von Umweltfaktoren auf die Interaktion mit AR-Informationen untersucht. Es stellte sich die Frage, ob ein erhöhtes Verkehrsaufkommen die Interaktion mit einem AR Display erschwert. Zu untersuchen galt es, ob die Überlagerung mit anderen Verkehrsteilnehmern das Verstehen der Anzeige behindern oder sich Überdeckungseffekte störend auswirken. Untersuchungsfokus stellte somit der Einfluss der Verkehrskomplexität auf die Effektivität und Bewertung von AR-Informationen dar.

Zusammenfassend wurde sich in dieser Dissertation auf das Themenfeld Potentiale von AR-Informationen für das manuelle Navigieren in uneindeutigen Situationen konzentriert. Ziel der Dissertation war die Untersuchung der Auswirkungen auf die Effektivität und die Beanspruchung von AR-Informationen in uneindeutigen Navigationsaufgaben im Vergleich zu einem HUD. Analysiert wurde, ob AR-Informationen zu einer verbesserten Orientierung, einer gesteigerten Leistung und gleichzeitig einer reduzierten Beanspruchung in uneindeutigen Navigationssituationen verhelfen können.

Das HUD wurde in dieser Dissertation als Baseline angesehen, da diese Technologie bereits Vorteile, besonders hinsichtlich des Blickverhaltens, im Vergleich zu HDDs bietet (Kapitel 2.1). Des Weiteren handelt es sich zum Zeitpunkt dieser Dissertation um den neusten Stand der Technik in aktuellen Fahrzeugmodellen.

Drei empirische Untersuchungen boten die Grundlage, um die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

- Wie wirken sich AR-Informationen auf das Navigieren hinsichtlich der **Fahrerbeanspruchung** und des **Fahrverhaltens** in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD aus?
 - a. Wie wirken sich AR-Informationen auf die Fahrerbeanspruchung in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD aus? (Studie 1-3)
 - b. Wie wirken sich AR-Informationen auf die Entscheidungsfindung in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD aus? (Studie 1)
 - c. Wie wirken sich AR-Informationen auf die Erfüllung einer uneindeutigen Navigationsaufgabe (richtige Route finden) im Vergleich zu einem HUD aus? (Studie 1-3)
 - d. Wie wirken sich AR-Informationen auf das Fahrverhalten in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD aus? (Studie 1 & 2)
- Wie wirken sich AR-Informationen auf das **subjektive Erleben** in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD aus? (Studie 1-3)
- Gibt es **negative Seiteneffekte** von AR-Informationen in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?
 - a. Wie wirken sich AR-Informationen auf das Blickverhalten in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD aus? Ferner, können

AR-Informationen zu aufmerksamkeitsbindenden Effekten in Form eines Cognitive-Capture-Effekts führen? (Studie 2 & 3)

- b. Wie wirkt sich die Verkehrskomplexität auf die Effektivität und Bewertung der AR-Informationen in uneindeutigen Navigationssituationen aus? (Studie 2)

Im Rahmen dieser Dissertation wurden zwei Simulatorstudien und eine Realfahrtstudie durchgeführt. In allen Studien wurden uneindeutige Navigationssituationen untersucht. Diese beinhalteten mehrere dicht gelegene Abbiegungen. Für die Simulatorstudien wurden diese geschaffen. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es mit Hilfe der Navigationsanzeige (AR Display vs. HUD) die richtige Route in vorstädtischen Gegenden zu finden.

Bei der ersten Simulatorstudie handelte es sich um eine Grundlagenstudie ($N = 59$; $M = 37.1$ Jahre, $SD = 11.1$ Jahre). Angenommen wurde, dass das AR Display zu schnelleren und vereinfachten Entscheidungen in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD führt. Der Untersuchungsfokus lag somit auf dem Entscheidungspunkt für die korrekte Abbiegung in uneindeutigen Navigationsszenarien (Bauerfeind et al., 2019). Ein weiterer Fokus lag auf der Fahrerbeanspruchung, die in Interaktion mit den Anzeigearten AR Display bzw. HUD entsteht (Bauerfeind et al., 2021). Vermutet wurde, dass das AR Display in einer Navigationsaufgabe weniger beanspruchend ist als ein HUD. Als Maß für die Fahrerbeanspruchung wurde sich für die Leistung in einer kognitiven Nebenaufgabe entschieden, die eine indirekte Messung der Beanspruchung darstellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Fahrenden freie Ressourcen für die Erfüllung der Nebenaufgabe haben, wenn die Primäraufgabe, das Navigieren mit der Anzeige, weniger beanspruchend ist. Für eine umfassende Analyse wurde ebenfalls die Navigationsleistung, das Fahrverhalten und das subjektive Erleben betrachtet (Bauerfeind et al., 2019; Bauerfeind et al., 2021). Die Versuchspersonen wurden dazu mit Hilfe der jeweiligen Navigationsanzeige über gerade Hauptstraßen einer Vorstadt ohne Ampeln und andere Verkehrsteilnehmer geführt. So konnte eine standardisierte Situation geschaffen werden, um die Effektivität des AR Displays systematisch zu untersuchen.

Im Rahmen der zweiten Studie wurde untersucht, ob das Navigieren mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD zu aufmerksamkeitsbindenden Effekten führt, die auf einen Cognitive-Capture-Effekt (Weintraub, 1987 nach Tufano, 1997) hindeuten können. Dafür wurde das Blickverhalten, in Form der Blickstreuung, während des Navigierens mit den Anzeigearten (AR Display und HUD) in einer vorstädtischen Gegend mit uneindeutigen Navigationssituationen untersucht ($N = 58$; $M = 33.0$ Jahre, $SD = 10.0$ Jahre). Die Fahrten unterschieden sich hinsichtlich der Verkehrskomplexität (niedrig vs. hoch), um herauszufinden, ob die Fahrenden ihr Blickverhalten an veränderte Umweltbedingungen anpassen. Des Weiteren wurde untersucht, ob die Verkehrskomplexität die Effektivität und die Bewertung der AR-Informationen beeinflussen kann. Da die AR-Informationen positionsgenau in der Umwelt verortet sind, kann es zu Überlagerungen mit anderen Verkehrsteilnehmern kommen. Die Verkehrskomplexität wurde in Form der Anzahl fahrender und parkender Fahrzeuge (hohe Fahrzeuge [LKWs] und niedrige Fahrzeuge [PKWs]) in den Fahrten variiert. 16 Fahrzeuge pro Kilometer wurden als niedrige und 23 Fahrzeuge pro Kilometer wurden als hohe Verkehrskomplexität verstanden. Für die Untersuchung aufmerksamkeitsbindender Effekte wurde des Weiteren eine komplexere Situation, eine uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug, am

Ende jeder Fahrt analysiert. Dies hatte zum Ziel zu untersuchen, ob die Fahrenden dieses entgegenkommende Fahrzeug beachten und ein angemessenes Fahrverhalten mit der jeweiligen Anzeigart zeigen. Dazu wurden die Fahrenden mit der Entscheidung konfrontiert, vor diesem abzubiegen oder ihn passieren zu lassen. Analysiert wurde außerdem, ob es mit einem AR Display zu einer reduzierten Blickwechselanzahl zwischen der Anzeige und der Zielabbiegung kommt, da die virtuellen Informationen bereits positionsgenau in der Umwelt verortet sind und die Fahrenden diese somit nicht mehr mental auf die reale Fahrsituation übertragen müssen (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Dazu wurde das Blickverhalten zwischen dem AR Display und dem HUD hinsichtlich der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen der Navigationsinformation und der Zielabbiegung untersucht. Neben der Navigationsaufgabe absolvierten die Fahrenden eine kognitive Nebenaufgabe, um die Fahrerbeanspruchung zu erfassen. Des Weiteren wurde die Navigationsleistung und die subjektive Einschätzung analysiert.

Im Rahmen der dritten Studie erfolgte eine Validierung in realen Navigationssituationen ($N = 48$; $M = 42.2$; $SD = 9.1$ Jahre). Die technische Umsetzung eines AR Displays in einem realen Fahrzeug kann zu Einschränkungen führen, die sich auf die Effektivität und die Nutzerakzeptanz der AR-Informationen auswirken können (Jansen, 2018; Pfannmüller et al., 2015b; Pfannmüller, 2017; Sadovitch, 2020). So können Sensorungenauigkeiten zu versetzten oder ungenau dargestellten AR-Informationen führen. Des Weiteren können, bedingt durch die Straßenbeschaffenheit, Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs ein Mitschwingen der AR-Informationen verursachen. Anzumerken ist, dass unter technischen Einschränkungen hier Ungenauigkeiten und das Mitschwingen verstanden werden, jedoch keine Fehler (z.B. Anzeige präsentiert die falsche Fahrtrichtung in einer Einbahnstraße). Ziel der Realfahrtstudie war die Validierung der gefundenen Potentiale eines AR Displays im Vergleich zu einem HUD in einer realen Navigationsaufgabe. In dieser Realfahrtstudie wurde der Einfluss der Anzeigarten (HUD vs. AR Display) und die Eindeutigkeit der Abbiegesituation (eindeutige vs. uneindeutige Abbiegungen) auf die Fahrerbeanspruchung, das Blickverhalten, die Navigationsleistung und das subjektive Erleben untersucht.

5 Simulatorstudie I: Untersuchung der Effektivität und Beanspruchung von AR-Informationen

5.1 Zielsetzung

Das Ziel der folgenden Simulatorstudie war es, grundlegende Erkenntnisse über das Navigieren mit AR-Informationen zu gewinnen. Im Rahmen dieser Grundlagenstudie wurde untersucht, wie Fahrende mit AR-Informationen interagieren und welche Potentiale AR für das manuelle Navigieren in uneindeutigen Navigationssituationen bietet im Vergleich zu einem HUD.

Aufgrund der positionsgenauen Verortung der AR-Informationen in die Fahrumgebung wird angenommen, dass keine Blickwechsel zwischen den virtuellen Informationen und der realen Fahrsituation notwendig sind (Kim & Dey, 2009). Fahrende können somit auf einen mentalen Abgleich verzichten (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Im Gegensatz dazu, ist das Übertragen der virtuellen HUD-Informationen in die Umwelt nötig, da diese Informationen nicht in der Umwelt verortet sind.

Resultierend wurde im Rahmen dieser Dissertation angenommen, dass das AR Display zu schnelleren und vereinfachten Entscheidungen in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD führt. Der Untersuchungsfokus dieser Grundlagenstudie lag somit auf dem Entscheidungspunkt für die korrekte Abbiegung in uneindeutigen Navigationssituationen (Bauerfeind et al, 2019).

Durch das Wegfallen des mentalen Abgleichs wird in der Literatur außerdem angenommen, dass es folglich zu einer reduzierten mentalen Beanspruchung in Bezug auf das Verstehen und Interpretieren der AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD kommt (Bengler et al., 2015; Israel, 2012; Kim & Dey, 2009; Pauzie, 2015; Pfannmüller, 2017; Pfannmüller et al., 2015a). Somit wird erwartet, dass AR-Informationen Fahrende hinsichtlich visuellen räumlichen Ressourcen weniger beanspruchen als ein HUD (Pfannmüller, 2017). Beansprucht das Navigieren mit einem AR Display (Primäraufgabe) weniger, verfügen die Fahrenden über mehr freie Ressourcen, um weitere Aufgaben, wie eine Nebenaufgabe, besser zu absolvieren (Jahn et al., 2005).

In dieser Dissertation galt es somit zu untersuchen, ob es zu einer Steigerung objektiver Leistungsparameter aufgrund einer reduzierten mentalen Beanspruchung kommt (Bauerfeind et al., 2021). Hierzu gab es bisher wenig Befunde, da Erkenntnisse zur mentalen Beanspruchung auf subjektiven Einschätzungen basieren (Medenica et al., 2011). Jedoch können subjektive Daten anfällig hinsichtlich Verzerrungen und Voreingenommenheit sein. Somit galt es zu untersuchen, ob das Wegfallen des mentalen Abgleichs durch AR-Informationen zu einer reduzierten mentalen Beanspruchung und folglich zu einer gesteigerten Leistung führt (Bauerfeind et al., 2021). Zusätzlich wurde ebenfalls untersucht, ob es zu einem angepassten Fahrverhalten kommt.

Im Folgenden wird die erste Studie, mit dem Ziel die Effektivität und die Beanspruchung von einem AR Display im Vergleich zu einem HUD in uneindeutigen Navigationssituationen zu untersuchen, vorgestellt. Diese wurde in einem statischen Fahrsimulator mit Stereoprojektion durchgeführt. Es wurden uneindeutige Navigationssituationen geschaffen, die in Form von mehreren dicht gelegenen

Abbiegungen umgesetzt waren. Um die Effektivität eines AR Displays systematisch zu untersuchen, wurde eine hohe Standardisierung der Versuchssituationen geschaffen.

Mit dieser Simulatorstudie wurden folgenden Forschungsfragen beantwortet:

- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf den Entscheidungspunkt für die richtige Zielabbiegung in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf die Fahrerbeanspruchung in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf die Erfüllung einer uneindeutigen Navigationsaufgabe (richtige Route finden) im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf das Fahrverhalten in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf das subjektive Erleben in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?

5.2 Methodik¹

Im Folgenden wird die Methodik der Studie 1 (Simulatorstudie) beschrieben.

5.2.1 Fahrstrecken

In der Studie wurden die Versuchspersonen mit Hilfe von Navigationsinformationen durch eine Vorstadt navigiert. Sie fuhren auf geraden Hauptstraßen mit jeweils 13 dicht gelegenen Abbiegungen pro Fahrt. Es handelte es sich um uneindeutige Navigationssituationen, da der Abstand zwischen den Abbiegungen lediglich 40 m betrug. Im Rahmen eines Pre-Tests wurde ein Abstand von 40 m zwischen zwei möglichen Abbiegungen als uneindeutige Navigationssituationen wahrgenommen. An den Abbiegungen befanden sich keine Ampeln. Im Rahmen dieser Grundlagenstudie handelte es sich um kurze Strecken. Jede Fahrt dauerte ca. 1 Minute und 30 Sekunden. Auf der Straße befanden sich keine anderen Verkehrsteilnehmer in Form von Fahrzeugen oder Fußgängern. Die Teilnehmer wurden zu Beginn der Studie auf die Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h innerorts aufmerksam gemacht.

5.2.2 Anzeigearten für die Navigation

In der Studie wurde die Navigationsinformationen sowohl in einem HUD als auch in einem AR Display präsentiert. Tabelle 5.1 zeigt die Navigationsinformationen in beiden Anzeigearten. Das HUD hatte eine wahrgenommene Projektionsdistanz von ca. 2 m vor dem Fahrzeug. Somit schien die Anzeige über der Motorhaube zu schweben. In dieser Studie präsentierte das HUD Navigationsinformationen ab 300 m vor der Zielabbiegung in Form eines blauen Pfeils (Tabelle 5.1 a). Die Richtungsinformation (links oder rechts) wurde den Fahrenden angezeigt, sobald sie die dritte Abbiegung, 80 m vor der

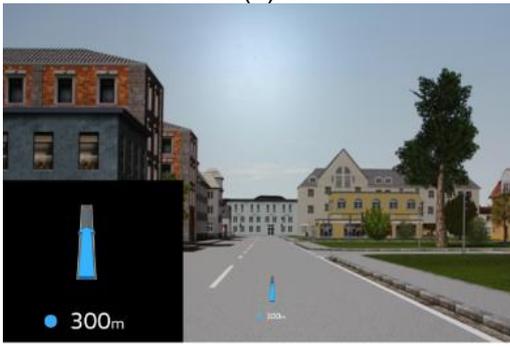
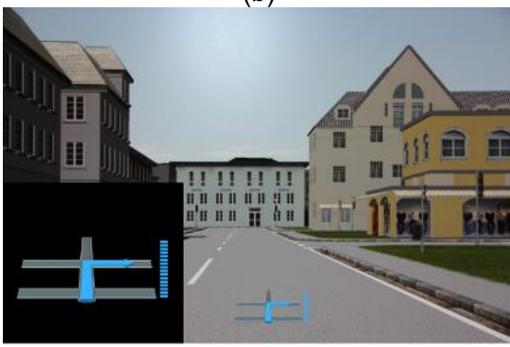
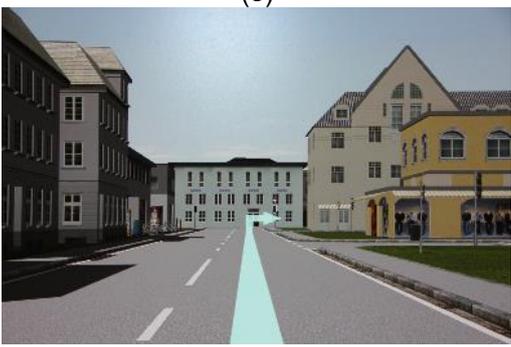
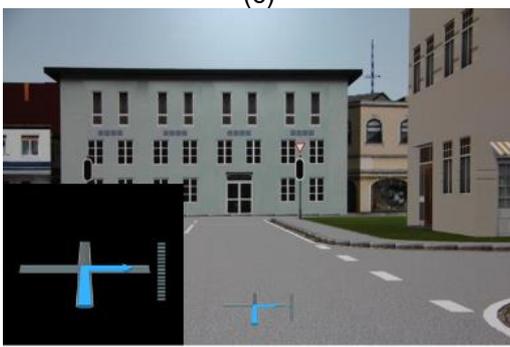
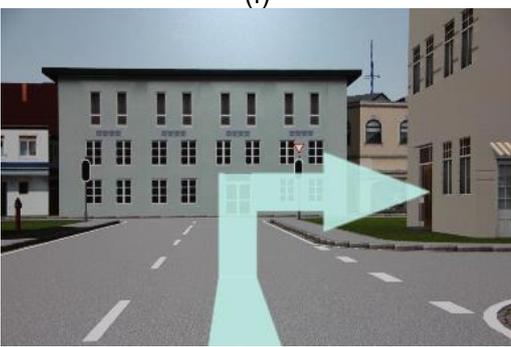
¹ Die Methodik dieser Studie wurde bereits in Bauerfeind et al. (2019) und Bauerfeind et al. (2021) veröffentlicht.

Zielabbiegung, passiert hatte (Tabelle 5.1 b + c). Des Weiteren wurde die verbleibende Distanz rechts neben dem Pfeil in Form einer Balkenanzeige angezeigt. Diese verringerte sich während der Annäherung an die Zielabbiegung.

Im Gegensatz dazu erlebten die Versuchspersonen die augmentierte Anzeige als dreidimensionalen türkisfarbigen Pfeil, der positionsgenau in der Umwelt verortet war (Tabelle 5.1 d-f). Dieser Pfeil wurde ab 300 m vor der Zielabbiegung eingeblendet und lag unverändert auf der Straße, wenn sich die Versuchspersonen der Zielabbiegung näherten. In einem 90°-Winkel ragte er auf Höhe der Zielabbiegung aus der Straße und zeigte in diese.

Im AR Display wurden keine Navigationsinformationen in der Statusleiste (zeigt Informationen am unteren Rand des Fahrerblickfeldes) präsentiert, um die gefundenen Effekte ausschließlich auf AR beziehen zu können und Einflüsse einer HUD-Darstellung zu vermeiden.

Tabelle 5.1: Navigationsinformationen in den Anzeigearten HUD (links) und AR Display (rechts) zu verschiedenen Entfernungen zur Zielabbiegung. Die Informationen im HUD scheinen über der Motorhaube zu schweben. Das AR Display erweckt den Eindruck den Navigationspfeil in die Umwelt zu positionieren. Der AR-Pfeil zeigt in die Zielabbiegung. Reprinted from (Bauerfeind et al., 2021), © 2021, with permission from Elsevier.

Verbleibende Distanz zur Zielabbiegung	HUD	AR Display
300 m	(a) 	(d) 
80 m	(b) 	(e) 
0 m	(c) 	(f) 

Anmerkung. Die schwarze Box in den Bilder (a), (b) und (c) wurde den Fahrenden nicht präsentiert. Sie dient hier lediglich der besseren Erkennbarkeit der HUD-Informationen.

5.2.3 Aufgabe der Versuchspersonen

Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, die richtige Zielabbiegung mit Hilfe der Navigationsinformationen im AR Display bzw. im HUD zu finden. Um den

Entscheidungspunkt für die richtige Zielabbiegung zu erfassen, wurden die Versuchspersonen gebeten die Anzeige auszuschalten, wenn sie sich sicher waren, die richtige Zielabbiegung identifiziert zu haben. Der Versuchsleiter betonte, dass die Aufgabe auf das fehlerfreie Navigieren, nicht auf die Schnelligkeit des Ausschaltens abzielte. Um die Anzeige auszuschalten, drückten sie einen Lenkradknopf (Abbildung 5.1). Anschließend fuhren sie ohne Navigationsinformationen zur Zielabbiegung. Um Ausfälle durch Simulatorübelkeit zu vermeiden, wurden die Versuchspersonen instruiert kurz vor der Abbiegung anzuhalten und somit auf das Lenken zu verzichten. Die Versuchspersonen wurden informiert, ob sie die richtige Zielabbiegung identifiziert hatten. Im Fall eines Navigationsfehlers wurde ihnen die richtige Zielabbiegung nicht gezeigt und die Fahrt wurde am Ende der Fahrten mit der jeweiligen Anzeigeart wiederholt (Dadurch konnten für jede Versuchsperson je Anzeigeart die gleiche Anzahl an Fahrten mit korrekten Navigationsentscheidungen in den Analysen berücksichtigt werden).

Neben der Navigationsaufgabe wurden die Versuchspersonen gebeten eine Nebenaufgabe zu absolvieren. Diese Aufgabe diente dazu die Fahrerbeanspruchung zu erfassen und die Schwierigkeit der Fahraufgabe zu erhöhen. Es handelte sich um eine auditive, kognitive, räumliche Zahlenaufgabe. Dazu hörten die Versuchspersonen positive Zahlen randomisiert von eins bis neun aus zwei Lautsprechern. Ein Lautsprecher befand sich vor und ein weiterer hinter dem Mockup. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es jede Zahl zu bewerten. Dabei sollten die Versuchspersonen mit „richtig“ antworten, wenn es sich um gerade Zahlen aus dem vorderen oder um ungerade Zahlen aus dem hinteren Lautsprecher handelte. Die Versuchspersonen sollten mit „falsch“ antworten, wenn sie ungerade Zahlen aus dem vorderen und gerade Zahlen aus dem hinteren Lautsprecher hörten. Das Intervall der gesagten Zahlen betrug zwei Sekunden.



Abbildung 5.1: Lenkradtaste für die Nebenaufgabe - Der rote Punkt markiert die Lenkradtaste, die für das Ausschalten der Anzeige zur Erfassung des Entscheidungspunktes gedrückt werden musste (modifiziert nach Bauerfeind et al., 2019, Rechte bei den Autoren).

5.2.4 Stichprobe

An der Fahrsimulatorstudie nahmen insgesamt 61 Versuchspersonen teil. Aufgrund von Simulatorübelkeit und fehlender 3D-Sicht, konnten 59 Versuchspersonen ausgewertet werden (davon 18 Frauen). Durchschnittlich waren die Versuchspersonen 37.1 Jahre ($SD = 11.1$ Jahre) alt und fuhren 18274.7 km im vergangenen Jahr ($SD = 11368.9$ km). Sie gaben an, den Führerschein durchschnittlich seit 19 Jahren ($SD = 10.78$ Jahren) zu besitzen. 58% der Versuchspersonen trugen eine Sehhilfe oder benutzten Kontaktlinsen. Eine Versuchsperson gab an, an einer Rechts-Links-Schwäche zu leiden. 44% der Versuchspersonen hatten Erfahrung mit einem HUD, wobei die Mehrheit angab dieses nur

selten zu nutzen. Vor den Versuchsfahrten absolvierten die Versuchspersonen Übungsfahrten im Simulator. Die Versuchspersonen wurden vom Probandenpool der Group Innovation der Volkswagen AG rekrutiert und erhielten für ihre Teilnahme ein Geschenk.

5.2.5 Untersuchungsdesign

Für diese Fahrsimulatorstudie wurden die Ethik Standards der American Psychological Association (APA, Ethical Principles of Psychologists and Code of Conduct, 2017) strikt befolgt. Der Fahrsimulatorstudie liegt ein within-subjects Design mit der unabhängigen Variable Anzeigeart (AR Display vs. HUD) zu Grunde (Abbildung 5.2). Die Hälfte der Versuchspersonen starteten mit dem AR Display und führen anschließend mit dem HUD. Die andere Hälfte der Versuchspersonen startete mit dem HUD. Die sieben Fahrten je Anzeigeart unterschieden sich hinsichtlich der Zielabbiegung in den uneindeutigen Navigationssituationen und wurden randomisiert gefahren.

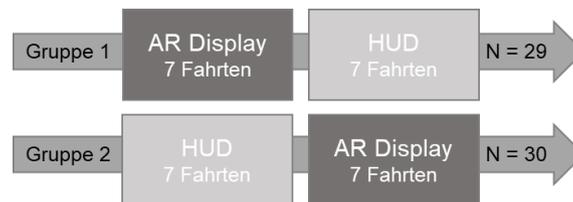


Abbildung 5.2: Within-subjects Design der Studie 1.

Die Tabelle 5.2 zeigt die Daten, die im Rahmen dieser Fahrsimulatorstudie erfasst wurden: (1) der Entscheidungspunkt, (2) die Fahrerbeanspruchung, (3) die Fahrleistung und (4) das subjektive Erleben.

Tabelle 5.2: Überblick über die erfassten Daten der Studie 1.

Datenbezeichnung	Art der Daten	Erklärung
Entscheidungspunkt	Abschalten der Anzeige	verbleibende Entfernung [m] zur Zielabbiegung bei Abschalten der Navigationsanzeige zur Erfassung des Entscheidungspunkts für die richtige Zielabbiegung
Fahrerbeanspruchung	Leistung in Nebenaufgabe	Antwortzeit [s] der Identifikation richtiger/falscher Kombinationen von auditiv gehörten Zahlen und Lautsprecherpositionen und Quote der richtigen Antworten [%] zur Erfassung der objektiven mentalen Beanspruchung
Fahrleistung	Navigationsfehler	Anzahl der falsch identifizierten Zielabbiegungen in der Navigationsaufgabe
	Lösen des Gaspedals	verbleibende Entfernung [m] zur Zielabbiegung bei Lösen des Gaspedals zur Erfassung der ersten Aktion für den bevorstehenden Stopp
	Geschwindigkeitsverlauf	Geschwindigkeitsverlauf [km/h] bei Annäherung an die Zielabbiegung zur Erfassung eines Kompensationsverhaltens
subjektives Erleben	subjektive Bewertung	Fragebogen nach Fahrten mit jeweiliger Anzeigeart: <ul style="list-style-type: none"> - Anzeigebewertung - Fahrtbewertung - Bewertung der Nebenaufgabe persönliche Angaben vor der Studie: <ul style="list-style-type: none"> - Fragen zur Demographie Abschlussbefragung am Ende der Studie: <ul style="list-style-type: none"> - Anzeigepräferenz

Der Entscheidungspunkt wurde durch den Moment des Abschaltens der Navigationsanzeige ermittelt. Es handelt sich um die verbleibende Distanz in Metern zur Zielabbiegung bei Abschalten der Navigationsanzeige.

Als objektives Maß der Fahrerbeanspruchung wurde in dieser Studie die Antwortzeit auf eine auditive, kognitive, räumliche Nebenaufgabe ermittelt. Ausgewertet wurde außerdem, ob die Antworten der Versuchspersonen auf die auditiv gehörten Zahlen korrekt waren. Die Leistung in der Nebenaufgabe deutet auf Beanspruchungsänderungen in der Primäraufgabe (hier Navigieren mit der Anzeige) hin (Jahn et al., 2005). Dabei ist die Leistung in der Nebenaufgabe invers proportional zur Leistung in der Primäraufgabe (Jahn et al., 2005): Je beanspruchender die Primäraufgabe, desto schlechter ist die Leistung in der Nebenaufgabe. Dagegen können Fahrende auf mehr freie Ressourcen zurückgreifen, um die Nebenaufgabe besser zu absolvieren, wenn die Primäraufgabe weniger beanspruchend ist. Vorausgesetzt wird jedoch, dass die Nebenaufgabe für die Primäraufgabe geeignet ist. Dabei sollten sich die Primäraufgabe und die Nebenaufgabe zu dem Ausmaß überlagern, dass eine Erhöhung der Schwierigkeit der Primäraufgabe ein Leistungsabfall in der Nebenaufgabe bewirkt. Jedoch sollte die Nebenaufgabe nicht so schwierig sein, dass es zu einer starken Beeinträchtigung der Primäraufgabe kommt. Da es sich bei der Primäraufgabe, dem Navigieren, um eine räumliche Aufgabe handelt, wurde abgeleitet, dass als Nebenaufgabe eine räumliche Verortungsaufgabe gewählt werden musste. Somit wurden die Fahrenden

auf dem gleichen Verarbeitungskanal beansprucht (Wickens, 2002). Dazu wurden Zahlen aus Lautsprechern mit verschiedenen räumlichen Positionen (vor und hinter dem Mockup) abgespielt. Jedoch muss angemerkt werden, dass die Navigationsaufgabe auch eine Aufgabe der visuellen Aufmerksamkeit ist, wohingegen es sich bei der Nebenaufgabe um eine auditive Aufgabe mit mündlicher Antwort handelt. Die mündliche Antwort lässt die Nebenaufgabe realistischer erscheinen, da sie mit einem Gespräch mit dem Beifahrer bzw. der Beifahrerin vergleichbar ist. Um die Beanspruchung während der gesamten Annäherung an die Zielabbiegung durchgehend zu messen, handelte es sich bei der Nebenaufgabe um eine kontinuierliche Aufgabe.

Es wurde sich für eine mündliche Antwort entschieden, da die Versuchspersonen manuell fahren und schon für den Entscheidungspunkt einen Knopf manuell drücken mussten. Die Leistung in dieser Nebenaufgabe wurde im Bereich 120 m vor der Zielabbiegung bis zum individuellen Entscheidungspunkt ausgewertet. Dies basiert auf der Annahme, dass die Beanspruchung der Fahrenden nach dem Entscheidungspunkt wieder abnimmt und damit einhergehend auch die Antwortzeit. Unter Berücksichtigung des Entscheidungspunktes wurde sich für den Startpunkt der Analyse von 120 m vor der Zielabbiegung entschieden (Abbildung 5.3).

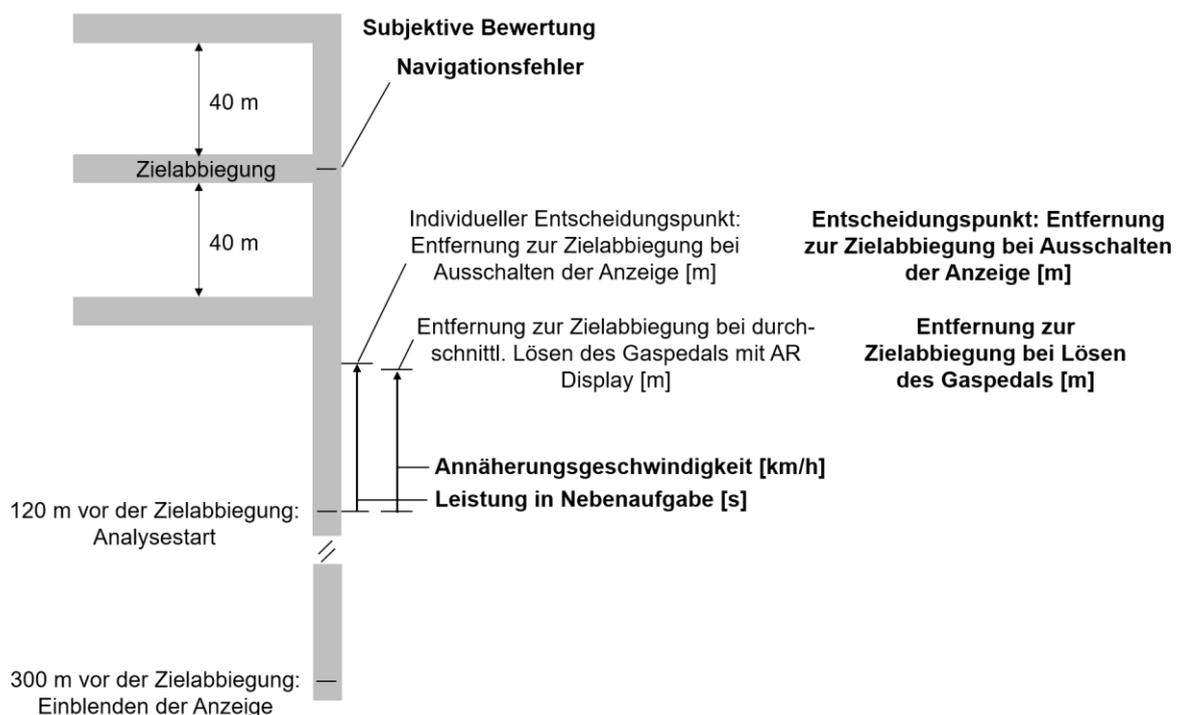


Abbildung 5.3: Exemplarische Darstellung der Annäherung an die Zielkreuzung am Ende jeder Versuchsfahrt mit den abhängigen Variablen der Studie 1 (abhängige Variablen sind in Fett markiert). Modified and reprinted from (Bauerfeind et al., 2021), © 2021, with permission from Elsevier.

Die Analyse der Fahrleistung umfasst die Navigationsfehler, die Distanz zur Zielabbiegung bei Lösen des Gaspedals und die Annäherungsgeschwindigkeit zur Zielabbiegung. Die Navigationsfehler wurden erhoben, um die Effektivität der Anzeige zu untersuchen. Sie sind das Maß der Navigationsleistung und geben Aufschluss über die falsche Identifizierung der richtigen Zielabbiegung. Nach Abschluss der geplanten sieben Fahrten je Anzeigertyp

wurden fehlerhafte Fahrten wiederholt. Die Versuchspersonen hatten für jede fehlerhafte Fahrt bis zu drei Versuche diese fehlerfrei zu absolvieren.

Das Lösen des Gaspedals vor der Zielabbiegung wird als erste Aktion für den bevorstehenden Stopp angesehen. Ermittelt wurde die Distanz zur Zielabbiegung bei Lösen des Gaspedals für beide Anzeigearten. Es wurde sich dazu entschieden, das Lösen des Gaspedals anstelle der ersten Bremsung zu betrachten, da das Lösen des Gaspedals vor dem Betätigen des Bremspedals geschieht und somit das erste Indiz für eine geplante Geschwindigkeitsreduktion darstellt.

Im Rahmen der Analyse der Fahrleistung wurde ebenfalls die Annäherungsgeschwindigkeit zur Zielabbiegung analysiert. Eine reduzierte Geschwindigkeit kann Hinweise auf ein Kompensationsverhalten geben, um Zeit für die Entscheidung in der uneindeutigen Navigationssituation zu gewinnen. Analysiert wurde der Bereich 120 m vor der Zielabbiegung (basiert auf den Ergebnissen des Entscheidungspunktes) bis zum durchschnittlichen Lösen des Gaspedals mit dem AR Display. Wie oben beschrieben, zählt das Lösen des Gaspedals als erste Aktion für den bevorstehenden Stopp. Es führte zu einer reduzierten Geschwindigkeit, die nicht mehr als Annäherungsgeschwindigkeit zählte. Da das Gaspedal mit dem AR Display durchschnittlich früher gelöst wurde als mit dem HUD, wurde das durchschnittliche Lösen des Gaspedals mit dem AR Display als Analyseendpunkt der Annäherungsgeschwindigkeit für alle Fahrten gewählt.

Neben den objektiven Daten wurden ebenfalls subjektive Daten zur Anzeige- und Fahrtbewertung erhoben (Anhang: Fragebögen Studie 1). Die Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über die verschiedenen Fragebögen und den jeweiligen Items. Der Versuchsleiter führte Interviews mit geschlossenen und offenen Fragen durch. Die geschlossenen Fragen wurden mit einer 15-Punkte Kategorienunterteilungsskala beantwortet (Heller, 1982) (Abbildung 5.4).

Tabelle 5.3: Art und Zeitpunkt der Fragebögen mit den Items der Studie 1.

Art und Zeitpunkt des Fragebogens	Kategorie	Items
Fragebogen vor den Versuchsfahrten	Demographie	<ul style="list-style-type: none"> - Geschlecht - Alter - gefahrene Kilometer im letzten Jahr - Führerschein erworben - Sehhilfe - Rechts-Links-Schwäche - Erfahrung mit HUD
	Befinden	<ul style="list-style-type: none"> - momentane Anspannung - momentane Aktivität - momentane positive Stimmung - momentane Leistungsfähigkeit - momentane nach außen Gerichtetheit
Fragebogen nach den Versuchsfahrten mit jeweiliger Anzeigeart	Anzeigebewertung	<ul style="list-style-type: none"> - allgemeines Gefallen der Anzeige - Nutzen (Entlastung, Nützlichkeit, Eignung, Ablenkung) - die Funktionalität (Verständlichkeit, Bewertung der Balkenanzeige (HUD) / Balkenanzeige erwünscht (AR Display)) - persönliche Meinung (angenehmes Fahren) - Anzeigegestaltung (Gefallen)
	Fahrtbewertung	<ul style="list-style-type: none"> - Schwierigkeit der Fahraufgabe - Anstrengung der Fahraufgabe
	Bewertung der Nebenaufgabe	<ul style="list-style-type: none"> - Schwierigkeit der Nebenaufgabe - Anstrengung der Nebenaufgabe
Abschlussbefragung	Anzeigepräferenz	<ul style="list-style-type: none"> - gewünschte Anzeige im eigenen Fahrzeug
	Befinden	<ul style="list-style-type: none"> - s.o.

Die Anzeigen wurden hinsichtlich des allgemeinen Gefallens und des Nutzens (Nützlichkeit, Eignung, Entlastung, Ablenkung) bewertet. Außerdem wurde die Funktionalität erhoben, die sich auf die Verständlichkeit der Anzeige bezieht. Im Rahmen der Funktionalität wurde des Weiteren die Bewertung der Balkenanzeige des HUDs erhoben bzw. erfasst, ob eine Balkenanzeige für das AR Display erwünscht ist. Es wurde die Bewertung der Anzeigegestaltung und der persönlichen Meinung (angenehmes Fahren) erfasst. Des Weiteren wurde die Schwierigkeit und die Anstrengung der Nebenaufgabe beurteilt. Die Fahraufgabe (Navigationsaufgabe + Nebenaufgabe) wurde ebenfalls hinsichtlich der Schwierigkeit und der Anstrengung bewertet. Die offenen Fragen ergaben keinen Mehrwert zu den geschlossenen Items und werden hier nicht aufgeführt.

Vor und nach dem Versuch wurde das Befinden für einen Prä-Post-Vergleich erhoben, der der Kontrolle des Versuchsleiters hinsichtlich des Wohlbefindens der Versuchspersonen diente (der Fragebogen wurde von Professor Mark Vollrath entwickelt). Vor Studienstart wurde ein Farbttest zur Identifikation einer Rot-Grün-Sehschwäche (Anhang: Farbttest) und

ein Test zum stereoskopischen Sehen (The Butterfly Stereo Acuity Test with Lea Symbols®, 2007) absolviert. Fragen zur Demographie umfassten das Alter, das Geschlecht, wann der Führerschein erworben wurde, die gefahrenen Kilometer im letzten Jahr, das Tragen einer Sehhilfe und das Vorhandensein einer Rechts-Links-Schwäche. Die bisherige Erfahrung mit HUDs wurde ebenfalls erfasst. Am Ende der Studie wurde die Präferenz hinsichtlich der Anzeigeart erfragt.

Sehr wenig nützlich			wenig nützlich			mittel			nützlich			sehr nützlich		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Abbildung 5.4: 15-Punkte Kategorienunterteilungsskala, angelehnt an Heller (1982) am Beispiel: „Wie nützlich empfanden Sie die Anzeige für die Navigationsaufgabe?“ (Bauerfeind et al., 2019)

5.2.6 Fahrsimulator

Für die Studie wurde ein statischer Fahrsimulator mit Mockup von der Volkswagen Group Innovation (Abbildung 5.5) genutzt. Die Sitzkiste bestand aus einer angedeuteten Motorhaube, dem Fahrersitz, einem Lenkrad und der Pedalerie. Es handelte sich um ein Automatikgetriebe. Die Drehzahl und die Geschwindigkeit wurde über das Kombi-Display angezeigt. Fahrgeräusche relativ zur Beschleunigung dienten dem realitätsnahen Erleben einer Fahrsituation. Für die Studie wurde eine Leinwand verwendet, die 3.8 m vor dem Mockup stand. Die Breite der Leinwand betrug 3.8 m mit einer Auflösung von 1920 x 1200 Pixeln. Es wurde ein Blickfeld von 56° abgedeckt. Die Simulationsstrecken wurden mit der Simulationssoftware Virtual Test Drive (VTD, Hexagon AB, 2021a) erstellt. Das HUD und das AR Display wurden mit der Software UNITY realisiert. In dieser Studie handelte es sich um eine Stereoprojektion, die zusätzliche Tiefeninformationen der virtuellen Fahrumgebung sowie der Anzeigen ermöglichte. Dafür wurden dem rechten und dem linken Auge leicht unterschiedliche Bilder, entsprechend der Blickwinkel auf die Situation, präsentiert. In Kombination mit einer Stereobrille (Abbildung 5.5 links) entstand ein Tiefeneindruck. Durch die stereoskopische Darstellung schienen die AR-Informationen positionsgenau in der Welt verortet zu sein.

Die randomisierten Zahlen wurden über den ADTF Fahrsimulator abgespielt. Dafür wurden zwei Lautsprecher, einer vor und ein weiterer hinter dem Mockup, positioniert. Die Dateneingabe erfolgte über ein Mikrophon rechts vor der Versuchsperson (Abbildung 5.5 rechts). Sie wurden mit der Software D-Lab (Ergoneers GmbH, 2022a) aufgenommen.

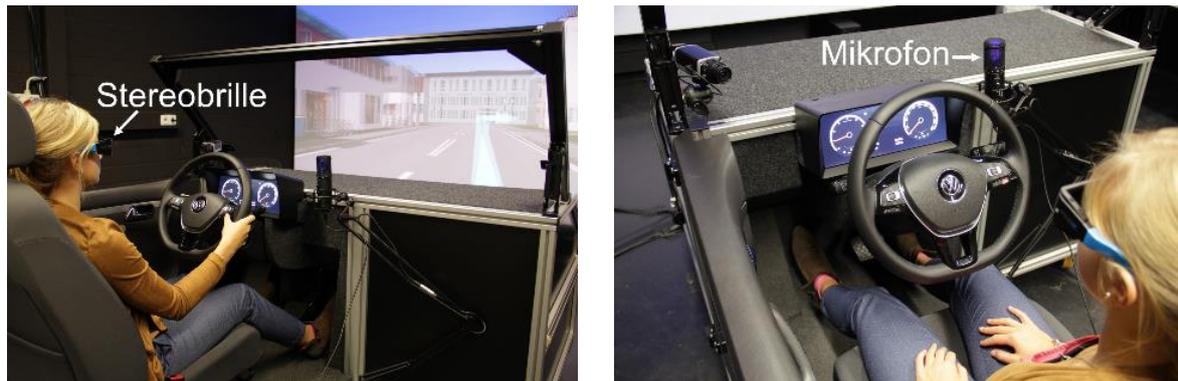


Abbildung 5.5: Bilder vom Versuchsaufbau der Studie 1. Statische Sitzkiste der Group Innovation der Volkswagen AG mit einer Leinwand. Der AR-Pfeil erscheint doppelt, da es sich um eine stereoskopische Untersuchung handelte. Mit Hilfe einer Stereobrille erschien die Anzeige in 3D (Links). Blick ins Cockpit, Mikrofon zur Erfassung der Antworten für die Nebenaufgabe (Rechts).

5.2.7 *Versuchsablauf*

Die Versuchspersonen wurden zur Studie begrüßt und informiert, dass der Versuch ungefähr zwei Stunden dauern wird. Anschließend unterschrieben sie die Datenschutzerklärung. Nachdem die Versuchspersonen sowohl einen Farbttest zur Identifikation einer Rot-Grün-Sehschwäche als auch einen Test zum stereoskopischen Sehen (The Butterfly Stereo Acuity Test with Lea Symbols®, 2007) absolviert hatten, nahmen sie in der Sitzkiste Platz. Mit einer kurzen Vorbefragung wurden persönliche Daten sowie Angaben über das eigene Fahrverhalten erhoben. Um die Simulation als 3D-Welt zu erleben, setzten sich die Versuchspersonen eine Shutterbrille auf, die auch über der eigenen Brille getragen werden konnte. Es folgte die Erklärung der primären Fahraufgabe: Das Identifizieren der Zielabbiegung mit Hilfe von Navigationshinweisen über eine Anzeige. Die beiden Anzeigearten, HUD und AR Display wurden den Versuchspersonen mit Bildmaterial gezeigt und erklärt. Des Weiteren wurden die Versuchspersonen gebeten, die Anzeige auszuschalten, sobald sie sich der Zielabbiegung sicher waren. Den Versuchspersonen wurde der Knopf am Lenkrad für das Ausschalten der Anzeige gezeigt. Es folgten Übungsfahrten mit beiden Anzeigearten bis die Versuchspersonen beide Anzeigen verstanden und die Zielabbiegungen in den Übungsfahrten richtig identifizieren konnten. Im nächsten Schritt wurden die Versuchspersonen mit der Nebenaufgabe vertraut gemacht. Diese wurde ohne und im Anschluss mit der primären Fahraufgabe trainiert. Für die nachfolgenden Versuchsfahrten wurde die Reihenfolge der beiden Blöcke (7 Fahrten mit dem HUD und 7 Fahrten mit dem AR Display) sowie die Reihenfolge der einzelnen Fahrten je Anzeigearart randomisiert. Im Fall eines Navigationsfehlers während der Hauptfahrten, wurde die Fahrt am Ende des spezifischen Blocks wiederholt. Nach den Fahrten mit der jeweiligen Anzeigearart wurde ein ausführliches Interview durchgeführt. Für die Beantwortung nutzten die Versuchspersonen eine 15er Skala, die sie auf einem ausgedruckten Blatt zur Verfügung gestellt bekamen. Nachdem die Versuchspersonen als Dankeschön ein Geschenk erhalten hatten, wurden sie verabschiedet. Der Versuch dauert jeweils 130 Minuten pro Versuchsperson.

5.3 Ergebnisse²

5.3.1 Datenaufbereitung und –auswertung

Im Folgenden wird das Vorgehen der Analysen der einzelnen Daten beschrieben. Technische Probleme führten zu reduzierten Datensätzen in einzelnen Analysen. Fahrten mit inkorrekten Navigationsentscheidungen wurden von den Analysen ausgeschlossen, jedoch bei der Zählung der Navigationsfehler berücksichtigt. Für die interferenzstatistische Auswertung wurde ein Signifikanzniveau von 5% angenommen.

In die Analyse des Entscheidungspunktes flossen die jeweils letzten drei der insgesamt sieben Fahrten pro Anzeigeart ($N = 57$) ein. Somit konnte sichergestellt werden, dass die Aufgabe des Abschaltens bei Identifikation der richtigen Zielabbiegung bekannt und ausreichend trainiert war. Mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests wurde festgestellt, dass die Verteilung der Daten einer Normalverteilung entspricht. Die interferenzstatistische Analyse beruht auf einem t -Test für abhängige Stichproben. Die Effektstärke r wurde berechnet. Die Analyse wurde mit der Software IBM SPSS Statistics 19 durchgeführt.

In der Analyse der Fahrerbeanspruchung konnten Datensätze von 59 Versuchspersonen berücksichtigt werden. Aufgrund von technischen Problemen konnten 697 Fahrten analysiert werden. Für die Datenaufbereitung wurde eine Software zur Stimmerkennung in R Studio programmiert, um die Startpunkte der Antworten der Versuchspersonen zu extrahieren. Anschließend wurden die Antworten der Versuchspersonen („richtig“/„falsch“) annotiert. Folgend wurde mit der Software R Studio ausgewertet, ob die Antworten der Versuchspersonen korrekt oder inkorrekt (falsche Zuordnung oder nicht beantwortet) waren [%]. Für die interferenzstatistische Auswertung wurden hierarchisch lineare Modelle mit maximaler Random-Effects-Struktur und Modelle mit reduzierter Random-Effects-Struktur hinsichtlich AIC-Werte verglichen (Barr et al., 2013). Das Modell mit dem kleinsten AIC-Wert beschreibt die Daten am besten und wurde somit für die Analyse herangezogen. Berechnet wurde ein hierarchisch lineares Modell mit variierendem Achsenabschnitt und variierender Steigung für die mittlere Antwortzeit [s] als abhängige Variable. Als Faktoren flossen die Anzeigeart (AR Display vs. HUD) und die verbleibende Distanz zur Zielabbiegung [m] in die Analyse ein. Modelliert wurden außerdem die Unterschiede zwischen den Versuchspersonen (beliebiger Achsenabschnitt/random intercept, beliebige Steigung/random slope). Konfidenzintervalle wurden berechnet. Die Analyse wurde mit der Software R Studio durchgeführt.

Die Analyse der Fahrleistung umfasst die Navigationsfehler, die Distanz zur Zielabbiegung bei Lösen des Gaspedals [m] und die Annäherungsgeschwindigkeit zu der Zielabbiegung [km/h]. Für die Analyse der Navigationsfehler wurde ein Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test mit der Software IBM SPSS Statistics 19 durchgeführt ($N = 59$). Die Effektstärke r wurde berechnet.

² Die Ergebnisse der Analyse des Entscheidungspunktes, der Navigationsfehler und der subjektiven Bewertung der Anzeigeart (Gefällen der Anzeige, angenehmes Fahren mit der Anzeige, Verständlichkeit der Anzeige, Entlastung durch die Anzeige, Nützlichkeit der Anzeige und Eignung der Anzeige für die Navigationsaufgabe) wurden bereits in Bauerfeind et al. (2019) veröffentlicht. In Bauerfeind et al. (2021) wurden bereits die Ergebnisse der Fahrerbeanspruchung, der Distanz zur Zielabbiegung bei Lösen des Gaspedals, der Annäherungsgeschwindigkeit an die Zielabbiegung und der subjektiven Bewertung der Fahraufgabe und der Nebenaufgabe (Schwierigkeit und Anstrengung) veröffentlicht.

Mit dieser Software wurde ebenfalls die Analyse der Distanz zur Zielabbiegung bei Lösen des Gaspedals [m] berechnet. Es konnte ein t -Test für abhängige Stichproben durchgeführt werden, da eine Normalverteilung gegeben war ($N = 59$).

Für die Auswertung der Annäherungsgeschwindigkeit zu der Zielabbiegung [km/h] wurde ein hierarchisch lineares Modell mit variierendem Achsenabschnitt und variierender Steigung für die mittlere Geschwindigkeit [km/h] als abhängige Variable aufgestellt ($N = 59$). Als Faktor wurde die Anzeigart (AR Display vs. HUD) in der Analyse berücksichtigt. Außerdem wurden die Unterschiede zwischen den Versuchspersonen modelliert (beliebiger Achsenabschnitt/random intercept). Konfidenzintervalle wurden berechnet. Die Analyse wurde mit der Software R Studio durchgeführt.

Die subjektiven Daten wurden mit repeated measures Analysis of Variance (rmANOVA) mit dem Faktor Anzeigart (HUD vs. AR Display) und dem Zwischensubjektfaktor Reihenfolge der Anzeigart (beginnend mit dem HUD vs. beginnend mit dem AR Display) ausgewertet ($N = 59$). Die varianzstatistische Analyse wird als robust gegenüber Verletzungen der Normalverteilung angesehen (Blanca et al., 2017; Schmider, et al., 2010). Durch die Antwortformate konnte von einer Intervallskalierung ausgegangen werden. Das partielle Eta-Quadrat wurde berechnet. Die Analyse wurde mit der Software IBM SPSS Statistics 19 durchgeführt.

5.3.2 Entscheidungspunkt für die richtige Zielabbiegung

Die Abbildung 5.6 verdeutlicht, dass die Versuchspersonen das AR Display im Durchschnitt 69.45 m ($SD = 21.42$ m) vor der Zielabbiegung ausschalteten. Das HUD wurde signifikant später, bei 39.92 m ($SD = 13.19$ m) vor der Zielabbiegung und somit näher an dieser, ausgeschaltet ($t(56) = -13.71, p < .001, r = .88$).

Distanz des Entscheidungspunktes zur Zielabbiegung

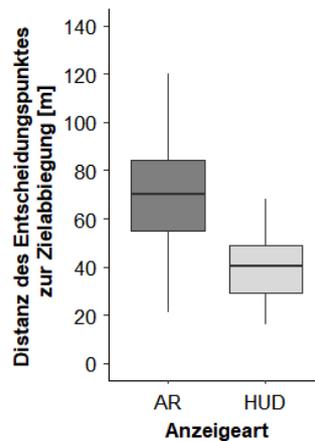


Abbildung 5.6: Boxplots der Entscheidungspunkte für die richtige Zielabbiegung mit dem AR Display und dem HUD (N = 57) (Bauerfeind et al., 2019).

5.3.3 Fahrerbeanspruchung

Die Abbildung 5.7 zeigt die linearen Verläufe aller vorhergesagten Antwortzeiten auf die auditive, kognitive, räumliche Nebenaufgabe aller Versuchspersonen während der Annäherung an die Zielabbiegung mit dem AR Display (links) und dem HUD (rechts). Die einzelnen Linien präsentieren alle Fahrten einer Versuchsperson je Anzeigart. Die dargestellten Linien variieren in ihrer Länge, weil die individuellen Entscheidungspunkte (Kapitel 5.3.2) die jeweiligen Endpunkte darstellen. Die schwarzen Linien zeigen die vorhergesagten mittleren Antwortzeiten für die jeweilige Anzeigart.

Mit dem AR Display nahmen die Antwortzeiten der Versuchspersonen geringfügig zu, als sie sich ihrem individuellen Entscheidungspunkt für die Zielabbiegung näherten. Somit zeigte sich mit dem AR Display ein annähernd konstantes Antwortverhalten. Im Gegensatz zu dem AR Display, nehmen die vorhergesagten mittleren Antwortzeiten mit dem HUD konstant zu während der Annäherung an die Zielabbiegung. Je näher sich die Versuchspersonen mit dem HUD der Zielabbiegung näherten, desto langsamer beantworteten sie die Nebenaufgabe ($t = 4.19, p < .001$, Tabelle 5.4).

Das hierarchisch lineare Modell prognostiziert einen signifikanten Unterschied in den Antwortzeiten zwischen dem AR Display und dem HUD zum Zeitpunkt der Zielerreichung (Distanz zur Zielabbiegung = 0 m). Mit dem AR Display werden die Versuchspersonen bei Zielerreichung durchschnittlich nach 1.35s antworten, wohingegen sie mit dem HUD durchschnittlich 1.66 s benötigen ($t = 4.11, p < .001$) und somit 0.31s langsamer sind (Tabelle 5.4).

Die Daten zeigten des Weiteren, dass die Versuchspersonen mit dem AR Display 78.1 % aller Zahlenaufgaben richtig beantworteten, wohingegen es mit dem HUD 66.8 % waren.

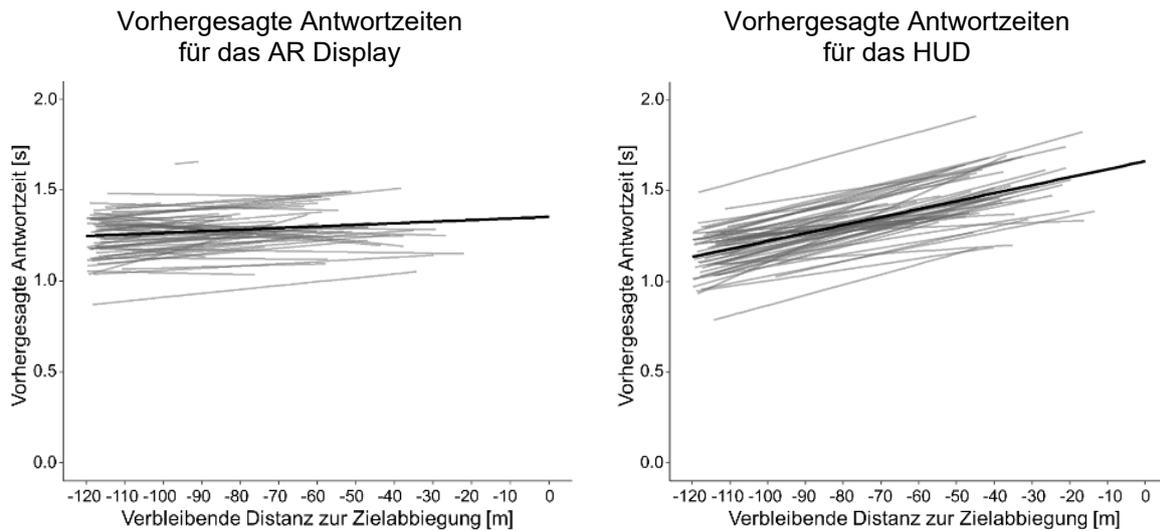


Abbildung 5.7: Lineare Verläufe aller vorhergesagten Antwortzeiten der NDRT in Sekunden ($N = 59$) mit dem AR Display (links) und dem HUD (rechts) während der Annäherung an die Zielabbiegung (0 m). Die einzelnen Linien präsentieren alle Fahrten einer Versuchsperson getrennt nach der Anzeigeart. Startpunkt der Analyse waren 120 m vor der Zielabbiegung. Endpunkt der Analyse war der individuelle Entscheidungspunkt für die Zielabbiegung. Die schwarzen Linien repräsentieren die jeweiligen vorhergesagten mittleren Antwortzeiten. Reprinted from (Bauerfeind et al., 2021), © 2021, with permission from Elsevier.

Tabelle 5.4: Hierarchisch lineares Modell für die vorhergesagten mittleren Antwortzeiten [s] als abhängige Variable (gewählte Effekte). Unterschiede zwischen Versuchspersonen wurden ebenfalls modelliert (beliebige Effekte). Die vorhergesagten mittleren Antwortzeiten beziehen sich auf den Zeitpunkt der Zielerreichung. Reprinted from (Bauerfeind et al., 2021), © 2021, with permission from Elsevier.

Maße	Schätzung [s]	SE	t	p	95% KI	
					niedrig	hoch
Gewählte Effekte (fixed effects)						
AR Display bei Zielabiegung (0 m) (Achsenabschnitt/ intercept)	1.35	0.07	18.59	< .001	1.21	1.50
HUD	0.31	0.08	4.11	< .001	0.16	0.46
Distanz zur Zielabiegung [m]	0.0009	0.0008	1.14	> .10	-0.0006	0.002
HUD * Distanz zur Zielabiegung [m]	0.004	0.0008	4.19	< .001	0.002	0.005
Beliebige Effekte (random effects)						
	Schätzung [s]	SD				
AR Display bei Zielabiegung (0 m) (Achsenabschnitt/ intercept)	0.07	0.26				
Distanz zur Zielabiegung [m]	0.000006	0.003				
Residuen	0.13	0.36				

Anmerkung. N = 59, SE = Standardfehler, SD = Standardabweichung, $R^2_{\text{marginal}} = 0.05$, $R^2_{\text{conditional}} = 0.19$, Ergebnisse für HUD, Distanz zur Zielabiegung und Interaktion werden durch eine Addition mit dem Achsenabschnitt (intercept) berechnet.

5.3.4 Fahrleistung

Die Analyse der Fahrleistung umfasst die Navigationsfehler, die Annäherungsgeschwindigkeit an die Zielabiegung und das Lösen des Gaspedals, das als erste Aktion für den bevorstehenden Stopp zählt.

Wie in der Abbildung 5.8 der Navigationsfehler zu erkennen ist, machten die Versuchspersonen signifikant weniger Fehler ($z = -4.24$, $p < .001$, $r = -.39$) mit dem AR Display ($Mdn = 0.00$) als mit einem HUD ($Mdn = 0.00$). 53 Versuchspersonen machten keinen Navigationsfehler als sie mit dem AR Display fuhren, wohingegen mit dem HUD 31 Versuchspersonen fehlerlos fuhren. Ferner wurde mit dem AR Display niemals mehr als ein Fehler verursacht.

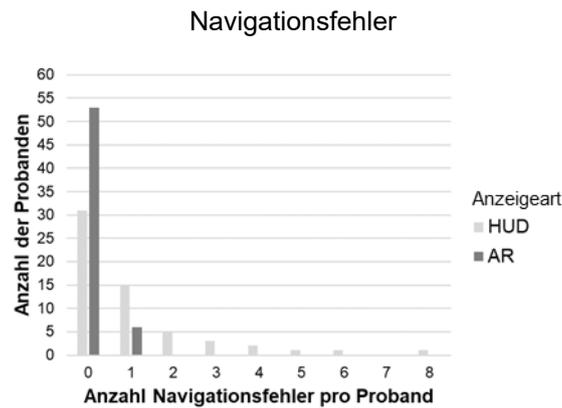


Abbildung 5.8: Anzahl der Navigationsfehler (falsche Zielabbiegung identifiziert) aller Versuchspersonen ($N = 59$) (Bauerfeind et al., 2019).

Für das Lösen des Gaspedals zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Anzeigearten hinsichtlich der Distanz zur Zielabbiegung ($t(58) = 6.37, p < .001, r = .64$). Mit dem AR Display nahmen die Versuchspersonen 70.2 m ($SD = 15.6$ m) vor der Zielabbiegung den Fuß vom Gas, wohingegen dies mit einem HUD durchschnittlich 59.3 m ($SD = 10.3$ m) vor der Zielabbiegung erfolgte (Abbildung 5.9).

Distanz zur Zielabbiegung bei Lösen des Gaspedals

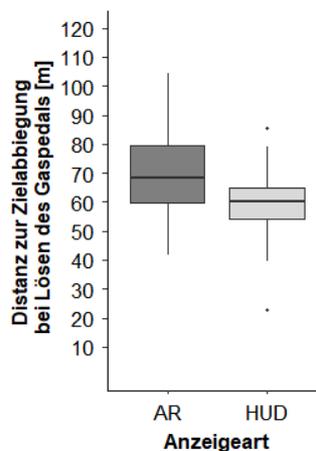


Abbildung 5.9: Boxplots der Distanz zur Zielabbiegung für das Lösen des Gaspedals mit dem AR Display und dem HUD ($N = 59$). Reprinted from (Bauerfeind et al., 2021), © 2021, with permission from Elsevier.

Die Abbildung 5.10 zeigt die Annäherungsgeschwindigkeit an die Zielabbiegung mit dem AR Display und dem HUD. Mit beiden Anzeigearten zeigten die Versuchspersonen einen gleichmäßigen Geschwindigkeitsverlauf. Im Hinblick auf die Unterschiede zwischen den Anzeigearten wird deutlich, dass mit dem HUD signifikant langsamer gefahren wurde als mit dem AR Display (Abbildung 5.10, Tabelle 5.5). 120 m vor der Zielabbiegung führen die Versuchspersonen mit dem AR Display durchschnittlich 52.26 km/h (Tabelle 5.5), wohingegen sie mit dem HUD durchschnittlich 49.35 km/h fahren ($t = -70.23, p < .001$) und somit 2.91 km/h langsamer waren (Tabelle 5.5). Des Weiteren zeigte das hierarchisch lineare Modell einen signifikanten Unterschied im Beschleunigungsverhalten zwischen den

beiden Anzeigarten ($t = 8.14, p < .001$). Jedoch ist dieser Unterschied so gering, dass er für die Auswertung der Annäherungsgeschwindigkeit nicht von praktischer Relevanz ist.

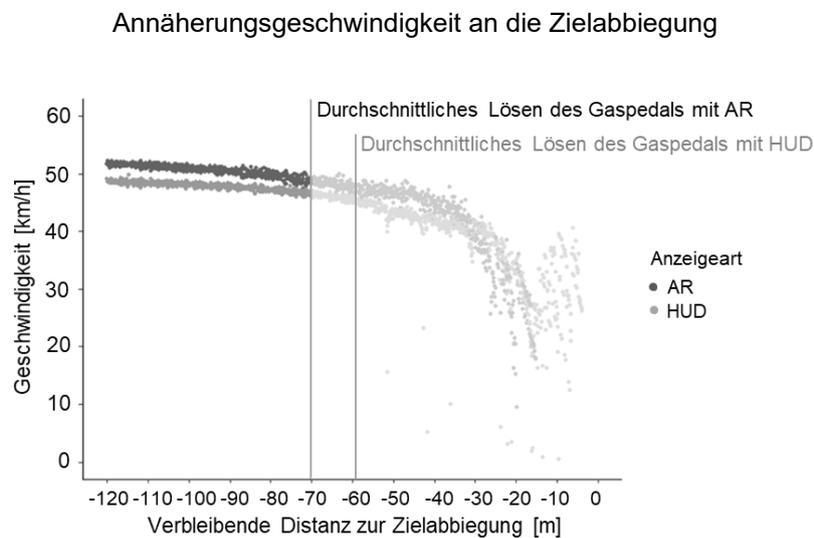


Abbildung 5.10: Annäherungsgeschwindigkeit an die Zielabbiegung, getrennt nach der Anzeigart. Der Analysebereich begann 120 m vor der Zielabbiegung und endete bei dem durchschnittlichen Lösen des Gaspedals mit dem AR Display (70.2 m vor der Zielabbiegung, markiert durch die linke vertikale Linie). Das durchschnittliche Lösen des Gaspedals mit HUD war 59.3 m vor der Zielabbiegung, markiert durch die rechte vertikale Linie). Um Simulatorübelkeit zu verhindern, wurden die Versuchspersonen instruiert vor der Zielabbiegung zum Stehen zu kommen (~10 m) ($N = 59$). Reprinted from (Bauerfeind et al., 2021), © 2021, with permission from Elsevier.

Tabelle 5.5: Hierarchisch lineares Modell der mittleren Annäherungsgeschwindigkeit [km/h]. Der Analysebereich begann 120 m vor der Zielabbiegung und endete bei dem durchschnittlichen Lösen des Gaspedals mit dem AR Display (70.2 m vor der Zielabbiegung). Reprinted from (Bauerfeind et al., 2021), © 2021, with permission from Elsevier.

Maße	Schätzung [km/h]	SE	t	p	95% KI	
					niedrig	hoch
Gewählte Effekte						
AR Display, 120 m vor Zielabbiegung (Achsenabschnitt /intercept)	52.26	0.54	94.41	< .001	51.18	53.35
HUD	-2.91	0.04	-70.23	< .001	-2.99	-2.83
Distanz zur Zielabbiegung [m]	-0.05	0.00	-47.37	< .001	-0.05	-0.05
HUD * Distanz zur Zielabbiegung [m]	0.01	0.00	8.14	< .001	0.01	0.01

Anmerkung. N = 59, SE = Standardfehler, Versuchsperson: SD = 4.25 km/h (Beliebige Effekte/random effects), $R^2_{\text{marginal}} = 0.06$, $R^2_{\text{conditional}} = 0.55$, Ergebnisse für HUD, Distanz zur Zielabbiegung und Interaktion werden durch eine Addition mit dem Achsenabschnitt (intercept) berechnet.

5.3.5 Subjektive Bewertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der subjektiven Evaluation vorgestellt. Zwischensubjekteffekte (erlebte Reihenfolge der Anzeigart) und Interaktionseffekte zwischen der Anzeigart und der Reihenfolge (beginnend mit dem HUD vs. beginnend mit dem AR Display) werden ausschließlich im Fall einer statistischen Bedeutsamkeit erwähnt.

Angesichts des Gefallens der Anzeige zeigten die Ergebnisse einen Haupteffekt ($F(1, 57) = 214.74$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .79$). Im Durchschnitt gefiel den Versuchspersonen das AR Display signifikant besser als das HUD (AR Display: $M = 11.9$, $SD = 2.3$; HUD: $M = 6.2$, $SD = 2.5$) (Abbildung 5.11 a) (siehe Anhang: Fragebögen Studie 1 für die spezifischen Antwortkategorien). Das Fahren mit dem AR Display wurde als „angenehm“ wahrgenommen. Hingegen bewerteten die Versuchspersonen das Fahren mit dem HUD als „mittel angenehm“, was zu einem signifikanten Unterschied führte (AR Display: $M = 12.4$, $SD = 1.8$; HUD: $M = 8.3$, $SD = 2.7$; $F(1, 57) = 106.73$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .65$) (Abbildung 5.11 b). Bezüglich der Verständlichkeit zeigte sich ebenfalls ein Haupteffekt zwischen den beiden Anzeigarten ($F(1, 57) = 67.33$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .54$). Demnach bewerteten die Versuchspersonen das AR Display als „verständlich“ für die Navigationsaufgabe und das HUD als „mittel verständlich“ (AR Display: $M = 12.9$, $SD = 1.8$; HUD: $M = 9.8$, $SD = 2.7$) (Abbildung 5.11 c). Die wahrgenommene Entlastung durch die Anzeige in der Navigationsaufgabe unterschied sich ebenfalls signifikant ($F(1, 57) = 130.39$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .70$). Das AR Display wurde als „stark entlastend“ und das HUD als „mittel entlastend“ für die Navigationsaufgabe wahrgenommen (AR Display: $M = 11.2$, $SD = 2.2$; HUD: $M = 7.3$, $SD = 2.4$) (Abbildung 5.11 d). Bezüglich der Nützlichkeit zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Haupteffekt ($F(1, 57) = 74.37$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .57$). Demnach bewerteten die Versuchspersonen das AR Display als „nützlich“ für das Finden der

korrekten Zielabbiegung. Das HUD wurde als „mittel nützlich“ wahrgenommen (AR Display: $M = 12.5$, $SD = 2.0$; HUD: $M = 8.6$, $SD = 2.9$) (Abbildung 5.11 e). Außerdem nahmen die Versuchspersonen das AR Display als „gut geeignet“ für die Navigationsaufgabe wahr. Das HUD dagegen wurde als „mittel geeignet“ bewertet (AR Display: $M = 12.7$, $SD = 1.6$; HUD: $M = 8.0$, $SD = 2.7$; $F(1, 57) = 138.90$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .71$) (Abbildung 5.11 f).

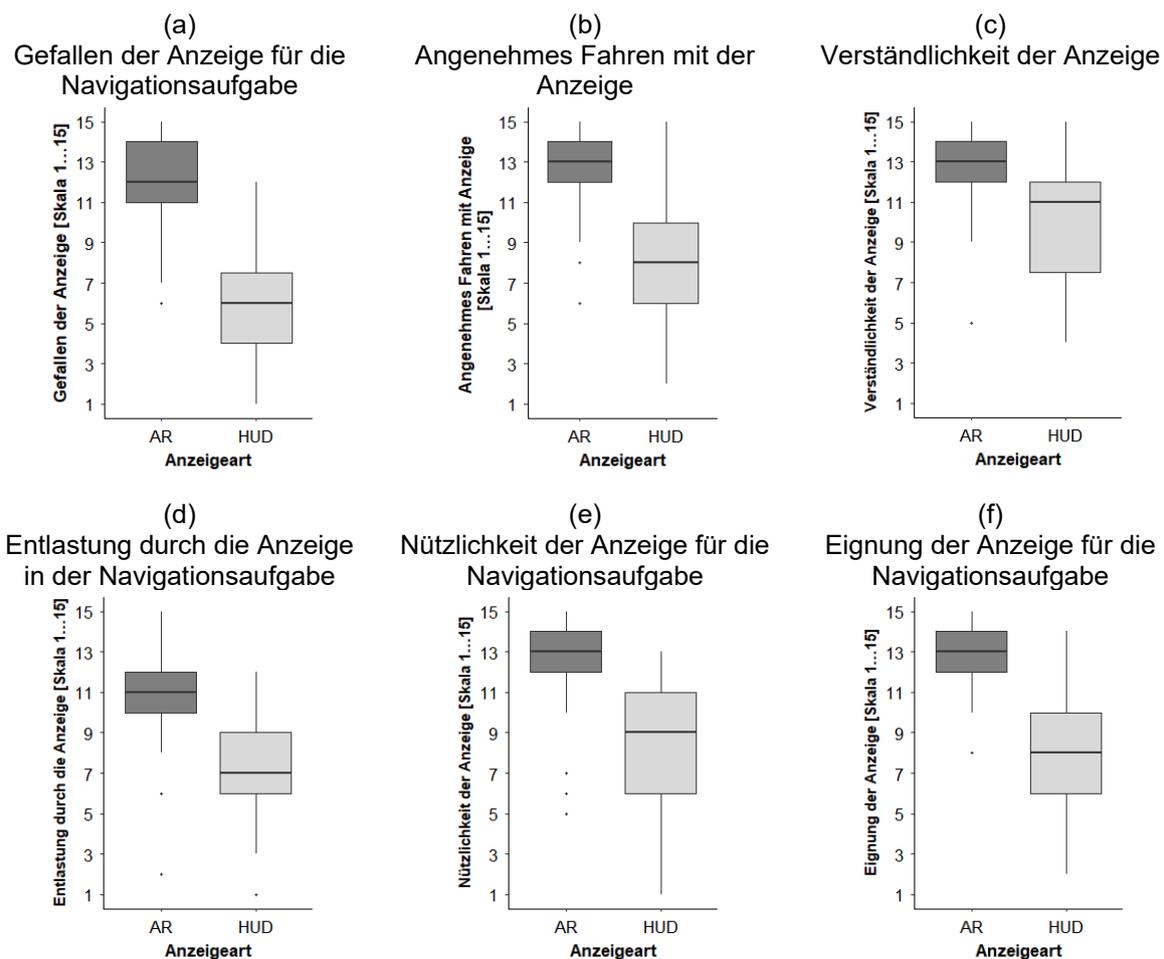


Abbildung 5.11: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich des Gefallens der Anzeige, des angenehmen Fahrens mit der Anzeige, der Verständlichkeit der Anzeige, der Entlastung durch die Anzeige, der Nützlichkeit der Anzeige und der Eignung der Anzeige für die Navigationsaufgabe ($N = 59$), (1: niedrige Zustimmung, 15: hohe Zustimmung auf dem jeweiligen Item) (Bauerfeind et al., 2019).

Die Versuchspersonen bewerteten außerdem die Balkenanzeige des HUDs, die zur Distanzeinschätzung diente. Die Hälfte der Versuchspersonen (52.5%) gab an diese nicht zu benötigen. 34% sprachen sich für eine Balkenanzeige aus und 13.5% waren unschlüssig, da sie u.a. die Genauigkeit dieser Balkenanzeige bemängelten. Nachdem die Versuchspersonen das AR Display getestet hatten, wünschten sich mehr als die Hälfte der Versuchspersonen (69%) keine Balken- bzw. Meteranzeige in Ergänzung zu dem AR-Pfeil. 29% der Versuchspersonen sprachen sich jedoch für diese Ergänzung aus.

Hinsichtlich der Ablenkung durch die Anzeige zeigte sich ein Haupteffekt der Anzeigeart ($F(1, 57) = 17.67, p < .001, \eta_p^2 = .24$). Die Versuchspersonen bewerteten das AR Display als „wenig ablenkend“. Das HUD wurde als „mittel ablenkend“ wahrgenommen (AR Display: $M = 4.9, SD = 2.8$; HUD: $M = 7.1, SD = 3.4$) (Abbildung 5.12).

Ablenkung durch die Anzeige

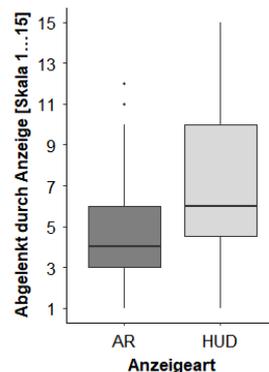


Abbildung 5.12: Boxplot der subjektiven Evaluation bezüglich der Ablenkung durch die Navigationsanzeige (N = 59), (1: sehr wenig abgelenkt, 15: sehr stark abgelenkt).

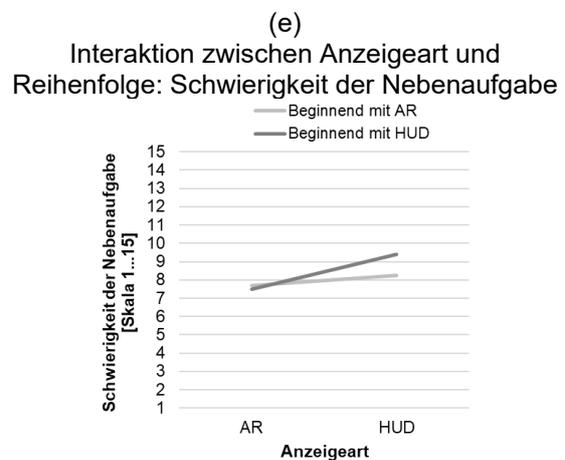
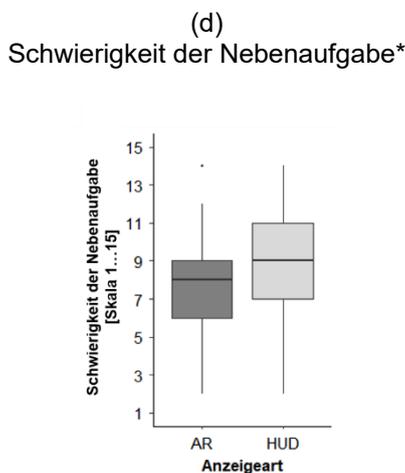
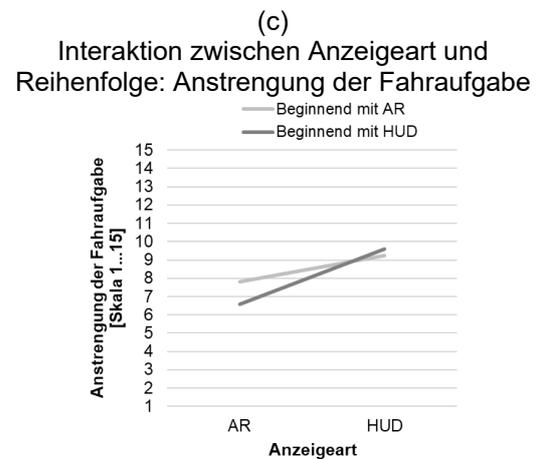
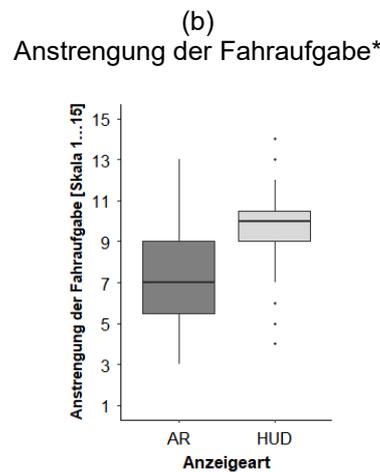
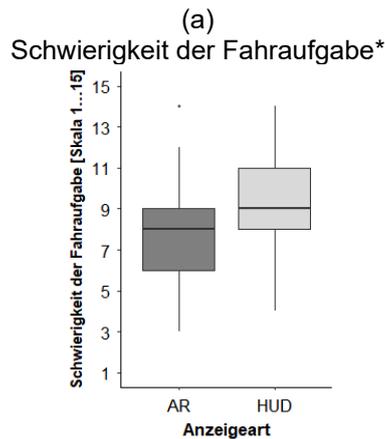
Hinsichtlich der Anzeigegestaltung zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt ($F(1, 57) = 75.31, p < .001, \eta_p^2 = .57$). Den Versuchspersonen gefiel die Gestaltung des AR Displays „gut“, wohingegen sie die Gestaltung des HUDs als „mittel gut“ bewerteten (AR Display: $M = 11.46, SD = 2.13$; HUD: $M = 7.85, SD = 2.52$).

Die subjektive Evaluation umfasste des Weiteren die Bewertung der Fahr- und der Nebenaufgabe. Es zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt hinsichtlich der Schwierigkeit der Fahraufgabe ($F(1, 57) = 47.42, p < .001, \eta_p^2 = .45$). Als Fahraufgabe wurde die Navigationsaufgabe inklusive der Nebenaufgabe definiert. Die Versuchspersonen bewerteten die Fahraufgabe als „leichter“ mit dem AR Display als mit dem HUD (AR Display: $M = 7.3, SD = 2.3$; HUD: $M = 9.3, SD = 2.2$) (Abbildung 5.13 a).

Die Ergebnisse zeigten außerdem einen Haupteffekt angesichts der Anstrengung der Fahraufgabe ($F(1, 57) = 70.27, p < .001, \eta_p^2 = .55$). Mit dem AR Display bewerteten die Versuchspersonen die Fahraufgabe als signifikant weniger anstrengend als mit dem HUD (AR Display: $M = 7.2, SD = 2.1$; HUD: $M = 9.4, SD = 2.1$) (Abbildung 5.13 b). Ein hybrider Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Reihenfolge verwies darauf, dass der Haupteffekt der Anzeigeart global interpretierbar ist ($F(1, 57) = 9.08, p < .05, \eta_p^2 = .14$) (Abbildung 5.13 c).

Es zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt hinsichtlich der Schwierigkeit der Nebenaufgabe ($F(1, 57) = 14.52, p < .001, \eta_p^2 = .20$). Die Versuchspersonen bewerteten das Lösen der Nebenaufgabe mit dem AR Display als leichter als mit dem HUD (AR Display: $M = 7.6, SD = 2.5$; HUD: $M = 8.8, SD = 2.7$) (Abbildung 5.13 d). Ein hybrider Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Reihenfolge verwies darauf, dass der Haupteffekt der Anzeigeart global interpretierbar ist ($F(1, 57) = 4.39, p < .05, \eta_p^2 = .07$) (Abbildung 5.13 e).

Des Weiteren zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt hinsichtlich der Anstrengung durch die Nebenaufgabe ($F(1, 57) = 29.75, p < .001, \eta_p^2 = .34$). Die Nebenaufgabe wurde in der Fahrt mit dem AR Display als weniger anstrengend als mit dem HUD wahrgenommen (AR Display: $M = 7.8, SD = 2.6$; HUD: $M = 9.3, SD = 2.6$) (Abbildung 5.13 f). Ein hybrider Interaktionseffekt zwischen der Anzeigart und der Reihenfolge verwies darauf, dass der Haupteffekt der Anzeigart global interpretierbar ist ($F(1, 57) = 10.49, p < .05, \eta_p^2 = .16$) (Abbildung 5.13 g).



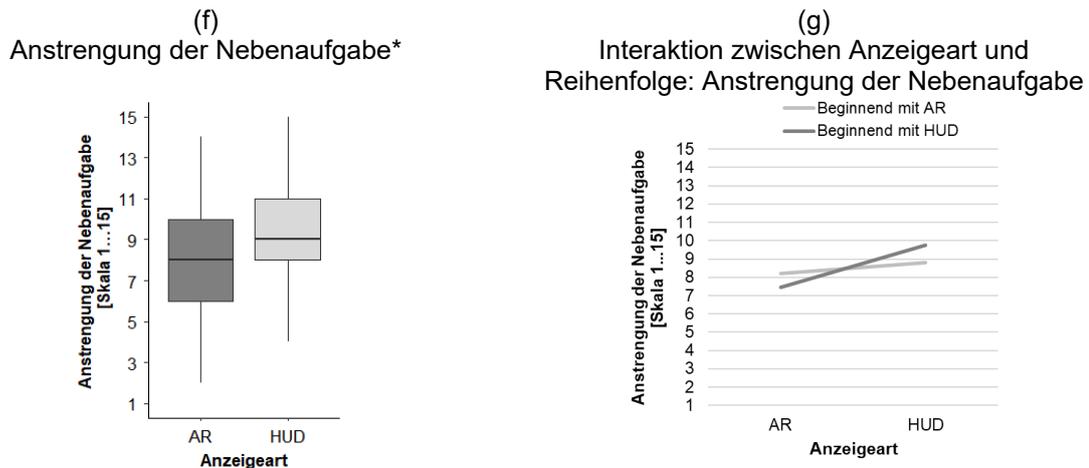


Abbildung 5.13: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Schwierigkeit und Anstrengung der Fahraufgabe (Navigationsaufgabe & Nebenaufgabe) und der Nebenaufgabe (1: niedrige Zustimmung, 15: hohe Zustimmung auf dem jeweiligen Item) und die jeweiligen Interaktionen zwischen der Anzeigertyp und der Reihenfolge (N = 59). *(Bauerfeind et al., 2021).

Nach der Studie gaben die Versuchspersonen ihre Präferenz hinsichtlich der Anzeigertyp an. Zwei Versuchspersonen entschieden sich für das HUD, 53 Versuchspersonen wünschten sich das AR Display und zwei Versuchspersonen präferierten keine der beiden Anzeigen.

5.4 Diskussion³ und Zusammenfassung

Mit dieser Fahrsimulatorstudie wurde ein grundlegendes Verständnis der menschlichen Interaktion mit AR-Informationen gewonnen. Untersucht wurden die Auswirkungen eines AR Displays auf die Effektivität und die Nutzerakzeptanz. Dazu wurde der Entscheidungspunkt für die richtige Zielabbiegung in einer uneindeutigen Navigationsaufgabe im Vergleich zu einem HUD untersucht. Außerdem wurde die Fahrerbeanspruchung, das Fahrverhalten, das Navigieren und die Nutzerbewertung ausgewertet. In dieser Studie war die Navigation in beiden Displays ohne eine ergänzende Sprachansage umgesetzt, um die gefundenen Effekte ausschließlich auf die Anzeige zurückzuführen.

Es wurde angenommen, dass die Fahrenden besonders in uneindeutigen Navigationssituationen von einem AR Display profitieren, da die Informationen im direkten Bezug zur Umwelt dargestellt werden. Folglich wurde erwartet, dass im Gegensatz zu

³ Die Ergebnisse der Analyse des Entscheidungspunktes, der Navigationsfehler, der subjektiven Bewertung der Anzeigertyp (Gefallen der Anzeige, angenehmes Fahren mit der Anzeige, Verständlichkeit der Anzeige, Entlastung durch die Anzeige, Nützlichkeit der Anzeige und Eignung der Anzeige für die Navigationsaufgabe) und die entsprechenden Limitationen wurden bereits in Bauerfeind et al. (2019) diskutiert. In Bauerfeind et al. (2021) wurden bereits die Ergebnisse der Fahrerbeanspruchung, der Distanz zur Zielabbiegung bei Lösen des Gaspedals, der Annäherungsgeschwindigkeit an die Zielabbiegung, der subjektiven Bewertung der Fahraufgabe und der Nebenaufgabe (Schwierigkeit und Anstrengung) und die entsprechenden Limitationen diskutiert.

einem HUD, das Finden der richtigen Zielabbiegung mit einem AR Display früher erfolgt und weniger beanspruchend ist.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Versuchspersonen mit einem AR Display die richtige Zielabbiegung in uneindeutigen Navigationssituationen früher als mit einem HUD identifizieren konnten. Demnach verhalf das AR Display zu einer frühzeitigeren und erleichterten Erkennung des Navigationspfads, was zu einer verbesserten Orientierung in der Umwelt führte. Obwohl die Entscheidung für die Zielabbiegung mit einem AR Display früher als mit einem HUD getroffen wurde, wurden auch weniger Navigationsfehler gemacht. Befunde in der Literatur konnten somit bestätigt werden (Israel, 2012; Kim & Dey, 2009). Ferner wurde mit dem AR Display niemals mehr als ein Fehler verursacht, was auf eine schnelle Erlernbarkeit der AR-Informationen hindeutet. Subjektiv bewerteten die Versuchspersonen das AR Display als „verständlich“ und „gut geeignet“ für das Navigieren in uneindeutigen Navigationssituationen. Das HUD wurde als „mittel verständlich“ und „mittel geeignet“ bewertet. Mit dem HUD dagegen entschieden sich die Versuchspersonen signifikant häufiger für die falsche Abbiegung, obwohl sie die Anzeige später und somit näher an der Zielabbiegung ausschalteten als mit dem AR Display. Durchschnittlich konnten die Versuchspersonen mit dem HUD die Zielabbiegung erst identifizieren, sobald sie die vorletzte Abbiegungsmöglichkeit passiert hatten. Eine Begründung der vermehrten Fehler mit einem HUD stellt der fehlende Umweltbezug der Informationen dar. Die Fahrenden müssen die präsentierten Informationen mental auf die reale Fahrsituation übertragen, was besonders in uneindeutigen Navigationssituationen eine Herausforderung darstellen kann. Außerdem kann die digitale Distanzangabe des HUDs Schwierigkeiten für die Fahrenden verursacht haben (Mocker, 2015). Dagegen ist die Distanzangabe in einem AR Display durch die Positionsgenauigkeit in der Darstellung integriert. Resultierend müssen die Fahrenden keine digitale Zahleninformation interpretieren und verstehen die verbleibende Distanz zur Zielabbiegung intuitiver.

Hinsichtlich der Fahrerbeanspruchung wurde deutlich, dass die Versuchspersonen die kognitive, räumliche Nebenaufgabe mit dem AR Display schneller beantworteten als mit dem HUD. Die Versuchspersonen zeigten mit dem AR Display ein nahezu konstantes Antwortverhalten. Die Leistung in der Nebenaufgabe kann invers proportional zur Leistung in der Primäraufgabe (Navigieren mit der Anzeige) interpretiert werden (Jahn et al., 2005). Die schnellere Beantwortung verweist somit auf eine reduzierte mentale Beanspruchung in der Navigationsaufgabe bedingt durch das AR Display im Vergleich zu dem HUD. Die Versuchspersonen schienen über mehr freie Ressourcen zu verfügen, was sich in der schnelleren Beantwortung der Nebenaufgabe zeigte. Dieses Ergebnis zeigt, dass Fahrende von augmentierten Informationen in uneindeutigen Navigationssituationen profitieren können. Durch die positionsgenaue Verortung der AR-Informationen in der realen Fahrsituation sind die virtuellen und realen Objekte näher als in einem HUD und verhelfen somit zu einem intuitiven und schnellen Verständnis (Pfanmüller, 2017). Im Gegensatz dazu, kam es zu einem kontinuierlichen Anstieg in der Antwortzeit und somit zu einem Leistungsabfall mit dem HUD, je näher sich die Versuchspersonen der Zielkreuzung näherten. Die Konzentration der Versuchspersonen verschob sich zugunsten der Navigationshinweise im HUD, um die uneindeutige Situation zu lösen und somit verschlechterten sie sich in der Nebenaufgabe. Die Verarbeitung der Informationen im HUD ist beanspruchender aufgrund des fehlenden Umweltbezugs dieser Informationen. Resultierend müssen die Fahrenden die präsentierten Informationen mental auf die reale Situation übertragen. Dieser mentale Abgleich wirkt sich beanspruchend auf die Fahrenden

aus. Befunde aus der Literatur können somit bestätigt werden (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in den subjektiven Daten wider. Die Versuchspersonen gaben an, dass die Nebenaufgabe in den uneindeutigen Navigationssituationen anstrengender und schwieriger mit dem HUD zu absolvieren war. Sie bewerteten das Fahren mit dem HUD als „mittel angenehm“ und „mittel entlastend“, wohingegen sie das Fahren mit dem AR Display als „angenehm“ und „stark entlastend“ bewerteten. Diese Daten bestätigen die Annahme, dass das Verstehen und Interpretieren der AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD weniger mental beanspruchend ist (Bengler et al., 2015; Israel, 2012; Kim & Dey, 2009; Pauzie, 2015; Pfannmüller, 2017; Pfannmüller et al., 2015a).

Hinsichtlich der Fahrdaten wurden signifikante Unterschiede zwischen dem HUD und dem AR Display deutlich. Mit dem HUD näherten sich die Versuchspersonen der Zielabbiegung langsamer als mit dem AR Display. Der Unterschied betrug lediglich 3 km/h, war jedoch sehr konstant. Die Versuchspersonen mussten die angezeigte HUD-Information auf die reale Fahrsituation übertragen, um die richtige Zielabbiegung zu identifizieren. Dagegen waren die AR-Informationen durch die positionsgenaue Platzierung bereits in der Umwelt verortet. Resultierend war das Folgen des AR-Pfeils vereinfacht und führte zu einer höheren Geschwindigkeit während der Annäherung an die Abbiegesituation im Vergleich zum HUD. Eine reduzierte Annäherungsgeschwindigkeit mit dem HUD hingegen kann ein Indiz für ein Kompensationsverhalten sein. Das Kompensationsverhalten wird in dem speed-accuracy tradeoff (Garrett, 1922; Heitz, 2014; Woodworth, 1899) beschrieben. Demzufolge dauert es länger eine Aufgabe präzise auszuführen, wohingegen es Zeit spart, die Genauigkeit zu reduzieren. Eine reduzierte Geschwindigkeit kann somit mehr Zeit für die Entscheidung der richtigen Zielabbiegung in dieser uneindeutigen Navigationssituation verschaffen, was bei einem HUD folglich notwendig erscheint. Diese Differenzen des Verhaltens werden durch die subjektiven Daten bekräftigt. Die Versuchspersonen bewerteten das Fahren mit dem AR Display als leichter und weniger anstrengend als mit dem HUD. Des Weiteren wurde das AR Display als „wenig ablenkend“ und „nützlich“ für das Finden der korrekten Zielabbiegung eingeschätzt. Dagegen wurde das HUD als „mittel ablenkend“ und „mittel nützlich“ eingestuft.

Weitere Fahrdaten zeigten, dass die Versuchspersonen mit dem AR Display während der Annäherung an die Zielabbiegung früher den Fuß vom Gaspedal nahmen als mit dem HUD. Dies könnte bedingt sein durch die frühzeitigere Identifizierung der richtigen Zielabbiegung mit dem AR Display. Dies deutet darauf hin, dass mit dem AR Display ein vorausschauendes Fahren möglich ist. Generell ist anzumerken, dass sich die Abfolge der Zielidentifizierung und des Lösens des Gaspedals zwischen den beiden Anzeigarten unterschied. Mit dem AR Display identifizierten die Versuchspersonen frühzeitig die Zielabbiegung und lösten durchschnittlich fast zeitgleich den Fuß vom Gas (70.2 m vor der Zielabbiegung). Mit dem HUD nahmen die Versuchspersonen durchschnittlich 59.3 m vor der Zielabbiegung den Fuß vom Gas und identifizierten die Zielabbiegung durchschnittlich erst 39.92 m vor der Zielabbiegung. Wie bereits erwähnt verursachten sie dennoch mit dem HUD mehr Navigationsfehler als mit dem AR Display.

Anzumerken ist, dass die gefundenen Ergebnisse durch jegliche Unterschiede zwischen dem AR Display und dem HUD begründet sein können, jedoch wird angenommen, dass sie auf die Positionsgenauigkeit der AR-Informationen zurückzuführen sind.

Hinsichtlich den Limitationen der Studie muss angemerkt werden, dass die beiden Anzeigarten nicht zu jedem Zeitpunkt die gleichen Informationen präsentierten. Zu Beginn präsentierte das HUD einen Pfeil, der geradeaus zeigte. Die Richtungsinformationen konnten gezeigt werden, wenn weniger als drei Kreuzungen bevorstanden. Im Gegensatz dazu konnten die Fahrenden im AR Display von Weitem erkennen, ob es sich um eine Links- oder eine Rechtsabbiegung handelte, da die AR-Informationen positionsgenau in der Umwelt verortet erschienen. Dies kann ein Vorteil von AR-Informationen sein.

Diskutiert werden muss außerdem, dass die Analyse der Leistung in der kognitiven Nebenaufgabe auf dem Bereich von 120 m vor der Zielabbiegung bis zum individuellen Entscheidungspunkt basiert. Somit ist die Leistung bei Zielerreichung eine Vorhersage. Dennoch eignet sich dieses hierarchisch lineare Modell für die Analyse, da der zeitliche Verlauf der Antwortzeiten während der Annäherung an die Zielabbiegung modelliert werden konnte. Dass die Antwortzeiten nach dem Entscheidungspunkt wieder abnehmen können, wird in diesem Modell nicht berücksichtigt, sollte aber im Rahmen der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Des Weiteren war der Endpunkt der Analyse der Annäherungsgeschwindigkeit der Moment des durchschnittlichen Lösens des Gaspedals mit dem AR Display. Dies fand mit dem HUD später statt. Das Lösen des Gaspedals wird als erste Aktion für den bevorstehenden Stopp an der Zielabbiegung gesehen und somit zählt die nachfolgende Geschwindigkeit nicht mehr als Annäherungsgeschwindigkeit. Jedoch gab es auch Versuchspersonen, die das Gaspedal früher lösten als dieser Durchschnitt und somit früher die Geschwindigkeit reduzierten. Dennoch ist die Annäherungsgeschwindigkeit mit dem AR Display höher als die mit dem HUD. Dieses Gegenargument verstärkt somit den Unterschied zwischen den beiden Anzeigarten.

Im Hinblick auf die Interpretation der Fahrdaten müssen Abweichungen zum gewohnten Fahrstil berücksichtigt werden. Diese sind dem Umgang mit dem Fahrsimulator geschuldet. Das Einschätzen der Geschwindigkeit ist im Fahrsimulator erschwert, was sich meist in einer Unterschätzung der Geschwindigkeit äußert. Abweichung zur angestrebten Geschwindigkeit können dann zu einem verstärkten Bremsen und Beschleunigen führen.

In dieser Grundlagenstudie fuhren die Versuchspersonen auf geraden Strecken ohne andere Verkehrsteilnehmer. Somit konnte eine hohe Standardisierung für die uneindeutigen Abbiegesituationen geschaffen werden. Eine systematische Untersuchung subjektiver und objektiver Daten wurde ermöglicht. Die Untersuchung bestätigt die Annahme, dass AR-Informationen das Navigieren in uneindeutigen Situationen erleichtern.

Anzumerken ist, dass in dieser Studie der Einfluss der grafischen Gestaltung der dargestellten AR-Informationen nicht betrachtet wurde und somit keine generalisierte Aussage dazu abgeleitet werden kann.

Zusammenfassend werden die Ergebnisse der Studie 1 in Tabelle 5.6 aufgeführt.

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Studie 1.

<p>(1) verbesserte Orientierung in der Fahraufgabe durch positionsgenaue Verortung der AR-Informationen</p> <ul style="list-style-type: none"> - frühzeitigere Identifizierung uneindeutiger Abbiegesituationen mit dem AR Display als mit dem HUD - weniger Navigationsfehler in uneindeutigen Abbiegesituationen mit dem AR Display als mit dem HUD - Fahraufgabe mit dem AR Display als leichter und weniger anstrengend als mit dem HUD bewertet
<p>(2) weniger beanspruchendes Navigieren in uneindeutigen Situationen mit dem AR Display als mit dem HUD</p> <ul style="list-style-type: none"> - schnellere und konstante Beantwortung und mehr korrekte Antworten in der kognitiven Nebenaufgabe während der Annäherung an uneindeutige Abbiegesituationen mit dem AR Display als mit dem HUD - AR Display als entlastender als das HUD bewertet
<p>(3) Einfluss der Anzeigart auf das Fahrverhalten in uneindeutigen Navigationssituationen</p> <ul style="list-style-type: none"> - höhere Geschwindigkeit mit dem AR Display während der Annäherung an uneindeutige Abbiegesituationen im Vergleich zum HUD - reduzierte Geschwindigkeit mit dem HUD während der Annäherung an uneindeutige Abbiegesituationen → Kompensationsverhalten mit dem HUD, um Zeit für Entscheidung zu gewinnen - frühzeitigeres Lösen des Gaspedals mit dem AR Display als mit dem HUD vor uneindeutigen Abbiegesituationen aufgrund frühzeitigerer Identifikation der Zielabbiegung, deutet auf vorausschauendes Fahren hin
<p>(4) erhöhte Nutzerakzeptanz des AR Displays im Vergleich zu dem HUD</p> <ul style="list-style-type: none"> - AR Display als verständlicher und besser geeignet bewertet als das HUD für das Navigieren in uneindeutigen Navigationssituationen

Diese Grundlagenstudie zeigte, dass die Fahrenden besonders in uneindeutigen Navigationssituationen von AR-Informationen profitieren können. Sowohl objektive als auch subjektive Daten zeigten, dass AR-Informationen weniger beanspruchend sind und intuitiver verstanden werden als Informationen im HUD.

Für die Studie wurden Situationen mit vielen dicht gelegenen Abbiegemöglichkeiten in einer Fahrsimulation geschaffen. Für eine hohe Standardisierung der Navigationssituationen navigierten die Versuchspersonen in dieser Grundlagenstudie ohne andere Verkehrsteilnehmer. Zusätzlich absolvierten sie eine stark beanspruchende Nebenaufgabe. Es ist zu bedenken, dass diese beanspruchende Fahrsituation nicht einer realen Fahrt entspricht.

In einer nächsten Studie wurde ein realistischeres Navigationserlebnis angestrebt. Demnach wurden längere Versuchsstrecken mit anderen Verkehrsteilnehmern umgesetzt und die Nebenaufgabe in vereinfachter Form realisiert, um die Versuchspersonen nicht an ihr maximales Beanspruchungslevel zu bringen. Des Weiteren wurde untersucht, ob das Navigieren mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD zu aufmerksamkeitsbindenden Effekten führt. Dafür wurde das Blickverhalten während des Navigierens mit den Anzeigarten (AR Display und HUD) in einer vorstädtischen Gegend

mit uneindeutigen Navigationssituationen untersucht. Des Weiteren wurde der Einfluss der Verkehrskomplexität (niedrig vs. hoch) auf die Effektivität und Bewertung der AR-Informationen untersucht. Da AR-Informationen positionsgenau in der Umwelt verortet sind, kann es zu Überlagerungen kommen, welche womöglich als störend von Fahrenden wahrgenommen werden können.

6 Simulatorstudie II: Untersuchung aufmerksamkeitsbindender Effekte bedingt durch AR-Informationen

6.1 Zielsetzung

In der zweiten Studie wurde untersucht, ob das Navigieren mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD zu aufmerksamkeitsbindenden Effekten führt, die auf einen Cognitive-Capture-Effekt (Weintraub, 1987 nach Tufano, 1997) hindeuten können. Da dieser Effekt die Unfähigkeit die Aufmerksamkeit situationsangemessen zwischen den präsentierten Informationen und der Umwelt zu verteilen beschreibt (Boston & Braun, 1996; Gish & Staplin, 1995), wurde das Blickverhalten während des Navigierens mit den Anzeigearten (AR Display und HUD) in einer vorstädtischen Gegend mit uneindeutigen Navigationssituationen untersucht. Im Vergleich zu der ersten Simulatorstudie wurde ein realistischeres Fahrerlebnis mit längeren Fahrstrecken mit AR-Informationen angestrebt. Die Fahrten unterschieden sich hinsichtlich der Verkehrskomplexität (niedrig vs. hoch), um herauszufinden, ob die Fahrenden ihr Blickverhalten an veränderte Umweltbedingungen anpassen, wie dem Verkehr mehr Beachtung in einer hohen Verkehrskomplexität zu schenken. Des Weiteren wurde untersucht, ob die Verkehrskomplexität Einfluss auf die Effektivität und Bewertung der AR-Informationen hat. Da die Informationen positionsgenau in der Umwelt verortet sind, kann es zu Überlagerungen kommen, welche womöglich als störend von Fahrenden wahrgenommen werden können. Die Verkehrskomplexität wurde in Form der Anzahl fahrender und parkender Fahrzeuge in den Fahrten variiert.

Zusätzlich wurde eine komplexere Situation, eine uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug, am Ende jeder Fahrt untersucht. Dies hatte zum Ziel zu analysieren, ob die Fahrenden dieses entgegenkommende Fahrzeug beachten und somit ein situationsangemessenes Blickverhalten zeigen. Des Weiteren wurde untersucht, ob die Fahrenden ein angemessenes Fahrverhalten mit der jeweiligen Anzeigeart zeigen. Dazu wurden die Fahrenden mit der Entscheidung konfrontiert vor diesem abzubiegen oder ihn passieren zu lassen. Diese komplexere Situation diene somit der weiteren Analyse aufmerksamkeitsbindender Effekte.

Die Ergebnisse zur Fahrerbeanspruchung der ersten Studie zeigten, dass AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD zu einer reduzierten mentalen Beanspruchung führen. Da die AR-Informationen bereits positionsgenau in der Umwelt verortet sind, wurde angenommen, dass die Fahrenden diese nicht mehr mental auf die reale Fahrsituation übertragen müssen (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Ob dieser mentale Abgleich mit AR-Informationen nicht mehr von Fahrenden durchgeführt werden muss, wurde in dieser Studie untersucht. Analysiert wurde somit, ob es mit einem AR Display zu einer reduzierten Blickwechselanzahl zwischen der Anzeige und der Zielabbiegung kommt. Dazu wurde das Blickverhalten zwischen dem AR Display und dem HUD hinsichtlich der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen der Navigationsinformation und der Zielabbiegung untersucht.

Neben der Navigationsaufgabe absolvierten die Fahrenden eine kognitive Nebenaufgabe, um die Fahrerbeanspruchung zu erfassen und die Schwierigkeit der Fahraufgabe zu erhöhen. Des Weiteren wurden die Navigationsleistung und die subjektive Einschätzung analysiert.

Mit dieser Fahrsimulatorstudie wurden folgenden Forschungsfragen beantwortet:

- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf die Fahrerbeanspruchung in unterschiedlich komplexen Verkehrssituationen in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf das Blickverhalten in unterschiedlich komplexen Verkehrssituationen in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf die Erfüllung einer uneindeutigen Navigationsaufgabe (richtige Route finden) in unterschiedlich komplexen Verkehrssituationen im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf das Abbiegeverhalten in einer uneindeutigen Navigationsaufgabe im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf das subjektive Erleben in unterschiedlich komplexen Verkehrssituationen in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss hat die Verkehrskomplexität auf die Effektivität und Bewertung der Anzeige in uneindeutigen Navigationssituationen?

6.2 Methodik¹

Im Folgenden wird die Methodik der Studie 2 (Simulatorstudie) beschrieben.

6.2.1 Fahrstrecken

In der Studie wurden die Versuchspersonen mit Hilfe von Navigationsinformationen durch eine Vorstadt navigiert. Insgesamt wurden zwei identische Strecken umgesetzt, die sich ausschließlich in der Verkehrskomplexität (niedrig vs. hoch) unterschieden. Die Verkehrskomplexität bezog sich sowohl auf die Anzahl parkender Fahrzeuge als auch auf den fließenden Verkehr (Abbildung 6.1). Im Rahmen eines Pre-Tests wurden 16 Verkehrsobjekte pro Kilometer als niedrige Verkehrskomplexität festgelegt, 23 Verkehrsobjekte pro Kilometer als hohe Verkehrskomplexität bestimmt. Bei den Verkehrsobjekten handelte es sich um hohe Fahrzeuge (LKWs) und um niedrige Fahrzeuge (PKWs). Die Strecken beinhalteten 17 Abbiegungen, wobei es sich bei sieben Abbiegungen um uneindeutige Situationen handelte, da der Abstand zwischen den Abbiegungen lediglich 40 m betrug. Es befanden sich keine Ampeln auf den Straßen.

Bei der letzten der sieben uneindeutigen Abbiegungen handelte es sich um eine Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug. Dieses Fahrzeug war so programmiert, dass es ca. 30 m vom Mittelpunkt der Zielabbiegung entfernt war als die

¹ Die Methodik dieser Studie wurde bereits in Bauerfeind et al. (2022) veröffentlicht.

Versuchsperson die Kreuzung der Zielabbiegung erreichte. Somit wurde die Entscheidung, ihn passieren zu lassen oder vor ihm abzubiegen, für die Versuchsperson erschwert. Im Rahmen eines Pre-Tests wurde der Abstand für diese komplexere Situation untersucht. Das Ergebnis des Pre-Tests ergab 30 m. Die Teilnehmer wurden zu Beginn der Studie auf die Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h innerorts aufmerksam gemacht. Jede Fahrt dauerte ca. 12 Minuten.



Abbildung 6.1: Bilder der Versuchsstrecken mit unterschiedlichen Verkehrskomplexitäten - Strecke mit niedriger Verkehrskomplexität beinhaltet 16 Verkehrsobjekte pro Kilometer (links). Strecke mit hoher Verkehrskomplexität beinhaltet 23 Verkehrsobjekte pro Kilometer (rechts).

6.2.2 Anzeigarten für die Navigation

Die Versuchspersonen erlebten die Navigationsinformationen in einem HUD und in einem AR Display. Die Tabelle 6.1 zeigt die Navigationsinformationen in den beiden Anzeigarten, die ab 120 m vor der jeweiligen Abbiegung eingeblendet wurden. Basierend auf den Ergebnissen des Entscheidungspunktes der 1. Studie (Kapitel 5.3.2) zeigte sich diese Entfernung als effektiv für beide Anzeigarten. Im Rahmen eines Pre-Tests wurde die Farbe Türkis als geeignet für die Navigationsinformationen befunden und für beide Anzeigarten umgesetzt. Im Pre-Test wurde des Weiteren herausgefunden, dass grüne AR-Navigationsinformationen vermeintlich den Eindruck der eigenen Vorfahrt vermitteln.

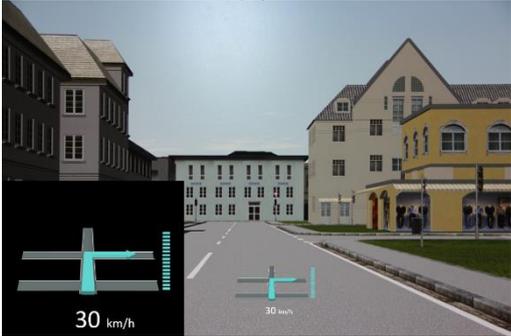
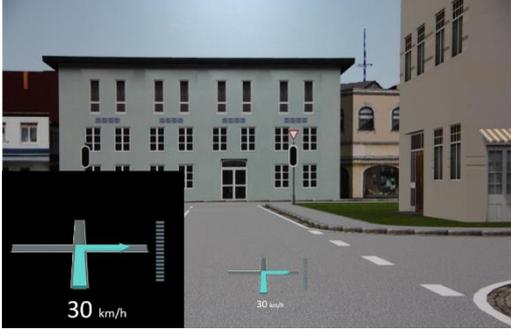
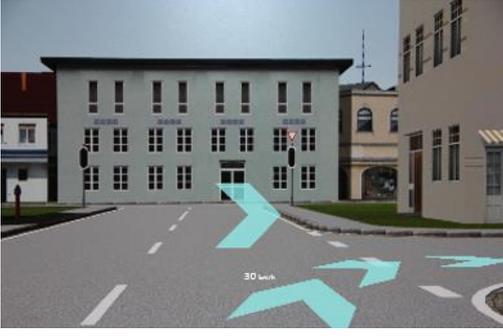
Das HUD hatte eine wahrgenommene Projektionsdistanz von ca. 2 m. Somit schien die Anzeige über der Motorhaube zu schweben (Tabelle 6.1 a-c). Im Fall einer uneindeutigen Abbiegesituation mit mehreren dicht gelegenen Abbiegemöglichkeiten präsentierte das HUD ab 120 m vor der Zielabbiegung einen blauen Pfeil, geradeaus zeigend (Tabelle 6.1 a). Die Richtungsinformation (links oder rechts) wurden angezeigt, sobald die Fahrenden die dritte Abbiegung, 80 m vor der Zielabbiegung, passiert hatten (Tabelle 6.1 b). Im Fall einer eindeutigen Abbiegung (eine Abbiegemöglichkeit) wurden die Richtungsinformation (links oder rechts) ab 120 m angezeigt. Des Weiteren wurde die verbleibende Distanz rechts neben dem Pfeil in Form einer Balkenanzeige angezeigt. Diese verringerte sich während der Annäherung an die Zielabbiegung.

Die AR-Anzeige war in Form einer Fischgräte umgesetzt (Tabelle 6.1 d-f). Die türkisfarbigen Elemente lagen positionsgenau in der Umwelt verortet und ein schwebender Pfeil zeigte in die Zielabbiegung. Im Rahmen eines Pre-Tests wurde entschieden auf eine Animation des schwebenden Pfeils in Richtung der Zielabbiegung zu verzichten, um aufmerksamkeitsbindende Effekte zu minimieren (Merenda et al., 2018; Pfannmüller, 2017;

Kapitel 3.2). In beiden Anzeigen wurde die Geschwindigkeit im unteren Sichtfeld der Fahrenden mit einer Projektionsweite von ca. 2 m angezeigt.

Im AR Display wurden keine Navigationsinformationen in der Statusleiste (zeigt Informationen am unteren Rand des Fahrerblickfeldes) präsentiert, um die gefundenen Effekte ausschließlich auf AR beziehen zu können und Einflüsse einer HUD-Darstellung zu vermeiden.

Tabelle 6.1: Navigationsinformationen in den Anzeigarten HUD (links) und AR Display (rechts) zu verschiedenen Entfernungen zur Zielabiegung am Beispiel der Annäherung an eine uneindeutige Abbiegesituation. Die Informationen im HUD scheinen über der Motorhaube zu schweben. Das AR Display ist in Form einer Fischgräte umgesetzt und positionsgenau in der Umwelt verortet. Der Navigationspfeil zeigt in die Zielabiegung. In beiden Anzeigen wurde die gefahrene Geschwindigkeit angezeigt. (Bauerfeind et al., 2022), CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Verbleibende Distanz zur Zielabiegung	HUD	AR Display
120 m	(a) 	(d) 
80 m	(b) 	(e) 
0 m	(c) 	(f) 

Anmerkung. Die schwarze Box in den Bilder (a), (b) und (c) wurde den Fahrenden nicht präsentiert. Sie dient hier lediglich der besseren Erkennbarkeit der HUD-Informationen.

6.2.3 Aufgabe der Versuchspersonen

Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, die richtige Route mit Hilfe der Navigationsinformationen im AR Display bzw. im HUD zu finden. Neben der Navigationsaufgabe wurden die Versuchspersonen gebeten eine Nebenaufgabe zu absolvieren. Diese Aufgabe diente dazu die Fahrerbeanspruchung zu erfassen und die Schwierigkeit der Fahraufgabe zu erhöhen. Es handelte sich um eine auditive, kognitive, räumliche Zahlenaufgabe. Dazu hörten die Versuchspersonen positive Zahlen randomisiert von eins bis neun aus einem Lautsprecher, der sich vor dem Mockup befand. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, jede Zahl zu bewerten. Dabei sollten die Versuchspersonen einen Knopf rechts am Lenkrad drücken, wenn es sich um gerade Zahlen handelte. Bei ungeraden Zahlen sollten die Versuchspersonen einen Knopf links am Lenkrad drücken. Das Intervall der gesagten Zahlen betrug drei Sekunden.

6.2.4 Stichprobe

An der Fahrstudie nahmen 76 Versuchspersonen teil. Aufgrund von Simulatorübelkeit, konnten 58 Versuchspersonen ausgewertet werden (davon 12 Frauen). Durch eine balancierte Nachbesetzung der Versuchspersonen wurde erzielt, dass die einzelnen Bedingungen dennoch gleich oft getestet wurden. Durchschnittlich waren die Versuchspersonen 33.0 Jahre ($SD = 10.0$ Jahre) alt und fuhren 20121.0 km im vergangenen Jahr ($SD = 13035.3$ km). Sie gaben an den Führerschein durchschnittlich seit 16 Jahren ($SD = 9.87$ Jahren) zu besitzen. Zehn Versuchspersonen trugen eine Brille und zwei Versuchspersonen hatten Kontaktlinsen. Sechs Versuchspersonen vermerkten, an einer Rechts-Links-Schwäche zu leiden. 51.7% der Versuchspersonen hatten Erfahrung mit einem HUD. Die Mehrheit gab jedoch an, dieses nur selten zu nutzen. Vor den Versuchsfahrten absolvierten die Versuchspersonen Übungsfahrten im Simulator. Die Versuchspersonen wurden vom Probandenpool der Group Innovation der Volkswagen AG rekrutiert und erhielten für ihre Teilnahme ein Geschenk.

6.2.5 Untersuchungsdesign

Für diese Fahrstudie wurden die APA Ethik Standards (Ethical Principles of Psychologists and Code of Conduct, 2017) strikt befolgt. Die Fahrstudie wurde als 2x2 within-subjects Design mit den unabhängigen Variablen Anzeigart (HUD vs. AR Display) und Verkehrskomplexität (niedrig vs. hoch) umgesetzt. Abbildung 6.2 zeigt das Versuchsdesign der Fahrstudie. Die Hälfte der Versuchspersonen starteten mit dem HUD und fuhren anschließend das AR Display. Die andere Hälfte der Versuchspersonen startete mit dem AR Display. Randomisiert wurde ebenfalls die Reihenfolge der erlebten Verkehrskomplexität.

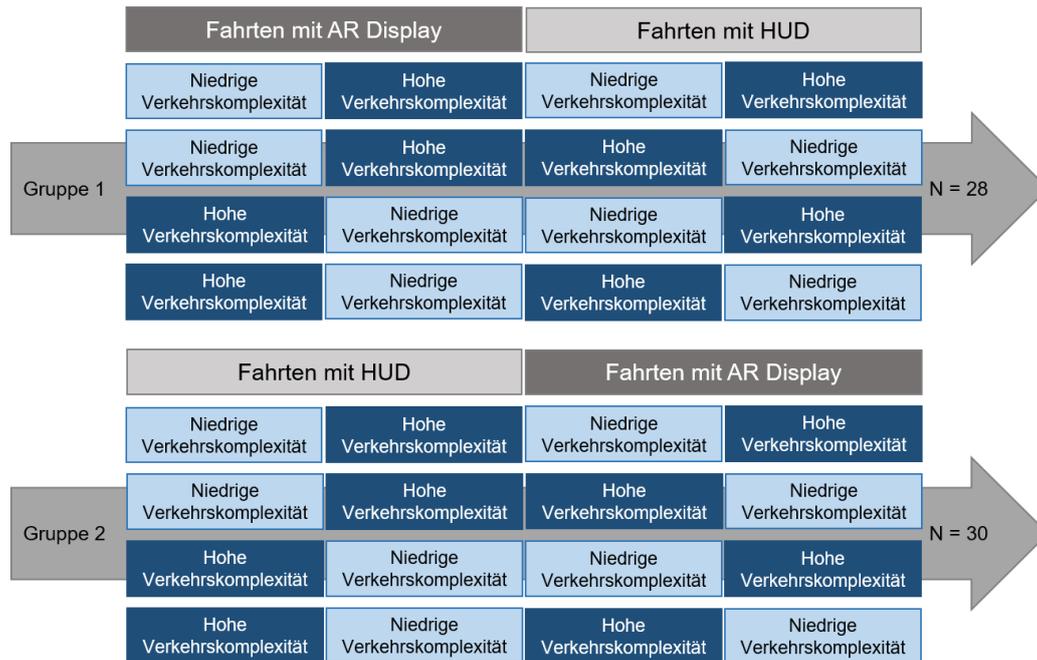


Abbildung 6.2: Untersuchungsdesign der Studie 2. (Bauerfeind et al., 2022), CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Im Rahmen der Fahrsimulatorstudie wurden (1) die Fahrerbeanspruchung, (2) das Blickverhalten, (3) die Fahrleistung und (4) das subjektive Erleben erfasst. Diese Daten wurden für die insgesamt sieben uneindeutigen Abbiegesituationen analysiert. Weitere Daten wurden ausschließlich für die 7. uneindeutige Abbiegesituation, die uneindeutige Linksabiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug, erfasst, da es sich hierbei um eine standardisierte Situation am Ende jeder Fahrt handelte. Die erfassten AVs dieser Studie werden in den beiden folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

Daten der insgesamt sieben uneindeutigen Abbiegungen

Die Tabelle 6.2 und die Abbildung 6.3 geben einen detaillierten Überblick über die erfassten AVs für die sieben uneindeutigen Abbiegungen.

Tabelle 6.2: Überblick über die erfassten Daten der Studie 2 - sieben uneindeutige Abbiegungen (einschließlich der letzten uneindeutigen Linksabbiegung mit entgegenkommenden Fahrzeug).

Datenbezeichnung	Art der Daten	Erklärung
Fahrerbeanspruchung	Leistung in Nebenaufgabe	Häufigkeit korrekter Antworten pro Sekunde [1/s] auf gerade und ungerade Zahlen zur Erfassung der objektiven mentalen Beanspruchung
Blickverhalten	horizontale und vertikale Blickstreuung	Standardabweichung der Blickstreuung entlang der X- und Y-Achse [°] zur Erfassung der visuellen Aufmerksamkeitsstreuung
Navigationsleistung	Navigationsfehler	Anzahl der falsch identifizierten Zielabbiegungen in der Navigationsaufgabe
subjektives Erleben	subjektive Bewertung	Fragebogen nach beiden Fahrten (niedrige vs. hohe Verkehrskomplexität) mit jeweiliger Anzeigeart: <ul style="list-style-type: none"> - Anzeigebewertung - Fahrtbewertung - Wahrgenommene Verkehrskomplexität (Manipulationscheck) - Bewertung der Nebenaufgabe persönliche Angaben vor der Studie: <ul style="list-style-type: none"> - Fragen zur Demographie Abschlussbefragung am Ende der Studie: <ul style="list-style-type: none"> - Anzeigepräferenz

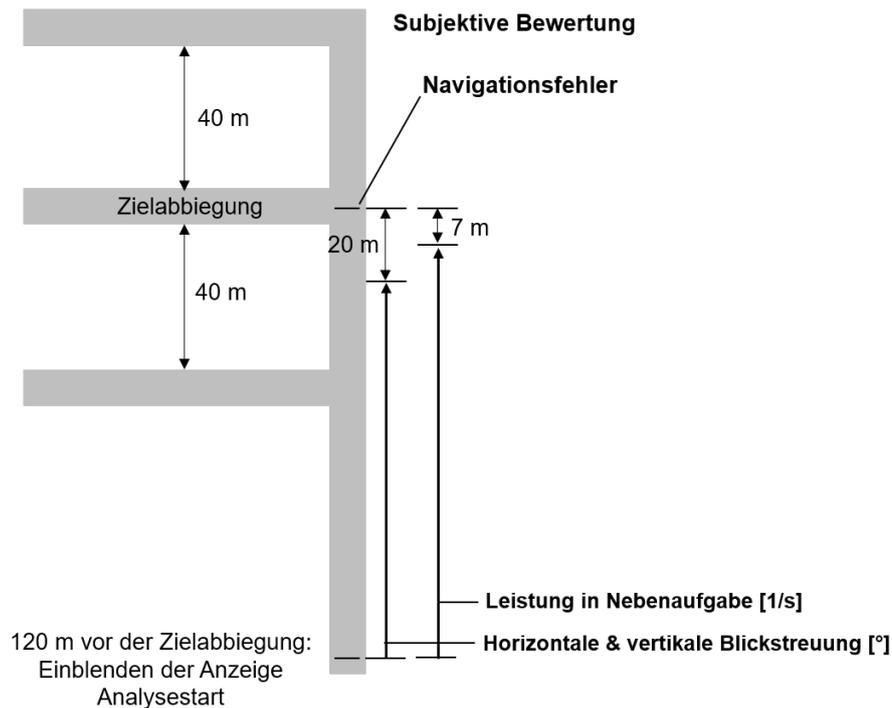


Abbildung 6.3: Exemplarische Darstellungen der Annäherung an eine der sieben uneindeutigen Abbiegesituationen mit den abhängigen Variablen (abhängige Variablen sind in Fett markiert).

Als objektives Maß der Fahrerbeanspruchung wurde die Leistung in einer Nebenaufgabe erfasst (Jahn et al., 2005; Kapitel 5.2.5). Wie in der ersten Studie handelte es sich bei der Nebenaufgabe um eine auditive, kognitive, räumliche Zahlenaufgabe, die zusätzlich zur Fahraufgabe ausgeführt wurde (Kapitel 5.2.3). Unter anderem diente sie dazu, die Schwierigkeit der Fahraufgabe zu erhöhen. Die Versuchspersonen hörten positive Zahlen randomisiert von eins bis neun, auf die sie reagieren sollten (Kapitel 6.2.3). Es handelte sich um eine räumliche Aufgabe, da die Versuchspersonen die Zahlen rechts und links zuordnen mussten. Analysiert wurde die mittlere Häufigkeit korrekter Antworten pro Sekunde. Die Zeit bezog sich auf die verbrachte Zeit im Analysebereich. Startpunkt für den Analysebereich waren 120 m vor der Zielabbiegung als die Navigationsanzeige eingeblendet wurde. Endpunkt der Analyse waren 7 m vor dem jeweiligen Kreuzungsmittelpunkt (Abbildung 6.3), da die Versuchspersonen in diesem Bereich mit der Manöverausführung beschäftigt waren. Außerdem konnte so ein VTD-Trigger, der als Markierung der spezifischen Kreuzung im Fahrscenario diente, als Endpunkt des Analysebereichs verwendet werden. Analysiert wurden alle Antworten auf Zahlen, die in diesem Analysebereich lagen.

Des Weiteren wurde das Blickverhalten untersucht. Fahrende sollten sowohl die Fahrumgebung als auch die präsentierten fahrrelevanten Informationen wahrnehmen. Kommt es zu einer Aufmerksamkeitsbindung bedingt durch die Anzeige, wird vorwiegend diese fixiert (Boston & Braun, 1996; Gish & Staplin, 1995; Kapitel 3.3). Resultierend bleiben Scanning-Blicke der Fahrumgebung aus. Eine Aufmerksamkeitsbindung kann Hinweise auf das Auftreten eines Cognitive-Capture-Effekts liefern. Streuen die Blicke der Fahrenden jedoch über die Fahrumgebung spricht das gegen einen Cognitive-Capture-Effekt. Somit kann die Analyse des Blickverhaltens Aufschluss über die visuelle

Aufmerksamkeitsstreuung während des Suchens und Entscheidens für die richtige Zielabbiegung in Interaktion mit den Navigationsanzeigen geben. Operationalisiert wurde die visuelle Aufmerksamkeitsstreuung über die horizontale und vertikale Blickstreuung (Abbildung 6.4). Berechnet wurde dafür die Standardabweichung der Pupillenposition entlang der X-Achse bzw. der Y-Achse des Fahrerblickfeldes als Maß für die horizontale und vertikale Blickstreuung in der Einheit Grad.

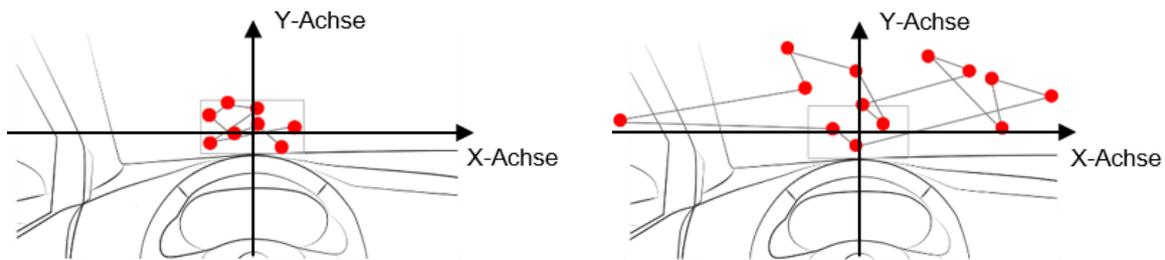


Abbildung 6.4: Schematische Darstellung des Cognitive-Capture-Effekts (links), bei dem es zu einer Aufmerksamkeitsbindung durch die Anzeige kommt. Breite Scanning-Blicke über die Fahrumgebung und die Anzeige und somit kein Cognitive Capture (rechts). Fixationen werden durch Kreise und Sakkaden durch Linien verbildlicht.

Der Startpunkt für den Analysebereich der Blickstreuung war der Punkt, an dem die Navigationsanzeige eingeblendet wurde (120 m vor der Zielabbiegung). Als Endpunkt der Analyse wurden 20 m vor dem jeweiligen Kreuzungsmittelpunkt festgelegt. Eine visuelle Inspektion der Daten zeigte, dass die Versuchspersonen hier die ersten zielgerichteten Blicke für das bevorstehende Abbiegemanöver durchführten. Diese Blicke zählen nicht mehr zum Suchen und Entscheiden für die Zielabbiegung und wurden somit von der Analyse ausgeschlossen.

Die Analyse der Navigationsleistung wurde als Maß der Fahrleistung ermittelt. Unter der Navigationsleistung wurden die Navigationsfehler verstanden. Diese geben Aufschluss über die falsche Identifizierung der richtigen Zielabbiegung. Im Fall eines Navigationsfehlers wurde die Versuchsperson zurück auf die Navigationsstrecke gesetzt.

Neben den objektiven Daten wurden ebenfalls subjektive Daten zur Anzeige- und Fahrtbewertung und der wahrgenommenen Verkehrskomplexität (Manipulationscheck) erhoben (Anhang: Fragebögen Studie 2). Die Tabelle 6.3 gibt einen Überblick über die verschiedenen Fragebögen und den jeweiligen Items. Der Versuchsleiter führte Interviews mit geschlossenen und offenen Fragen durch. Die Beantwortung der Fragen erfolgte auf einer 15-Punkte Kategorienunterteilungsskala (Heller, 1982) (Abbildung 5.4 in Kapitel 5.2.5).

Es wurde das allgemeine Gefallen der Anzeige, der Nutzen (Nützlichkeit, Eignung, Entlastung, Ablenkung), die Funktionalität (Verständlichkeit) der Anzeige sowie die persönliche Meinung (angenehmes Fahren) erfragt. Des Weiteren wurde die Bewertung der Anzeigegestaltung (Gestaltung allgemein, Sichtbarkeit, Positionierung, Größe, Transparenz) erhoben. Die Anstrengung der Nebenaufgabe sowie die Schwierigkeit der Fahraufgabe (Navigationsaufgabe + Nebenaufgabe) wurden ebenfalls bewertet. Die offenen Fragen ergaben keinen Mehrwert zu den geschlossenen Items und werden hier nicht aufgeführt.

Nach den beiden Fahrten in der niedrigen und der hohen Verkehrskomplexität wurde die wahrgenommene Verkehrskomplexität mit der jeweiligen Anzeigeart erfasst. Dazu wurde gefragt, ob die unterschiedliche Verkehrskomplexität bemerkt wurde und die Fahrt mit der stärksten Verkehrskomplexität bestimmt (Manipulationscheck).

Vor und nach dem Versuch wurde das Befinden für einen Prä-Post-Vergleich erhoben, der der Kontrolle des Versuchsleiters hinsichtlich des Wohlbefindens der Versuchspersonen diente (der Fragebogen wurde von Professor Mark Vollrath entwickelt). Vor Studienstart wurde ein Farbttest zur Identifikation einer Rot-Grün-Sehschwäche absolviert (Anhang: Farbttest). Fragen zur Demographie umfassten das Alter, das Geschlecht, wann der Führerschein erworben wurde, die gefahrenen Kilometer im letzten Jahr, das Tragen einer Sehhilfe und das Vorhandensein einer Rechts-Links-Schwäche. Die bisherige Erfahrung mit HUDs wurde ebenfalls erfasst. Am Ende der Studie wurde die Präferenz hinsichtlich der Anzeigeart erfragt.

Tabelle 6.3: Art und Zeitpunkt der Fragebögen mit den Items der Studie 2.

Art und Zeitpunkt des Fragebogens	Kategorie	Items
Fragebogen vor den Versuchsfahrten	Demographie	<ul style="list-style-type: none"> - Geschlecht - Alter - Führerschein erworben - gefahrene Kilometer im letzten Jahr - Sehhilfe - Rechts-Links-Schwäche - Erfahrung mit HUD
	Befinden	<ul style="list-style-type: none"> - momentane Anspannung - momentane Aktivität - momentane positive Stimmung - momentane Leistungsfähigkeit - momentane nach außen Gerichtetheit
Fragebogen nach beiden Versuchsfahrten (niedrige vs. hohe Verkehrskomplexität) mit jeweiliger Anzeigeart	Anzeigebewertung	<ul style="list-style-type: none"> - allgemeines Gefallen der Anzeige - Nutzen (Nützlichkeit, Eignung, Entlastung, Ablenkung) - Funktionalität (Verständlichkeit) - angenehmes Fahren - Anzeigegestaltung (Gestaltung allgemein, Sichtbarkeit, Positionierung, Größe, Transparenz)
	Fahrtbewertung	<ul style="list-style-type: none"> - Schwierigkeit der Fahraufgabe
	Bewertung der Nebenaufgabe	<ul style="list-style-type: none"> - Anstrengung der Nebenaufgabe
	wahrgenommene Verkehrskomplexität (Manipulationscheck)	<ul style="list-style-type: none"> - unterschiedliche Verkehrskomplexität bemerkt - Bestimmung der Fahrt mit der höchsten Verkehrskomplexität
Abschlussbefragung	Anzeigepräferenz	<ul style="list-style-type: none"> - gewünschte Anzeige im eigenen Fahrzeug
	Befinden	<ul style="list-style-type: none"> - s.o.

Zusätzliche Daten der letzten uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug

Neben der Blickstreuung sollten weitere Maße der Untersuchung einer potentiellen Aufmerksamkeitsbindung bedingt durch augmentierte Inhalte dienen. Es stellte sich die Frage, was eine situationsangemessene Aufmerksamkeitsverteilung bedeutet. Dafür wurde am Ende jeder Fahrt eine komplexere Situation analysiert. Bei dieser letzten Abbiegung handelte es sich um eine uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug, welches die Entscheidung es passieren zu lassen oder vor ihm abzubiegen erschwerte (Kapitel 6.2.1). Diese Situation diente der weiteren Analyse einer potentiellen Aufmerksamkeitsbindung insofern, dass ein situationsangemessenes Blick- und Fahrverhalten in Bezug auf das entgegenkommende Fahrzeug untersucht werden konnte.

Analysiert wurde außerdem, ob es mit einem AR Display zu einer reduzierten Blickwechselanzahl zwischen der Anzeige und der Zielabbiegung kommt, da die virtuellen Informationen bereits positionsgenau in der Umwelt verortet sind und die Fahrenden diese somit nicht mehr mental auf die reale Fahrsituation übertragen müssen.

Die Tabelle 6.4 und die Abbildung 6.5 geben einen detaillierten Überblick über die zusätzlich erfassten AVs.

Tabelle 6.4: Überblick über die erfassten Daten der Studie 2 - letzte uneindeutige Linksabbiegung mit entgegenkommendem Fahrzeug am Ende jeder Fahrt.

Datenbezeichnung	Art der Daten	Erklärung
Blickverhalten	Blickdauer auf den Gegenverkehr	Blickdauer [s] auf ein entgegenkommendes Fahrzeug und die Gegenfahrbahn in einer uneindeutigen Linksabbiegung, um deren Aufmerksamkeitszuwendung zu erfassen
	Blickwechselanzahl zwischen Zielabbiegung, Navigationsanzeige und entgegenkommendem Fahrzeug	Häufigkeit der Blickwechsel zwischen Zielabbiegung und Anzeige zur Erfassung eines mentalen Abgleichs zwischen virtueller Navigationsinformation und Umwelt Weitere Analysen zwischen: entgegenkommendem Fahrzeug und Zielabbiegung; entgegenkommendem Fahrzeug und Anzeige
Fahrleistung	Abbiegeverhalten	Abbiegehäufigkeit hinsichtlich vor vs. hinter entgegenkommendem Fahrzeug
subjektives Erleben	subjektive Bewertung	Fragebogen nach jeder Fahrt zur uneindeutigen Linksabbiegung mit entgegenkommendem Fahrzeug: <ul style="list-style-type: none"> - Anzeigebewertung - Bewertung der Abbiegesituation - Bewertung der Nebenaufgabe

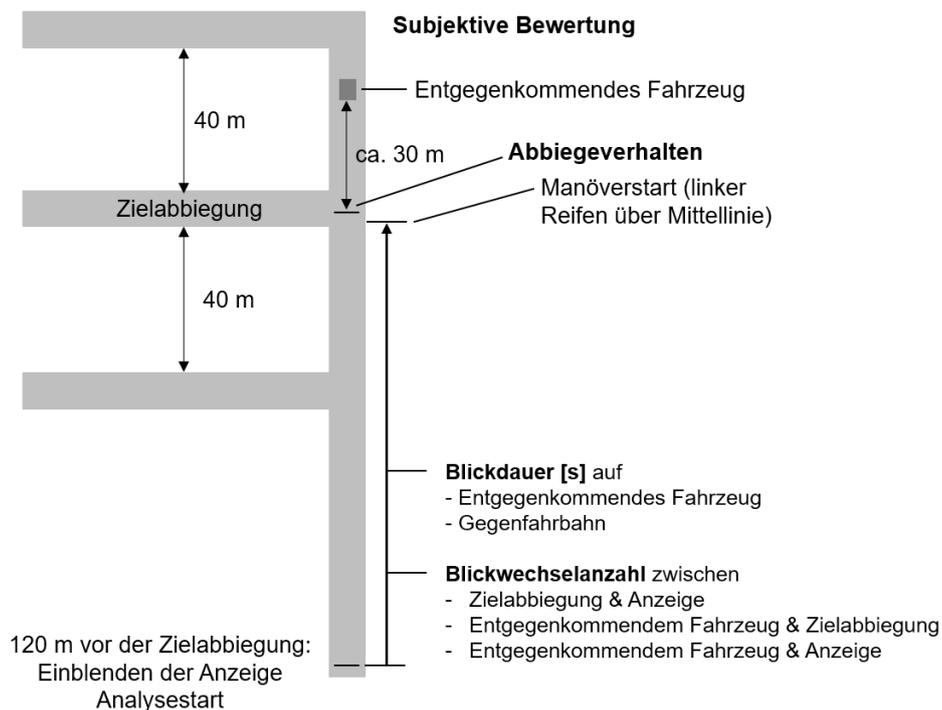


Abbildung 6.5: Exemplarische Darstellungen der Annäherung an die letzte uneindeutige Linksabbiegung mit entgegenkommendem Fahrzeug mit den zusätzlich ausgewerteten abhängigen Variablen (abhängige Variablen sind in Fett markiert). Modifiziert nach Bauerfeind et al. (2022), CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Für die Analyse der Aufmerksamkeitszuwendung auf ein entgegenkommendes Fahrzeug (Abbildung 6.6 links) und die Gegenfahrbahn (Abbildung 6.6 rechts) wurde die Blickdauer auf diese erfasst und jeweils aufsummiert. Der Startpunkt für den Analysebereich war 120 m vor der Zielabbiegung, an dem die Navigationsanzeige eingeblendet wurde. Als Endpunkt wurde der Moment des Manöverstarts, linker Reifen fährt über die Mittellinie, festgelegt. Somit konnte sichergestellt werden, dass alle Blicke auf das entgegenkommende Fahrzeug bzw. die Gegenfahrbahn bis zum Manöverstart in der Analyse Berücksichtigung finden.

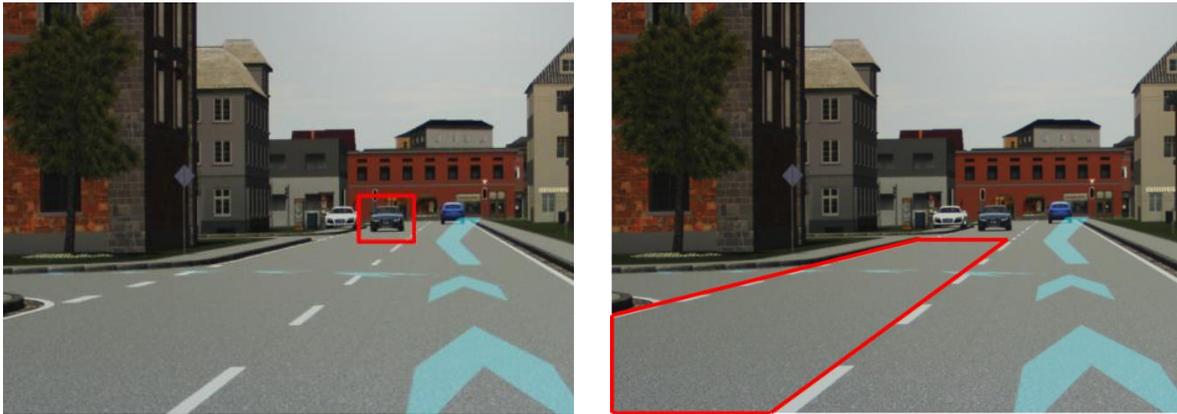


Abbildung 6.6: Ausschnitt aus der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug am Ende jeder Versuchsfahrt. Blicke in den rot markierten Bereich zählen als Blicke auf das entgegenkommende Fahrzeug (links, modifiziert nach Bauerfeind et al., 2022, CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) bzw. die Gegenfahrbahn (rechts)).

Im Rahmen der Analyse des Blickverhaltens in der uneindeutigen Linksabbiegung wurde außerdem die Blickwechselanzahl zwischen (1) der Navigationsanzeige und der Zielabbiegung erfasst (Abbildung 6.7), um einen mentalen Abgleich (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017) zwischen virtueller Navigationsinformation und der Umwelt zu untersuchen. Des Weiteren wurden auch Blickwechsel zwischen (2) dem entgegenkommenden Fahrzeug und der Zielabbiegung und (3) dem entgegenkommenden Fahrzeug und der Navigationsanzeige untersucht. Der Startpunkt für den Analysebereich war 120 m vor der Zielabbiegung, an dem die Navigationsanzeige eingeblendet wurde. Als Endpunkt wurde der Moment des Manöverstarts, linker Reifen fährt über die Mittellinie, festgelegt. Somit konnte sichergestellt werden, dass alle Blickwechsel bis zum Manöverstart in der Analyse Berücksichtigung finden.

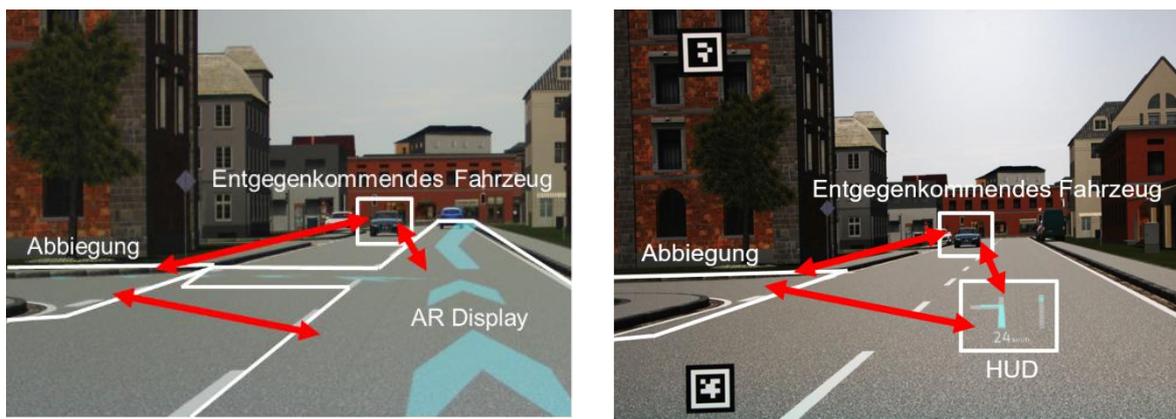


Abbildung 6.7: Markierte Bereiche für die Erfassung der Häufigkeit der Blickwechsel zwischen dem entgegenkommenden Fahrzeug, der Abbiegung und der Anzeige für die beiden Anzeigearten AR Display (links) und HUD (rechts). Modifiziert nach Bauerfeind et al. (2022), CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Die Abbiegeentscheidung in der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug wurde als Maß für ein angemessenes Fahrverhalten erfasst. Die Fahrenden wurden mit der Entscheidung konfrontiert vor diesem abzubiegen oder ihn

passieren zu lassen. Dieses war so programmiert, dass es ca. 30 m von der Versuchsperson entfernt war als dieser abbiegen wollte. Somit wurde gezählt, wie oft sich Versuchspersonen das erste Mal in dieser Situation für das Abbiegen hinter bzw. vor dem entgegenkommenden Fahrzeug entschieden.

Nach jeder Fahrt wurde eine Befragung hinsichtlich der letzten Abbiegesituation, der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug, durchgeführt (Tabelle 6.5, Anhang: Fragebögen Studie 2: Bewertung der letzten Abbiegesituation). In dieser wurde die Abbiegesituation im Allgemeinen erfasst. Dazu zählte die Schwierigkeit der Abbiegesituation, die Beachtung des Gegenverkehrs, die Leichtigkeit der Entscheidung für das Abbiegen vor bzw. hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug und die Beanspruchung durch die Nebenaufgabe. Des Weiteren wurde der Nutzen der Anzeige für diese Situation erhoben. Dazu zählten Fragen bezüglich der Nützlichkeit, der Hilfe durch die Anzeige, der Entlastung, der Ablenkung und der Störung der Überlagerung durch die AR-Informationen. Es wurde auch die Funktionalität in Form der Verständlichkeit der Anzeige bewertet.

Tabelle 6.5: Items des Fragebogens für die uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug.

Zeitpunkt des Fragebogens	Kategorie	Items
Fragebogen nach jeder Versuchsfahrt	Bewertung der Abbiegesituation	- Schwierigkeit der Abbiegesituation - Beachtung des Gegenverkehrs - Leichtigkeit der Entscheidung für das Abbiegen vor bzw. hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug
	Bewertung der Nebenaufgabe	- Beanspruchung durch die Nebenaufgabe
	Anzeigebewertung	- Nutzen (Nützlichkeit, Anzeige hilfreich, Entlastung, Ablenkung, störende Überlagerung der AR-Informationen) - Funktionalität (Verständlichkeit)

6.2.6 Fahrsimulator und Eye-Tracker

Für die Durchführung der Studie kam ein statischer Fahrsimulator mit Mockup von der Volkswagen Group Innovation (Abbildung 6.8) zum Einsatz. Die Sitzkiste bestand aus einer angedeuteten Motorhaube, dem Fahrersitz, dem Beifahrersitz, einem Lenkrad und der Pedalerie. Es handelte sich um ein Automatikgetriebe. Das Kombi-Display zeigte die Drehzahl und die Geschwindigkeit an. Für ein realitätsnahes Erleben der Fahrsituation wurden Fahrgeräusche relativ zur Beschleunigung abgespielt. Für die Studie wurden fünf Leinwände verwendet, die 3.5 m vom Auge der Versuchsperson entfernt waren. Die Höhe des Bildes auf den Leinwänden betrug 1.9 m mit einer Auflösung von 1920 x 1200 Pixeln. Durch die fünf Leinwände konnte ein Blickfeld von 180° erreicht werden (Abbildung 6.8 rechts). Die Simulationsstrecken wurden mit der Simulationssoftware Virtual Test Drive (VTD, Hexagon AB, 2021b) realisiert. Das AR Display und das HUD wurden mit der Software UNITY erstellt. Die Anzeigen wurden über einen zweiten Projektor angezeigt.

Um das Blickverhalten zu erfassen, wurde ein binokularer Eye-Tracker, Dikablis Glasses 2 von Ergoneers (Kansteiner, 2014) verwendet (Abbildung 6.8 links). Es handelte sich um ein Head-Mounted-System, welches mit einer Frequenz von 60 Hertz aufzeichnete. Neben der Feldkamera, die das Sichtfeld der Versuchsperson erfasste, waren zwei Kameras auf die Augen der Versuchsperson gerichtet.

Die randomisierten Zahlen der Nebenaufgabe wurden über den ADTF Fahrsimulator abgespielt. Dafür wurde ein Lautsprecher vor dem Mockup positioniert. Die Dateneingabe erfolgte über die Lenkradtasten.



Abbildung 6.8: Statische Sitzkiste der Group Innovation der Volkswagen AG (links) vor fünf Leinwänden (rechts, mit Genehmigung der Volkswagen AG, 2020). Zur Erfassung des Blickverhaltens trug die Versuchsperson eine Eye-Tracking Brille von Ergoneers (Kansteiner, 2014). (Bauerfeind et al., 2022), CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

6.2.7 Versuchsaufbau

Nachdem die Versuchspersonen eine Datenschutzerklärung unterschrieben hatten, absolvierten sie einen Farbttest zur Identifikation einer Rot-Grün-Sehchwäche. In der Sitzkiste sitzend füllten die Versuchspersonen eine Vorbefragung zu persönlichen Daten und Angaben über das eigene Fahrverhalten aus. Anschließend wurde der Eye-Tracker auf ihrem Kopf justiert und kalibriert. Es folgte die Erklärung der primären Fahraufgabe: Die richtige Route mit Hilfe von Navigationshinweisen in der Anzeige zu finden. Die beiden Anzeigearten (HUD vs. AR Display) wurden den Versuchspersonen mit Bildmaterial gezeigt und erklärt. Es folgten Übungsfahrten mit beiden Anzeigearten bis die Versuchspersonen beide Anzeigen verstanden und die Zielabbiegungen in den Übungsfahrten richtig identifizieren konnten. Im nächsten Schritt erlernten die Versuchspersonen die auditive, kognitive, räumliche Nebenaufgabe. Dazu wurden die Versuchspersonen hinsichtlich der Knöpfe am Lenkrad instruiert, um die Nebenaufgabe zu beantworten. Die Nebenaufgabe wurde ohne und im Anschluss mit der primären Fahraufgabe trainiert. Für die nachfolgenden Versuchsfahrten wurde die Reihenfolge der Anzeigearten (HUD vs. AR Display) und die der Verkehrskomplexitäten (niedrig vs. hoch) randomisiert. Im Fall eines Navigationsfehlers während der Versuchsfahrten wurden die Versuchspersonen über ihre Fehler informiert und wieder zurück auf die Navigationsstrecke gesetzt. Sowohl nach jeder Fahrt (niedrige vs. hohe Verkehrskomplexität) als auch nach beiden Fahrten je Anzeigeart wurde ein Interview durchgeführt. Für die Beantwortung wurde eine 15-Punkte Kategorienunterteilungsskala (Heller, 1982) (Abbildung 5.4) auf

einem ausgedruckten Blatt benutzt. Nach den Fahrten wurden den Versuchspersonen der Eye-Tracker abgenommen. Es folgte eine Abschlussbefragung. Nachdem die Versuchspersonen als Dankeschön ein Geschenk erhalten hatten, wurden sie verabschiedet. Der Versuch dauert jeweils 120 Minuten pro Versuchsperson.

6.3 Ergebnisse der insgesamt sieben uneindeutigen Abbiegungen

6.3.1 Datenaufbereitung und -auswertung

Im Folgenden wird das Vorgehen der Analysen der einzelnen Daten beschrieben. Technische Probleme führten zu reduzierten Datensätzen in einzelnen Analysen. Für die interferenzstatistische Auswertung wurde ein Signifikanzniveau von 5% angenommen. Die varianzstatistische Analyse wird als robust gegenüber Verletzungen der Normalverteilung angesehen (Blanca et al., 2017; Schmider, et al., 2010).

Die Fahrerbeanspruchung wurde über die Leistung in einer kognitiv beanspruchenden Zahlenaufgabe operationalisiert. Es konnten Datensätze von 57 Versuchspersonen berücksichtigt werden. Ausgewertet wurde, ob die Antworten auf die auditiven Zahlen korrekt oder inkorrekt (falsche Zuordnung oder nicht beantwortet) waren. Analysiert wurde die mittlere Häufigkeit korrekter Antworten pro Sekunde für die Annäherung an die uneindeutigen Abbiegesituationen. Da die Annäherungsgeschwindigkeit an die Zielabbiegung zwischen den Probanden variieren konnte, variierte auch die verbrachte Zeit im Analysebereich und damit die Anzahl der abgespielten Zahlen. Es wird davon ausgegangen, dass die gefahrene Geschwindigkeit Einfluss auf die Leistbarkeit der Nebenaufgabe hat. Folglich wurde sich dazu entschieden, die verbrachte Zeit im Analysebereich in der Analyse zu berücksichtigen. Das Intervall der gesagten Zahlen betrug 3 Sekunden. Wenn die erste auszuwertende Zahl gleich bei Einfahrt in den Analysezeitraum abgespielt wurde, und die Versuchsperson alle Zahlen im Analysebereich richtig beantwortete, wurde eine Rate von 0.33 1/s erwartet. Analysiert wurden alle Antworten auf Zahlen, die im Analysebereich (Kapitel 6.2.5) lagen. Wurde eine Zahl vor dem Analysebereich abgespielt, wurde die dazugehörige Antwort nicht in der Analyse berücksichtigt. Des Weiteren musste die Antwort auf die letzte Zahl im Analysebereich vor dem Ende des Analysebereichs erfolgt sein. Blieb keine Zeit zur Beantwortung der letzten Zahl im Analysebereich, wurde die abgespielte Zahl inklusive der Antwort der Versuchsperson nicht in der Analyse berücksichtigt. Für jede Versuchsperson wurde ein Mittelwert der Ergebnisse der sieben uneindeutigen Abbiegesituationen je Anzeigeart und Verkehrskomplexität gebildet. Die varianzstatistische Analyse erfolgte in Form einer rmANOVA. Es wurden die Faktoren Anzeigeart (HUD, AR Display) und Verkehrskomplexität (niedrig, hoch) berücksichtigt. Es konnte von einer Intervallskalierung durch die Einheit ausgegangen werden. Das partielle Eta-Quadrat wurde berechnet. Die Analysen wurde mit der Software IBM SPSS Statistics 19 durchgeführt.

Im Rahmen der Analyse der Blickstreuung konnten Datensätze von 52 Versuchspersonen berücksichtigt werden. Die Aufbereitung der Blickdaten erfolgte mit der Software D-Lab (Ergoneers GmbH, 2022b). Als erstes wurden die zu analysierenden Zeiträume markiert. Im Rahmen der Aufbereitung der Daten wurden Fehler in der Pupillenerkennung und nicht erkannte Frames händisch korrigiert. Aus den Rohdaten der Blickkoordinaten erfolgte die Berechnung der Standardabweichungen der Pupillenposition entlang der X-Achse bzw. der

Y-Achse als Maß für die horizontale bzw. vertikale Blickstreuung in der Einheit Grad für die zu analysierenden Abbiegesituationen. Dazu diente das statische Koordinatensystem der Eye-Tracking-Brille als Grundlage. In die Analyse flossen getrennt nach der Verkehrskomplexität und der Anzeigart die Daten der sieben uneindeutigen Abbiegesituationen. Die statistische Analyse erfolgte in Form von rmANOVA mit der Software IBM SPSS Statistics 19. In den einzelnen Analysen wurden die Faktoren Anzeigart (HUD, AR Display) und Verkehrskomplexität (niedrig, hoch) berücksichtigt. Es konnte von einer Intervallskalierung durch die Einheit ausgegangen werden. Das partielle Eta-Quadrat wurde berechnet.

Die Analyse der Fahrleistung beinhaltet die Navigationsfehler ($N = 58$). Die Daten wurden mit einem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test in der Software IBM SPSS Statistics 19 analysiert. Die Effektstärke r wurde berechnet.

Neben den Verhaltensdaten wurden auch subjektive Daten erfasst ($N = 58$). Die Daten wurden mit rmANOVAs mit dem Faktor Anzeigart (HUD, AR Display) und dem Zwischensubjektfaktor Reihenfolge der Anzeigart (beginnend mit dem HUD vs. beginnend mit dem AR Display) ausgewertet. Es konnte von Intervallskalierungen durch die Antwortformate ausgegangen werden. Das partielle Eta-Quadrat wurde berechnet. Die Analyse wurde mit der Software IBM SPSS Statistics 19 durchgeführt.

6.3.2 Fahrerbeanspruchung

Im Rahmen der Analyse der Fahrerbeanspruchung zeigte die Anzeigart einen signifikanten Einfluss auf die mittlere Häufigkeit korrekter Aufgaben ($F(1, 56) = 17.68, p < .001, \eta_p^2 = .24$). Mit dem AR Display beantworteten die Versuchspersonen mehr Aufgaben korrekt als mit dem HUD (Tabelle 6.6). Pro Sekunde beantworteten die Versuchspersonen mit dem AR Display durchschnittlich 0.23 Zahlen ($SD = 0.04$) korrekt, während es mit dem HUD 0.21 Zahlen ($SD = 0.05$) waren.

Auch die Verkehrskomplexität zeigte einen signifikanten Einfluss auf die mittlere Häufigkeit korrekter Aufgaben ($F(1, 56) = 22.17, p < .001, \eta_p^2 = .28$). In der hohen Verkehrskomplexität wurden mehr Aufgaben korrekt ($M = 0.23; SD = 0.04$) als in der niedrigen Verkehrskomplexität ($M = 0.21; SD = 0.04$) beantwortet. Es zeigte sich kein Interaktionseffekt zwischen der Anzeigart und der Verkehrskomplexität ($F(1, 56) = 0.70, p > .10, \eta_p^2 = .01$).

Tabelle 6.6: Mittelwert und Standardabweichung für die mittlere Häufigkeit korrekter Antworten [1/s] für die sieben Abbiegungen, getrennt nach der Anzeigeart und der Verkehrskomplexität.

Anzeigeart	Verkehrskomplexität	M [1/s]	SD [1/s]
AR	Niedrig	0.22	0.04
	Hoch	0.24	0.04
HUD	Niedrig	0.20	0.05
	Hoch	0.22	0.05

Anmerkung. $N = 57$. Das Intervall der Nebenaufgabe betrug 3 Sekunden. Wenn die erste auszuwertende Zahl gleich bei Einfahrt in den Analysezeitraum abgespielt wurde und die Versuchsperson alle Zahlen im Analysebereich richtig beantwortete, wurde eine Rate von 0.33 1/s erwartet.

6.3.3 Blickverhalten

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Blickstreuung vorgestellt. Durchschnittlich streuten die Blicke der Versuchspersonen horizontal zwischen 4.22° bis 4.47° . Weder die Anzeigeart ($F(1, 51) = 0.64, p > .10, \eta_p^2 = .01$) noch die Verkehrskomplexität ($F(1, 51) = 0.02, p > .10, \eta_p^2 = .00$) hatten einen Einfluss auf die horizontale Blickstreuung (Tabelle 6.7, Abbildung 6.9). Es zeigte sich kein Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Verkehrskomplexität ($F(1, 51) = 0.06, p > .10, \eta_p^2 = .00$).

Hinsichtlich der vertikalen Blickstreuung zeigte die Anzeigeart ($F(1, 51) = 5.99, p < .05, \eta_p^2 = .11$) einen signifikanten Einfluss (Abbildung 6.10). Mit dem HUD kam es zu einer höheren vertikalen Blickstreuung ($M = 2.54^\circ; SD = 1.61^\circ$) als mit dem AR Display ($M = 2.07^\circ; SD = 0.89^\circ$) (Tabelle 6.7). Die Verkehrskomplexität hatte keine Auswirkung auf die vertikale Blickstreuung ($F(1, 51) = 1.46, p > .10, \eta_p^2 = .03$). Die Interaktion zwischen der Anzeigeart und der Verkehrskomplexität war statistisch nicht bedeutsam ($F(1, 51) = 0.66, p > .10, \eta_p^2 = .01$).

Tabelle 6.7: Mittelwert und Standardabweichung für die mittlere Standardabweichung der Pupillenposition entlang der X-Achse [°] als Maß für die horizontale Blickstreuung und der Pupillenposition entlang der Y-Achse [°] als Maß für die vertikale Blickstreuung, getrennt nach der Anzeigart und der Verkehrskomplexität.

Richtung der Blickstreuung und Anzeigart	Verkehrskomplexität	M [°]	SD [°]
Horizontale Blickstreuung			
AR	Niedrig	4.22	2.33
	Hoch	4.30	1.97
HUD	Niedrig	4.47	2.49
	Hoch	4.46	1.88
Vertikale Blickstreuung			
AR	Niedrig	2.07	1.09
	Hoch	2.07	0.93
HUD	Niedrig	2.32	0.83
	Hoch	2.75	3.05

Anmerkung. N = 52.

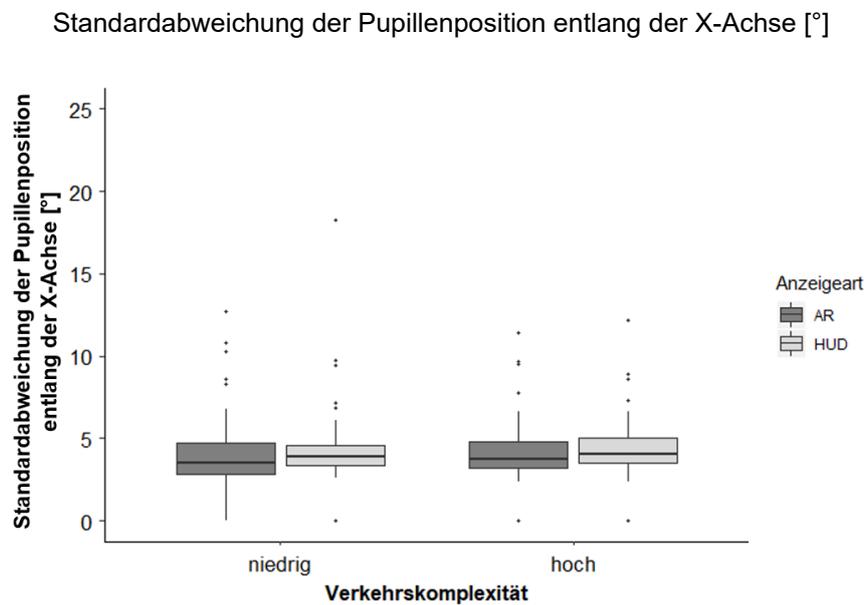


Abbildung 6.9: Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der X-Achse (horizontale Blickstreuung) in Grad (N = 52).

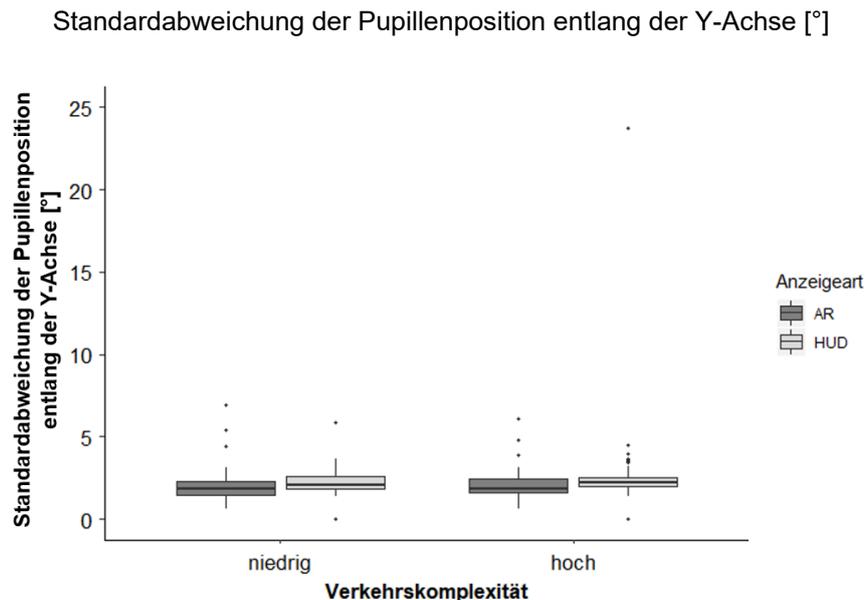


Abbildung 6.10: Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der Y-Achse (vertikale Blickstreuung) in Grad (N = 52).

6.3.4 Fahrleistung

Im Rahmen der Analyse der Fahrleistung wurden die Navigationsfehler untersucht. Die Ergebnisse der Navigationsfehler zeigen, dass die Versuchspersonen mit dem AR Display ($Mdn = 0.00$) signifikant weniger Fehler machten als mit einem HUD ($Mdn = 0.00$), ($z = -2.98$, $p < .05$, $r = -.28$) (Abbildung 6.11). Mit dem AR Display machten vier Versuchspersonen einen Navigationsfehler, wohingegen 15 Versuchspersonen Navigationsfehler mit dem HUD verursachten. Des Weiteren wurde mit dem AR Display niemals mehr als ein Fehler gemacht. Jedoch zeigte sich, dass die Versuchspersonen mit dem HUD mehr Navigationsfehler in der niedrigen als in der hohen Verkehrskomplexität machten (Tabelle 6.8). Eine nähere Analyse verdeutlichte, dass dies besonders durch zwei Versuchspersonen verursacht wurde, die das HUD in der niedrigen Verkehrskomplexität als erstes erlebten und an der ersten uneindeutigen Abbiegung bis zu 3 Fehler verursachten.

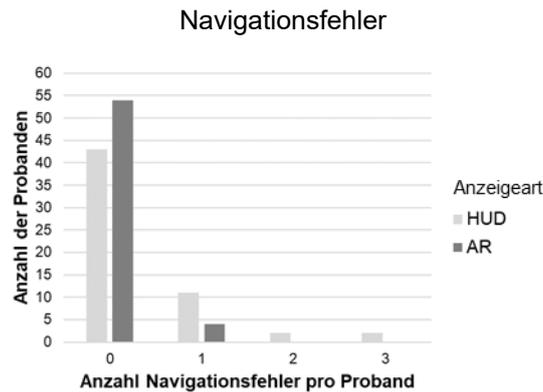


Abbildung 6.11: Anzahl der Navigationsfehler (falsche Zielabbiegung identifiziert) aller Versuchspersonen (N = 58).

Tabelle 6.8: Anzahl der Navigationsfehler, getrennt nach der Anzeigart und der Verkehrskomplexität.

	AR	HUD
Niedrige Verkehrskomplexität	2	13
Hohe Verkehrskomplexität	2	8

Anmerkung. N = 58.

6.3.5 Subjektive Bewertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der subjektiven Evaluation vorgestellt. Angemerkt wird, dass ausschließlich im Fall signifikanter Zwischensubjekteffekte (erlebte Reihenfolge der Anzeigart) bzw. signifikanter Interaktionseffekte zwischen der Anzeigart und der erlebten Reihenfolge (beginnend mit dem HUD vs. beginnend mit dem AR Display) der Anzeigart auf diese verwiesen wird.

Nach den Fahrten in der niedrigen und der hohen Verkehrskomplexität, bewerteten die Versuchspersonen die jeweilige Anzeigart. Bezüglich des Gefallens zeigte sich ein Haupteffekt zwischen den beiden Anzeigarten ($F(1, 56) = 23.98, p < .001, \eta_p^2 = .30$). Demnach gefiel den Versuchspersonen das AR Display signifikant besser als das HUD (AR Display: $M = 12.1, SD = 2.3$; HUD: $M = 10.0, SD = 2.3$) (Abbildung 6.12 a) (siehe Anhang: Fragebögen Studie 2 für die spezifischen Antwortkategorien). Die Versuchspersonen empfanden das Fahren mit dem AR Display ebenfalls als angenehmer für die Navigationsaufgabe als mit dem HUD (AR Display: $M = 12.3, SD = 2.0$; HUD: $M = 10.3, SD = 2.2$) (Abbildung 6.12 b) ($F(1, 56) = 25.12, p < .001, \eta_p^2 = .31$). Die Ergebnisse zeigten außerdem einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Anzeigarten angesichts der Verständlichkeit ($F(1, 56) = 56.08, p < .001, \eta_p^2 = .50$). Dementsprechend bewerteten die Versuchspersonen das AR Display als verständlicher für die Navigationsaufgabe als das HUD (AR Display: $M = 13.0, SD = 1.8$; HUD: $M = 10.0, SD = 2.3$) (Abbildung 6.12 c). Hinsichtlich der Verständlichkeit zeigte sich ein Reihenfolgeeffekt der erlebten Anzeigart ($F(1, 56) = 4.94, p < .05, \eta_p^2 = .08$). Die Versuchspersonen, die zuerst das AR Display erlebten, bewerteten das HUD weniger verständlich als die Gruppe, die zuerst mit dem HUD fuhr. Des Weiteren bewerteten die Versuchspersonen das AR Display als entlastender

als das HUD (AR Display: $M = 11.4$, $SD = 2.8$; HUD: $M = 8.9$, $SD = 3.1$) (Abbildung 6.12 d) ($F(1, 56) = 28.32$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .34$). Auch bezüglich der Nützlichkeit zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt ($F(1, 56) = 25.93$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .32$). Die Versuchspersonen bewerteten das AR Display als nützlicher als das HUD (AR Display: $M = 12.5$, $SD = 2.1$; HUD: $M = 10.6$, $SD = 2.2$) (Abbildung 6.12 e). Außerdem wurde das AR Display als geeigneter für die Navigationsaufgabe wahrgenommen als das HUD (AR Display: $M = 12.8$, $SD = 1.8$; HUD: $M = 10.9$, $SD = 2.2$) (Abbildung 6.12 f) ($F(1, 56) = 27.83$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .33$).

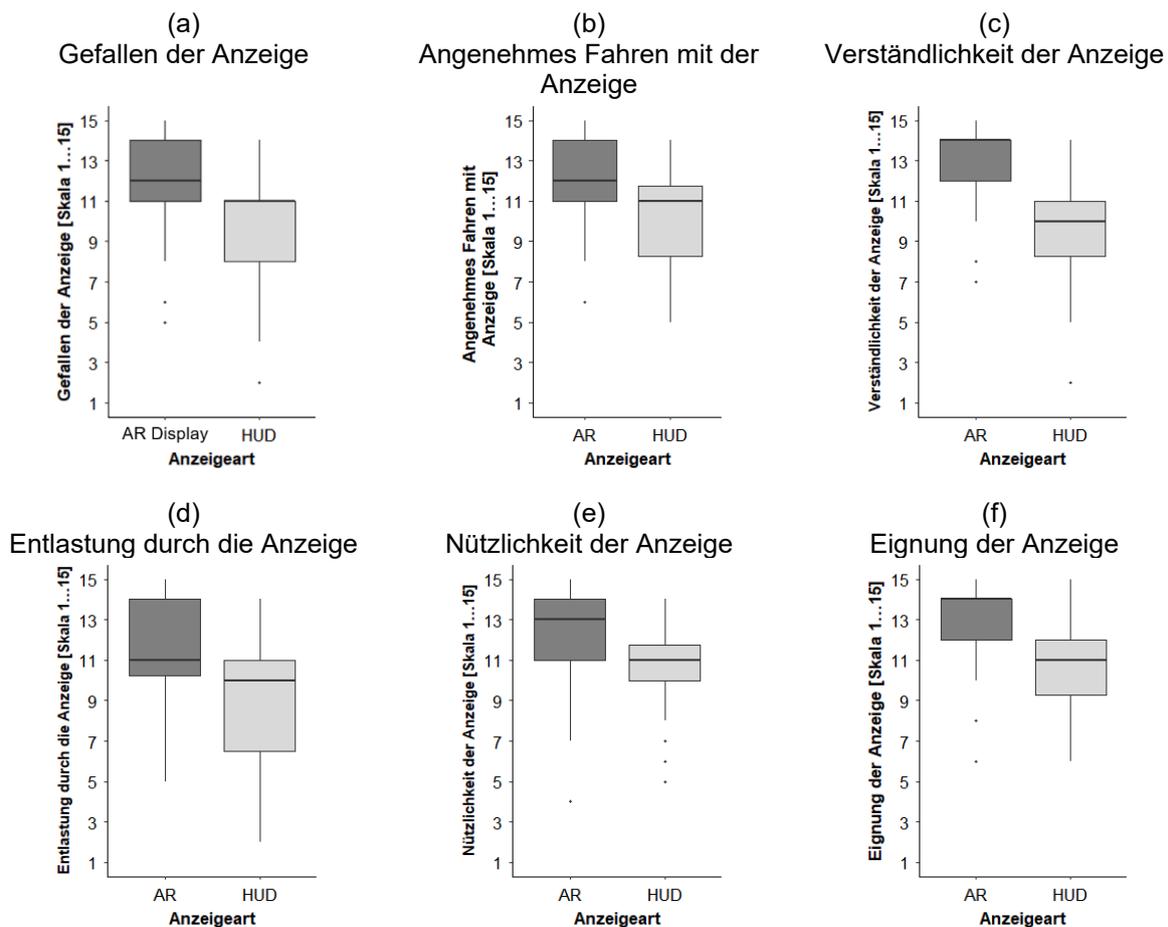


Abbildung 6.12: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich des Gefallens der Anzeige, des angenehmen Fahrens mit der Anzeige, der Verständlichkeit der Anzeige, der Entlastung durch die Anzeige, der Nützlichkeit der Anzeige und der Eignung der Anzeige für die Navigationsaufgabe ($N = 58$), (1: niedrige Zustimmung, 15: hohe Zustimmung auf dem jeweiligen Item).

Die Abbildung 6.13 zeigt, dass sich die beiden Anzeigertypen bezüglich der Ablenkung durch die Anzeige unterscheiden ($F(1, 56) = 21.59$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .28$). Die Versuchspersonen bewerteten das AR Display als weniger ablenkend als das HUD (AR Display: $M = 4.4$, $SD = 2.0$; HUD: $M = 6.3$, $SD = 2.7$).

Ablenkung durch die Anzeige

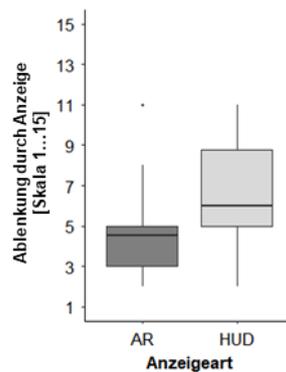


Abbildung 6.13: Boxplot der subjektiven Evaluation bezüglich der Ablenkung durch die Navigationsanzeige während der Fahrt ($N = 58$), (1: sehr wenig abgelenkt, 15: sehr stark abgelenkt).

Des Weiteren wurde auch die Gestaltung der Anzeige bewertet. Hinsichtlich der Anzeigegestaltung zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt ($F(1, 56) = 27.97, p < .001, \eta_p^2 = .33$). Demnach gefiel den Versuchspersonen die Gestaltung des AR Displays besser als die des HUDs (AR Display: $M = 11.48, SD = 2.23$; HUD: $M = 9.10, SD = 2.49$) (Abbildung 6.14 a). Des Weiteren bewerteten sie die Sichtbarkeit des AR Displays signifikant besser als die des HUDs (AR Display: $M = 12.29; SD = 1.91$; HUD: $M = 10.52; SD = 2.52$; $F(1, 56) = 16.88, p < .001, \eta_p^2 = .23$) (Abbildung 6.14 b). Es zeigte sich außerdem ein signifikanter Haupteffekt bezüglich der Positionierung der Anzeige im Blickfeld ($F(1, 56) = 13.59, p = .001, \eta_p^2 = .20$). Demnach präferierten die Versuchspersonen die Positionierung der AR-Anzeige gegenüber der des HUDs (AR Display: $M = 12.62; SD = 1.82$; HUD: $M = 10.97; SD = 2.57$) (Abbildung 6.14 c). Außerdem bewerteten sie die Größe des AR Displays besser als die des HUDs (AR Display: $M = 11.43; SD = 2.69$; HUD: $M = 10.14; SD = 3.08$; $F(1, 56) = 4.74, p < .05, \eta_p^2 = .08$) (Abbildung 6.14 d). Es zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Haupteffekt hinsichtlich der Transparenz der Anzeige ($F(1, 56) = 0.04, p > .10, \eta_p^2 = .00$). Demnach gefiel den Versuchspersonen die Transparenz des AR Displays besser als die des HUDs (AR Display: $M = 10.90; SD = 2.74$; HUD: $M = 10.98; SD = 2.07$) (Abbildung 6.14 e).

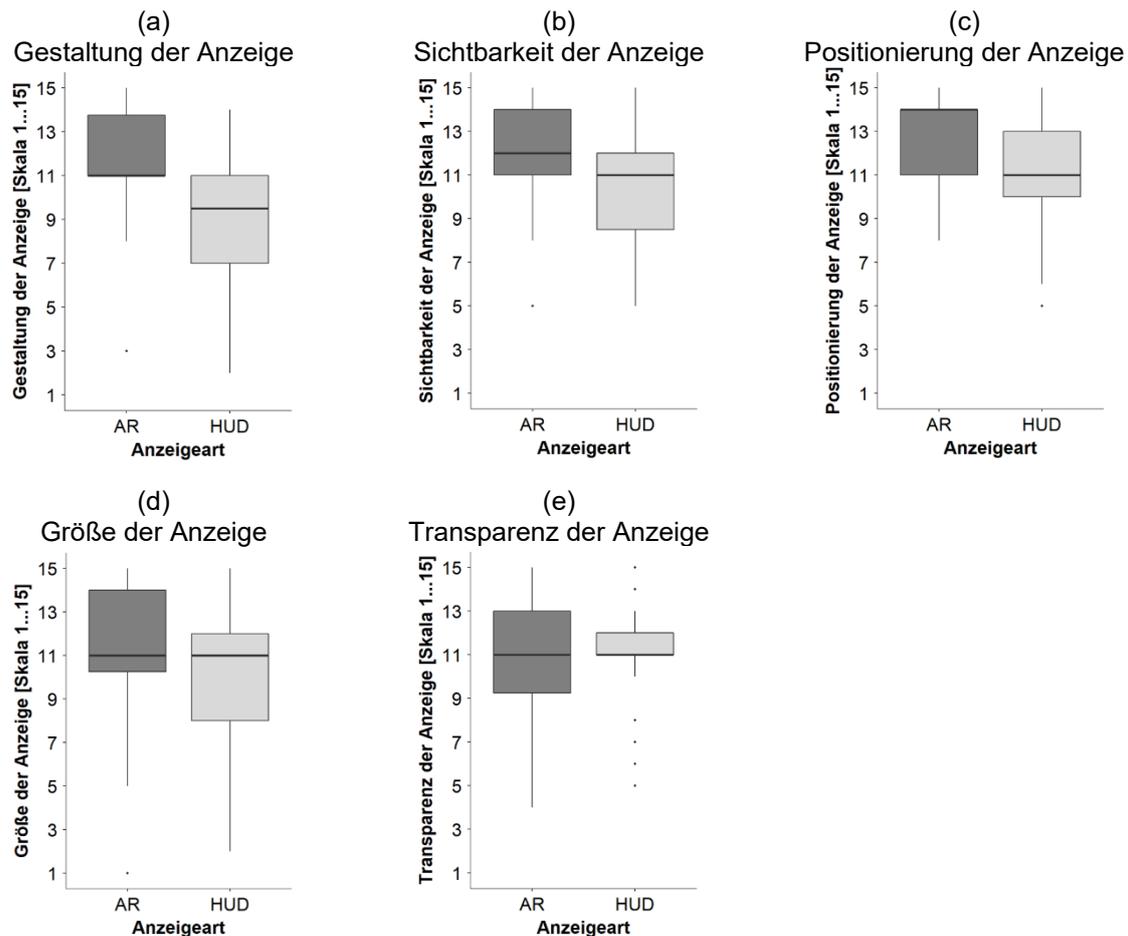


Abbildung 6.14: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich des Gefallens der Gestaltung, der Sichtbarkeit, der Positionierung, der Anzeigegröße und der Transparenz ($N = 58$), (1: niedrige Zustimmung, 15: hohe Zustimmung auf dem jeweiligen Item).

Nach den beiden Fahrten (niedrige und hohe Verkehrscomplexität) je Anzeigart bewerteten die Versuchspersonen auch die Schwierigkeit der Fahraufgabe und die Anstrengung der Nebenaufgabe. Es zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt der Anzeigart hinsichtlich der Schwierigkeit der Fahraufgabe ($F(1, 56) = 13.04$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .19$). Demnach bewerteten die Versuchspersonen die Fahraufgabe mit dem AR Display als leichter als mit dem HUD (AR Display: $M = 6.7$, $SD = 2.0$; HUD: $M = 7.8$, $SD = 2.2$) (Abbildung 6.15 a). Eine hybride Interaktion zwischen der Anzeigart und der Reihenfolge zeigte, dass der Haupteffekt der Anzeigart global interpretierbar ist ($F(1, 56) = 5.28$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .09$) (Abbildung 6.15 b).

Hinsichtlich der Anstrengung durch die Nebenaufgabe zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied in der Anzeigart ($F(1, 56) = 5.28$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .09$; AR Display: $M = 7.4$, $SD = 2.4$; HUD: $M = 8.1$, $SD = 2.6$; Abbildung 6.15 c). Jedoch verwies eine disordinale Interaktion zwischen der Anzeigart und der Reihenfolge darauf, dass dieser Haupteffekt nicht global interpretierbar ist ($F(1, 56) = 7.23$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .11$) (Abbildung 6.15 d).

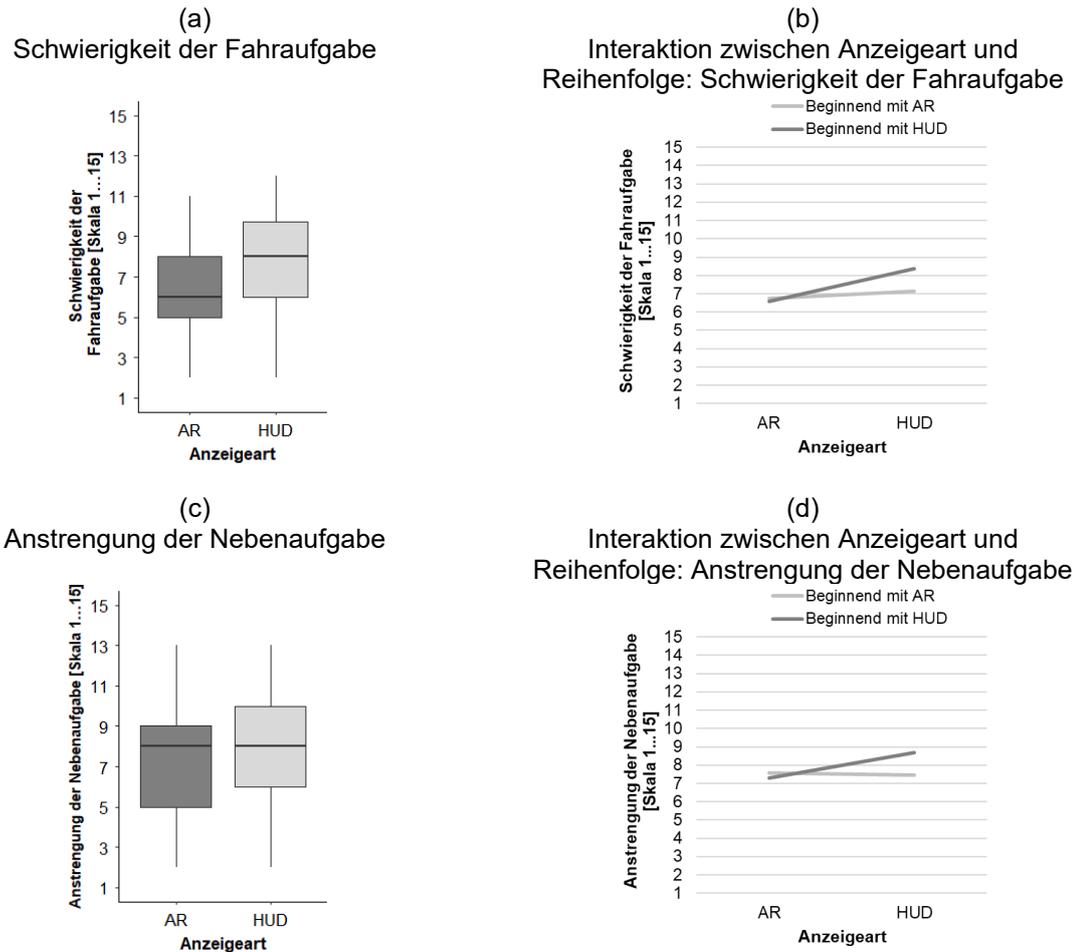


Abbildung 6.15: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Schwierigkeit der Fahraufgabe (Navigationsaufgabe & Nebenaufgabe) und der Anstrengung der Nebenaufgabe (1: niedrige Zustimmung, 15: hohe Zustimmung auf dem jeweiligen Item) und die jeweiligen Interaktionen zwischen der Anzeigart und der Reihenfolge (N = 58).

Nach der Studie äußerten die Versuchspersonen ihrer Präferenz hinsichtlich der Anzeigart. Es entschieden sich 49 Versuchspersonen (84.5%) für das AR Display und 9 Versuchspersonen (15.5%) für das HUD.

Für einen Manipulationscheck wurden die Versuchspersonen hinsichtlich der wahrgenommenen Verkehrskomplexität nach den beiden Fahrten (niedrige vs. hohe Verkehrskomplexität) mit den jeweiligen Anzeigarten befragt. Lediglich etwas mehr als die Hälfte der Versuchspersonen bejahten die Frage „Empfanden Sie die Verkehrskomplexität in den beiden letzten Fahrten als unterschiedlich stark?“ (nach Fahrt mit AR Display: 57%, nach Fahrt mit HUD: 52%). Etwas weniger als die Hälfte aller Versuchspersonen, die die unterschiedliche Verkehrskomplexitäten wahrgenommen hatten, konnte eine korrekte Zuordnung vornehmen (nach Fahrt mit AR Display: 48%, nach Fahrt mit HUD: 45%).

6.4 Ergebnisse der letzten uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug²

Neben der Fahrt durch die Vorstadt wurde eine komplexere Situation am Ende jeder Fahrt analysiert (Kapitel 6.2.1 & 6.2.5). Bei dieser letzten Abbiegung handelte es sich um eine uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug. Untersucht wurde, ob die Fahrenden dieses entgegenkommende Fahrzeug beachten und ein angemessenes Fahrverhalten mit der jeweiligen Anzeigeart zeigen. Dazu wurden die Fahrenden mit der Entscheidung konfrontiert, vor diesem abzubiegen oder ihn passieren zu lassen. Analysiert wurde außerdem, ob es mit einem AR Display zu einer reduzierten Blickwechselanzahl zwischen der Anzeige und der Zielabbiegung kommt, da die virtuellen Informationen bereits positionsgenau in der Umwelt verortet sind und die Fahrenden diese somit nicht mehr mental auf die reale Fahrsituation übertragen müssen. Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

6.4.1 Datenaufbereitung und –auswertung

Für die interferenzstatistische Auswertung wurde ein Signifikanzniveau von 5% angenommen. Technische Probleme führten zu reduzierten Datensätzen in einzelnen Analysen. Die varianzstatistische Analyse wird als robust gegenüber Verletzungen der Normalverteilung angesehen (Blanca et al., 2017; Schmider, et al., 2010).

Die Blickdaten umfassen die aufsummierte Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug bzw. die Gegenfahrbahn und die Blickwechselanzahl zwischen Zielabbiegung, Anzeige und dem entgegenkommenden Fahrzeug. Im Rahmen der Aufbereitung dieser Daten wurde differenziert, ob die Versuchsperson in der jeweiligen Fahrt hinter oder vor dem entgegenkommenden Fahrzeug abgebogen ist, da das Blickverhalten zwischen diesen beiden Fällen nicht vergleichbar ist. Es wurden ausschließlich die Blickdaten für den Fall des Abbiegens hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug analysiert (AR Display: 85 Fahrten, HUD: 91 Fahrten), da es zu wenige Fahrten für eine statistische Analyse gab, in denen die Versuchspersonen vor dem entgegenkommenden Fahrzeug abgebogen sind (AR Display: 16 Fahrten, HUD: 11 Fahrten).

Die Daten, die der Analyse der aufsummierten Blickdauer und der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen Objekten in der uneindeutigen Linksabbiegung dienen, wurden händisch mit der Software ELAN (Max Planck Institute for Psycholinguistics, 2022) annotiert. Der Mehraufwand einer händischen Annotation war gerechtfertigt, da eine Auswertung basierend auf Areas Of Interests (AOI) aufgrund der dynamischen Fahrsituationen nicht möglich war.

Für die Analyse der Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug und auf die Gegenfahrbahn konnten ausschließlich vollständige Datensätze ausgewertet werden (Versuchspersonen, die in allen Bedingungen hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug

² Die Ergebnisse der Analyse der Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug, der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen Anzeige und Zielabbiegung, des Abbiegeverhaltens und der subjektiven Bewertung (bezüglich der Ablenkung durch die Anzeige, wie hilfreich die Anzeige war, der störenden Überlagerung durch AR-Informationen und der Leichtigkeit der Entscheidung für das Abbiegen vor bzw. hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug) wurden bereits in Bauerfeind et al. (2022) veröffentlicht.

abgebogen sind und bei denen in keiner der Fahrten im Analysezeitraum technisch bedingte Aussetzer in der Datenaufzeichnung aufgetreten sind). Somit konnten Datensätze von 31 Versuchspersonen analysiert werden. Dennoch wurde sich für die Auswertung dieser Daten entschieden. Die Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug und auf die Gegenfahrbahn wurden jeweils in Sekunden aufsummiert. Für die Analyse wurden rmANOVAs mit der Software IBM SPSS Statistics 19 durchgeführt. In die Analysen flossen die Faktoren Anzeigart (AR Display, HUD) und Verkehrskomplexität (niedrig, hoch). Es konnte von einer Intervallskalierung durch die Einheit ausgegangen werden. Das partielle Eta-Quadrat wurde berechnet.

Bedingt durch technische Schwierigkeiten mussten sechs Versuchspersonen von der Analyse der durchschnittlichen Blickwechselanzahl ausgeschlossen werden ($N = 52$). Für die Erfassung der Blickwechselanzahl wurden die Blicke jeweils zwischen (1) der Zielabbiegung und der Anzeige, (2) dem entgegenkommenden Fahrzeug und der Zielabbiegung und (3) dem entgegenkommenden Fahrzeug und der Anzeige gezählt. Als Blickwechsel zählte die Fixation des Bereichs A mit einer folgenden Fixation des Bereichs B sowie von B auf A. Folgend wurde ein generalisiertes lineares Modell mit variierendem Achsenabschnitt und variierender Steigung für die durchschnittliche Blickwechselanzahl als abhängigen Variable aufgestellt. Nach einer visuellen Inspektion der Daten wurde für das Modell eine Poisson-Verteilung angenommen. Als Faktoren wurden die Anzeigart (AR Display, HUD) und die Verkehrskomplexität (niedrig, hoch) berücksichtigt. Des Weiteren wurden die Unterschiede zwischen den Probanden modelliert (beliebiger Achsenabschnitt/random intercept). Die Analyse wurde mit der Software R Studio durchgeführt. Konfidenzintervalle wurden berechnet.

Von der Analyse des Fahrverhaltens in der uneindeutigen Linksabbiegung mussten neun Versuchspersonen aufgrund von technischen Schwierigkeiten ausgeschlossen werden ($N = 49$). Es wurde untersucht, ob die Versuchspersonen vor oder hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug abgebogen sind. Um Lerneffekte während der insgesamt vier Fahrten auszuschließen, wurde für jede Versuchsperson die letzte uneindeutige Linksabbiegung der jeweils ersten Fahrt ausgewertet. Die Zählung, vor vs. hinter entgegenkommendem Fahrzeug abgebogen, erfolgte mit Hilfe des Videomaterials der Eye-Tracking-Kamera. Die Daten wurden deskriptiv betrachtet, da zwei Kategorien weniger als fünf Fälle zeigten.

Neben den Verhaltensdaten wurden auch subjektive Daten erfasst. Diese wurden mit varianzstatistischen Analysen, in Form von rmANOVA mit der Software IBM SPSS Statistics 19 durchgeführt ($N = 58$). In den einzelnen Analysen wurden die Faktoren Anzeigart (AR Display, HUD), Verkehrskomplexität (niedrig, hoch) und der Zwischensubjektfaktor Reihenfolge der Anzeigart (beginnend mit dem AR Display vs. beginnend mit dem HUD) berücksichtigt. Es konnte von Intervallskalierungen durch die Antwortformate ausgegangen werden. Das partielle Eta-Quadrat wurde berechnet.

6.4.2 Blickverhalten

Bezüglich der Blicke auf das entgegenkommende Fahrzeug in der uneindeutigen Linksabbiegung zeigten sich signifikante Haupteffekte für die Faktoren Anzeigart ($F(1,30) = 8.19, p < .05, \eta_p^2 = .21$) und Verkehrskomplexität ($F(1, 30) = 36.51, p < .001, \eta_p^2 = .55$). Die Versuchspersonen schauten während der Annäherung an die uneindeutige

Linksabiegung mit dem AR Display mehr auf das entgegenkommende Fahrzeug als mit dem HUD (Tabelle 6.9, Abbildung 6.16). Es zeigte sich ebenfalls, dass in einer hohen Verkehrskomplexität mehr auf das entgegenkommende Fahrzeug geschaut wurde. Ein ordinaler Interaktionseffekt zwischen der Anzeigart und der Verkehrskomplexität verwies darauf, dass beide Haupteffekte interpretierbar sind ($F(1, 30) = 6.41, p < .05, \eta_p^2 = .18$). Besonders bei der Annäherung zur Zielabiegung in der hohen Verkehrskomplexität unterschied sich das Blickverhalten auf das entgegenkommende Fahrzeug: Mit dem AR Display schauten die Versuchspersonen mehr auf dieses als mit dem HUD (Abbildung 6.17).

Bezüglich der Blicke auf die Gegenfahrbahn zeigten sich Haupteffekte für die beiden Faktoren Anzeigart ($F(1, 30) = 4.27, p < .05, \eta_p^2 = .16$) und Verkehrskomplexität ($F(1, 30) = 11.00, p < .05, \eta_p^2 = .27$). Mit dem AR Display schauten die Versuchspersonen während der Annäherung an die uneindeutige Linksabiegung mehr auf die Gegenfahrbahn als mit dem HUD (Tabelle 6.9, Abbildung 6.18). Außerdem wurden in der hohen Verkehrskomplexität mehr auf diese geschaut als in der niedrigen. Es zeigte sich kein Interaktionseffekt zwischen der Anzeigart und der Verkehrskomplexität ($F(1, 30) = 0.00, p > .10, \eta_p^2 = .00$).

Tabelle 6.9: Mittelwert und Standardabweichung der aufsummierten Blickdauer [s] auf das entgegenkommende Fahrzeug und die Gegenfahrbahn in der uneindeutigen Linksabiegung, getrennt nach der Verkehrskomplexität und der Anzeigart. (Bauerfeind et al., 2022), CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Anzeigart, Zielobjekt der Blicke	Verkehrskomplexität	M [s]	SD [s]
Blicke auf das entgegenkommende Fahrzeug			
AR	Niedrig	4.42	1.80
	Hoch	6.44	2.03
HUD	Niedrig	4.17	1.26
	Hoch	5.09	1.47
Blicke auf die Gegenfahrbahn			
AR	Niedrig	2.34	1.36
	Hoch	3.10	2.02
HUD	Niedrig	1.72	1.45
	Hoch	2.50	1.52

Anmerkung. N= 31.

Blickdauer auf entgegenkommendes Fahrzeug [s]

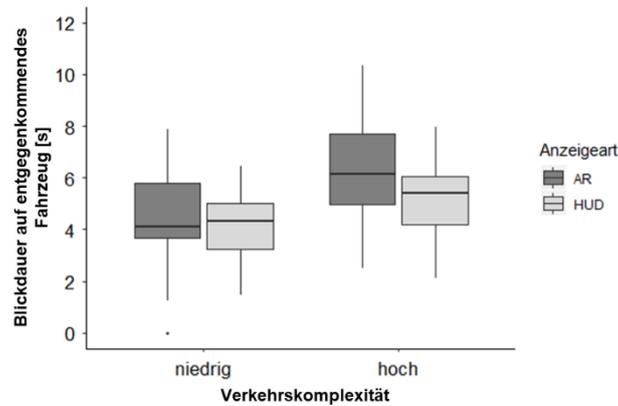


Abbildung 6.16: Boxplots der aufsummierten Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug [s] in der uneindeutigen Linksabiegung (N = 31). (Bauerfeind et al., 2022).

Interaktion zwischen der Anzeigart und der Verkehrskomplexität hinsichtlich der Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug [s]

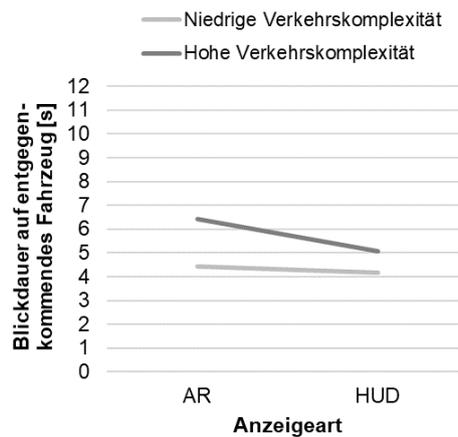


Abbildung 6.17: Interaktion zwischen der Anzeigart und der Verkehrskomplexität in Bezug auf die aufsummierte Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug [s] in der uneindeutigen Linksabiegung (N = 31).

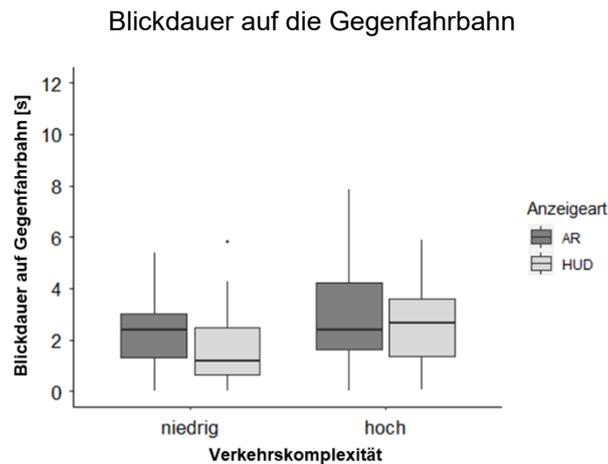


Abbildung 6.18: Boxplots der aufsummierten Blickdauer auf die Gegenfahrbahn [s] in der uneindeutigen Linksabbiegung (N = 31).

Weitere Blickdaten zeigten signifikante Unterschiede in den durchschnittlichen Häufigkeiten der Blickwechsel zwischen der Zielabbiegung, der Navigationsanzeige und dem entgegenkommenden Fahrzeug. Tabelle 6.10 zeigt, dass während der Annäherung zur Zielabbiegung signifikant weniger Blickwechsel zwischen der Zielabbiegung und dem AR Display (0.82, siehe Achsenabschnitt Tabelle 6.10) als mit dem HUD (0.82 + 0.94) in der hohen Verkehrskomplexität durchgeführt wurden ($p < .001$). Die Verkehrskomplexität hatte keinen Einfluss auf die durchschnittliche Blickwechselanzahl ($p > .10$). Die Interaktion zwischen der Anzeigart und der Verkehrskomplexität war statistisch nicht bedeutsam ($p > .10$).

Die Analyse der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen dem entgegenkommenden Fahrzeug und der Zielabbiegung zeigte, dass signifikant weniger Blickwechsel mit dem AR Display (1.23, siehe Achsenabschnitt Tabelle 6.11) als mit dem HUD (1.23 + 0.34) in der hohen Verkehrskomplexität durchgeführt wurden ($p < .05$). Die Verkehrskomplexität hatte keinen Einfluss auf die Häufigkeit der durchschnittlichen Blickwechsel zwischen dem entgegenkommenden Fahrzeug und der Zielabbiegung ($p > .05$). Die Interaktion zwischen der Anzeigart und der Verkehrskomplexität war statistisch nicht bedeutsam ($p > .10$).

Die Analyse der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen dem entgegenkommenden Fahrzeug und der Anzeige zeigte, dass signifikant mehr Blickwechsel mit dem AR Display (1.45, siehe Achsenabschnitt Tabelle 6.12) als mit dem HUD (1.45 – 0.24) in der hohen Verkehrskomplexität durchgeführt wurden ($p < .05$). In der hohen Verkehrskomplexität (1.45) wurden signifikant mehr Blickwechsel zwischen dem entgegenkommenden Fahrzeug und dem AR Display durchgeführt als in der niedrigen Verkehrskomplexität (1.45 – 0.24) ($p < .05$). Die Interaktion zwischen der Anzeigart und der Verkehrskomplexität war statistisch nicht bedeutsam ($p > .10$).

Tabelle 6.10: Generalisiertes lineares Modell der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen Zielabbiegung und Anzeige in der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug, getrennt nach der Anzeigeart und der Verkehrskomplexität. (Bauerfeind et al., 2022), CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Maße	Schätzung	SE	z	p	95% KI	
					niedrig	hoch
Gewählte Effekte (fixed effects)						
AR Display in hoher Verkehrskomplexität (Achsenabschnitt /intercept)	0.82	0.11	7.50	< .001	0.61	1.03
HUD	0.94	0.12	7.54	< .001	0.69	1.18
Niedrige Verkehrskomplexität	0.01	0.14	0.10	> .10	-0.27	0.30
HUD * Niedrige Verkehrskomplexität	-0.13	0.17	-0.75	> .10	-0.46	0.21

Anmerkung. N = 52, SE = Standardfehler, R^2 marginal = 0.42, R^2 conditional = 0.45, Versuchsperson: SD = 0.12 (random effects), Ergebnisse für HUD, niedrige Verkehrskomplexität und Interaktion werden durch eine Addition mit dem Achsenabschnitt (intercept) berechnet.

Tabelle 6.11: Generalisiertes lineares Modell der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen entgegenkommendem Fahrzeug und Zielabbiegung in der uneindeutigen Linksabbiegung, getrennt nach der Anzeigeart und der Verkehrskomplexität.

Maße	Schätzung	SE	z	p	95% KI	
					niedrig	hoch
Gewählte Effekte (fixed effects)						
AR Display in hoher Verkehrskomplexität (Achsenabschnitt /intercept)	1.23	0.10	12.52	< .001	1.04	1.42
HUD	0.34	0.11	3.09	< .05	0.12	0.55
Niedrige Verkehrskomplexität	-0.23	0.12	-1.93	> .05	-0.47	0.00
HUD * Niedrige Verkehrskomplexität	0.14	0.15	0.90	> .10	-0.16	0.44

Anmerkung. N = 52, SE = Standardfehler, R^2 marginal = 0.13, R^2 conditional = 0.37, Versuchsperson: SD = 0.31 (random effects), Ergebnisse für HUD, niedrige Verkehrskomplexität und Interaktion werden durch eine Addition mit dem Achsenabschnitt (intercept) berechnet.

Tabelle 6.12: Generalisiertes lineares Modell der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen Anzeige und entgegenkommendem Fahrzeug in der uneindeutigen Linksabbiegung, getrennt nach der Anzeigeart und der Verkehrskomplexität.

Maße	Schätzung	SE	z	p	95% KI	
					niedrig	hoch
Gewählte Effekte (fixed effects)						
AR Display in hoher Verkehrskomplexität (Achsenabschnitt /intercept)	1.45	0.10	14.35	< .001	1.25	1.65
HUD	-0.24	0.11	-2.19	< .05	-0.45	-0.03
Niedrige Verkehrskomplexität	-0.24	0.11	-2.30	< .05	-0.45	-0.04
HUD * Niedrige Verkehrskomplexität	-0.05	0.16	-0.30	> .10	-0.36	0.26

Anmerkung. N = 52, SE = Standardfehler, R^2 marginal = 0.07, R^2 conditional = 0.46, Versuchsperson: SD = 0.44 (random effects), Ergebnisse für HUD, niedrige Verkehrskomplexität und Interaktion werden durch eine Addition mit dem Achsenabschnitt (intercept) berechnet.

6.4.3 Fahrleistung

Im Rahmen der Analyse der Fahrleistung wurde das Abbiegeverhalten in der uneindeutigen Linksabbiegung in Bezug auf das entgegenkommende Fahrzeug analysiert. Dieses Fahrzeug war so programmiert, dass es ca. 30 m vom Mittelpunkt der Zielabbiegung entfernt war als die Versuchsperson die Kreuzung der Zielabbiegung erreichte. Die Ergebnisse zeigten, dass die Mehrheit der Versuchspersonen unabhängig der Anzeigeart das erste Mal in dieser Situation das entgegenkommende Fahrzeug passieren ließen und somit hinter ihm abgelenkt sind (Tabelle 6.13). Die Anzeigeart hatte somit keinen Einfluss auf das Abbiegeverhalten in der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug.

Tabelle 6.13: Häufigkeiten der Entscheidungen, vor oder hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug in der uneindeutigen Linksabbiegung abzubiegen, getrennt nach der Anzeigeart. (Bauerfeind et al., 2022), CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

	AR	HUD
Vor Entgegenkommenden abgelenkt	4	2
Hinter Entgegenkommenden abgelenkt	20	23

Anmerkung. N = 49.

6.4.4 Subjektive Bewertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der subjektiven Evaluation der letzten uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug vorgestellt. Angemerkt wird, dass ausschließlich im Fall signifikanter Zwischensubjekteffekte (erlebte Reihenfolge der

Anzeigeart) bzw. signifikanter Interaktionseffekte zwischen der Anzeigeart und der Verkehrskomplexität auf diese verwiesen wird.

Nach jeder Fahrt wurden die Versuchspersonen zur letzten Abbiegesituation befragt. Hinsichtlich der Schwierigkeit der Abbiegesituation zeigte die Anzeigeart einen signifikanten Einfluss ($F(1, 56) = 36.90, p < .001, \eta_p^2 = .40$). Die Versuchspersonen empfanden die Abbiegesituation mit dem AR Display als leichter als mit dem HUD (AR Display: $M = 4.40, SD = 1.59$; HUD: $M = 5.98, SD = 1.55$) (Abbildung 6.19 a). Die Verkehrskomplexität hatte keinen Einfluss auf die Bewertung der Schwierigkeit der Situation (niedrige Verkehrskomplexität: $M = 5.22, SD = 1.44$; hohe Verkehrskomplexität: $M = 5.16, SD = 1.48, F(1, 56) = 0.09, p > .10, \eta_p^2 = .00$).

Des Weiteren wurden die Versuchspersonen befragt, wie stark sie den Gegenverkehr in der letzten Abbiegesituation beachtet haben. Weder die Anzeigeart ($F(1, 56) = 0.07, p > .10, \eta_p^2 = .00$) noch die Verkehrskomplexität ($F(1, 56) = 0.08, p > .10, \eta_p^2 = .00$) zeigten einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung (AR Display: $M = 10.91, SD = 2.81$; HUD: $M = 11.01, SD = 2.39$; niedrige Verkehrskomplexität: $M = 10.92, SD = 2.61$; hohe Verkehrskomplexität: $M = 11.00, SD = 2.40$) (Abbildung 6.19 b). Die Versuchspersonen gaben an, diesen in jeder Bedingung „stark“ beachtet zu haben.

Die Anzeigeart hatte keinen Einfluss auf die Leichtigkeit der Entscheidung für das Abbiegen vor bzw. hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug ($F(1, 56) = 1.77, p > .10, \eta_p^2 = .03$). Die Versuchspersonen bewerteten die Entscheidung mit beiden Anzeigearten als „leicht“ (AR Display: $M = 4.31, SD = 2.04$; HUD: $M = 4.77, SD = 2.16$ [negativ gepoltes Item]) (Abbildung 6.19 c). Jedoch zeigte die Verkehrskomplexität einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung ($F(1, 56) = 8.04, p < .05, \eta_p^2 = .13$). In der niedrigen Verkehrskomplexität fiel diese Entscheidung leichter als in der hohen (niedrige Verkehrskomplexität: $M = 4.14, SD = 1.67$; hohe Verkehrskomplexität: $M = 4.94, SD = 2.21$).

Des Weiteren wurden die Versuchspersonen gefragt, wie stark sie die Nebenaufgabe beim Suchen der letzten Abbiegung beansprucht hat. Dabei zeigte sich, dass die Versuchspersonen die Nebenaufgabe in den Fahrten mit dem AR Display als „wenig beanspruchend“ und mit dem HUD als „mittel beanspruchend“ einschätzten (AR Display: $M = 6.11, SD = 2.09$; HUD: $M = 7.14, SD = 2.23; F(1, 56) = 12.89, p = .001, \eta_p^2 = .19$) (Abbildung 6.19 d). Die Verkehrskomplexität hatte keinen Einfluss auf die Bewertung (niedrige Verkehrskomplexität: $M = 6.48, SD = 2.06$; hohe Verkehrskomplexität: $M = 6.28, SD = 2.16; F(1, 56) = 1.91, p > .10, \eta_p^2 = .03$).

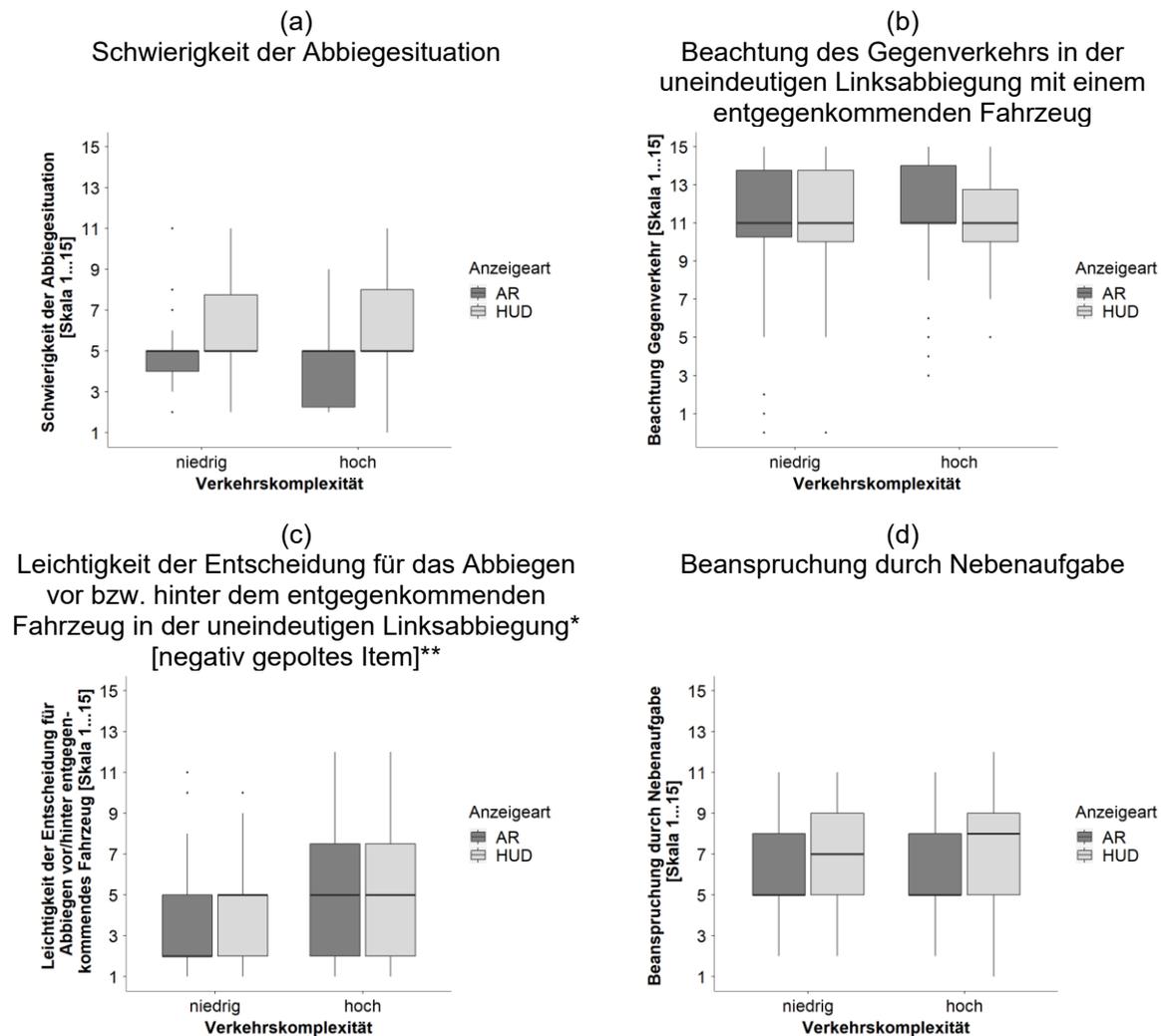


Abbildung 6.19: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Schwierigkeit der Abbiegesituation in der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug, der Beachtung des Gegenverkehrs, der Leichtigkeit der Entscheidung für das Abbiegen vor bzw. hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug und der Beanspruchung durch die Nebenaufgabe in der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug ($N = 58$), (1: niedrige Zustimmung, 15: hohe Zustimmung auf dem jeweiligen Item; **negativ gepoltes Item: 1: sehr leicht, 15: sehr schwer). *(Bauerfeind et al., 2022).

Nach jeder Fahrt bewerteten die Versuchspersonen ebenfalls den Nutzen der Anzeige für die uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug. Das AR Display wurde als nützlicher eingeschätzt als das HUD (AR Display: $M = 12.26$, $SD = 1.61$; HUD: $M = 10.32$, $SD = 1.77$; $F(1, 56) = 53.28$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .49$) (Abbildung 6.20 a). Die Verkehrskomplexität hatte keinen Einfluss auf die Bewertung (niedrige Verkehrskomplexität: $M = 11.28$, $SD = 1.38$; hohe Verkehrskomplexität: $M = 11.30$, $SD = 1.53$; $F(1, 56) = 0.07$, $p > .10$, $\eta_p^2 = .00$).

Das AR Display wurde des Weiteren als hilfreicher für die letzte Abbiegesituation eingeschätzt (AR Display: $M = 12.64$, $SD = 1.48$; HUD: $M = 10.34$, $SD = 1.75$; $F(1, 56) = 64.74$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .54$) (Abbildung 6.20 b). Auch hier zeigte die Verkehrskomplexität

keinen Einfluss auf die Bewertung (niedrige Verkehrskomplexität: $M = 11.42$, $SD = 1.24$; hohe Verkehrskomplexität: $M = 11.56$, $SD = 1.40$; $F(1, 56) = 0.80$, $p > .10$, $\eta_p^2 = .01$).

Des Weiteren wurde das AR Display als entlastender für die uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug bewertet ($F(1, 56) = 41.80$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .43$). Demnach wurde das AR Display als „stark entlastend“ und das HUD als „mittel entlastend“ eingeschätzt (AR Display: $M = 10.84$, $SD = 2.26$; HUD: $M = 8.54$, $SD = 2.29$) (Abbildung 6.20 c). Die Verkehrskomplexität zeigte keinen Einfluss auf die Bewertung der Entlastung (niedrige Verkehrskomplexität: $M = 9.78$, $SD = 2.05$; hohe Verkehrskomplexität: $M = 9.60$, $SD = 1.88$; $F(1, 56) = 0.86$, $p > .10$, $\eta_p^2 = .02$).

Des Weiteren gaben die Versuchspersonen an, dass das AR Display sie weniger vom Straßengeschehen abgelenkt habe als das HUD (AR Display: $M = 4.61$, $SD = 1.95$; HUD: $M = 6.17$, $SD = 2.38$; $F(1, 56) = 14.64$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .21$) (Abbildung 6.20 d). Die Verkehrskomplexität zeigte auch hier keinen Einfluss (niedrige Verkehrskomplexität: $M = 5.58$, $SD = 1.63$; hohe Verkehrskomplexität: $M = 5.21$, $SD = 1.70$; $F(1, 56) = 3.87$, $p > .05$, $\eta_p^2 = .07$).

Die Anzeigarten wurden ebenfalls hinsichtlich der Funktionalität für die uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug bewertet. Das AR Display wurde als verständlicher für diese Situation gesehen als das HUD (AR Display: $M = 12.85$, $SD = 1.75$; HUD: $M = 10.24$, $SD = 2.44$; $F(1, 56) = 49.34$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .47$) (Abbildung 6.20 e). Dabei zeigte die Verkehrskomplexität keinen Effekt auf die Bewertung (niedrige Verkehrskomplexität: $M = 11.54$, $SD = 1.61$; hohe Verkehrskomplexität: $M = 11.55$, $SD = 1.64$; $F(1, 56) = 0.00$, $p > .10$, $\eta_p^2 = .01$).

Die Versuchspersonen gaben an, dass sie die Überlagerung der AR-Informationen über andere Verkehrsteilnehmer in der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug als „wenig störend“ empfanden ($M = 4.23$, $SD = 2.24$) (Abbildung 6.20 f). Die Verkehrskomplexität hatte keinen Einfluss auf die Bewertung (niedrige Verkehrskomplexität: $M = 4.45$, $SD = 2.64$; hohe Verkehrskomplexität: $M = 4.02$, $SD = 2.50$; $F(1, 56) = 1.65$, $p > .10$, $\eta_p^2 = .03$).

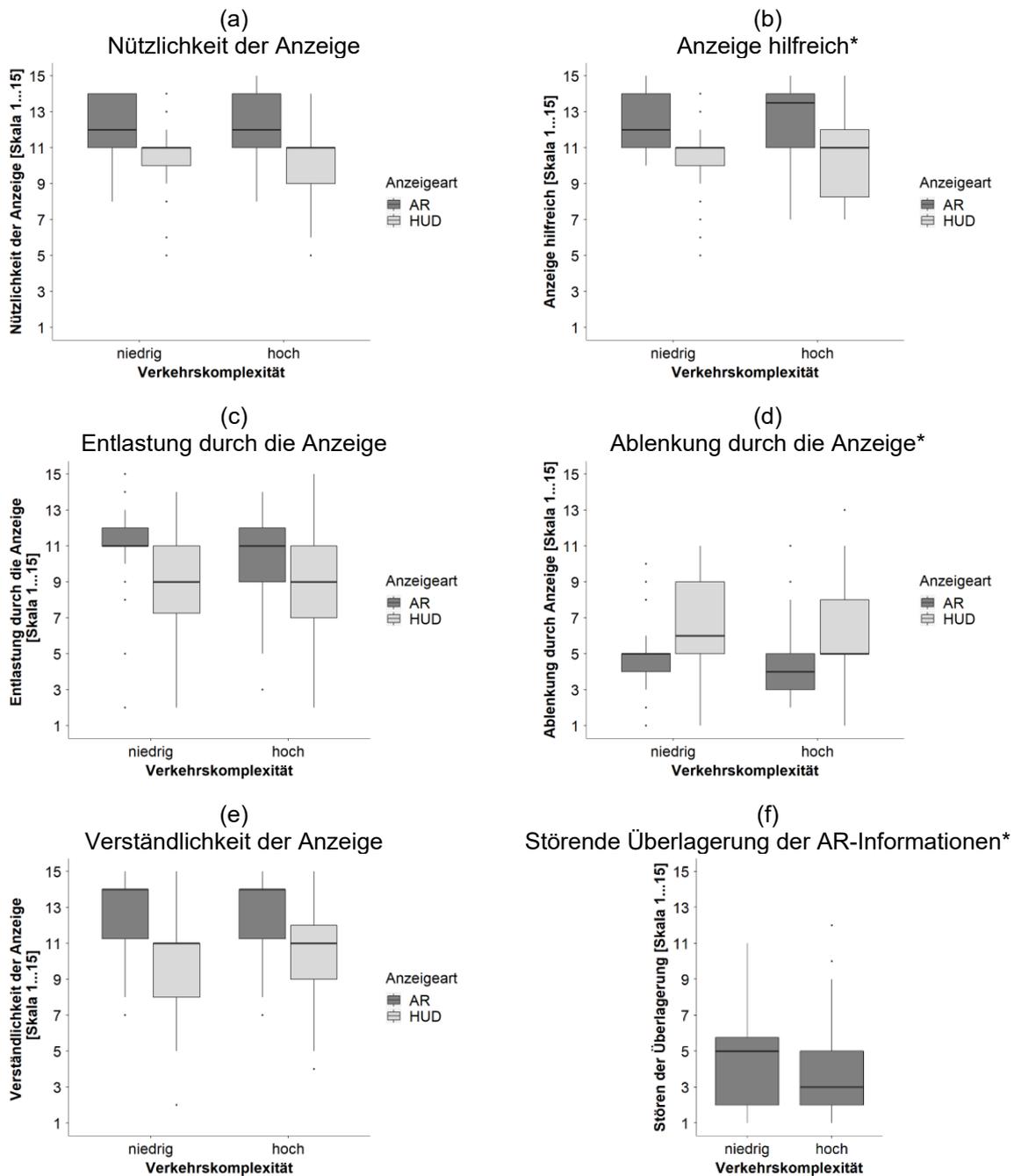


Abbildung 6.20: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Nützlichkeit der Anzeige, wie hilfreich die Anzeige war, der Entlastung durch die Anzeige, der Ablenkung durch die Anzeige, der Verständlichkeit der Anzeige und der störenden Überlagerung durch die AR-Informationen in der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug (N = 58), (1: niedrige Zustimmung, 15: hohe Zustimmung auf dem jeweiligen Item).*(Bauerfeind et al., 2022).

6.5 Diskussion und Zusammenfassung³

In dieser Fahrsimulatorstudie wurde untersucht, ob das Navigieren mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD zu aufmerksamkeitsbindenden Effekten führt, die auf einen Cognitive-Capture-Effekt (Weintraub, 1987 nach Tufano, 1997) hindeuten können. Da dieser Effekt die Unfähigkeit die Aufmerksamkeit situationsangemessen zwischen den präsentierten Informationen und der Umwelt zu verteilen beschreibt (Boston & Braun, 1996; Gish & Staplin, 1995), wurde das Blickverhalten in Form der Blickstreuung während des Navigierens mit den Anzeigarten (AR Display und HUD) in einer vorstädtischen Gegend mit uneindeutigen Navigationssituationen untersucht. Um weitere abhängige Variablen für die Untersuchung einer potentiellen Aufmerksamkeitsbindung bedingt durch AR-Informationen zu untersuchen, wurde eine komplexere Situation am Ende jeder Fahrt untersucht. Es handelte sich um eine uneindeutige Linksabiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug.

Die Fahrten unterscheiden sich hinsichtlich der Verkehrskomplexität (niedrig vs. hoch), um herauszufinden, ob die Fahrenden ihr Blickverhalten an veränderte Umweltbedingungen mit dem AR Display im Vergleich zu dem HUD anpassen. Des Weiteren wurde untersucht, ob die Verkehrskomplexität Einfluss auf die Effektivität und Bewertung der AR-Informationen hat.

Des Weiteren wurden die Fahrerbeanspruchung, das Fahrverhalten, das Navigieren und das subjektive Erleben ausgewertet. Auch in dieser Studie war die Navigation in beiden Displays ohne eine ergänzende Sprachansage umgesetzt, um die gefundenen Effekte ausschließlich auf die Anzeige zurückzuführen.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigten keine Aufmerksamkeitsbindung, die auf einen Cognitive-Capture-Effekt deuten bedingt durch AR-Informationen. Die Blicke der Versuchspersonen streuten mit beiden Anzeigen sowohl über die Umgebung als auch über die Navigationsinformationen im AR Display bzw. im HUD. Es zeigte sich nicht, dass durch AR-Informationen die Fahreraufmerksamkeit in Form einer reduzierten Blickstreuung über die Fahrumgebung gebunden war. Gegenteilig lieferten die Blickdaten der horizontalen Blickstreuung keine Hinweise darauf, dass das AR Display ein unterschiedliches Blickverhalten als das HUD auslöst.

Gegen die mögliche Annahme, dass die Blickstreuung mit dem AR Display ausschließlich durch die Höhe und die Breite der AR-Informationen ausgelöst wurde, spricht die Tatsache, dass die durchschnittliche Blickstreuung mit dem AR Display ähnlich zu der durchschnittlichen Blickstreuung mit dem HUD war. Wäre die Blickstreuung nur auf die Größe der AR-Informationen zurückzuführen, wäre die Wahrscheinlichkeit groß, dass sich diese zur Blickstreuung mit dem HUD unterschieden hätte. Abgeleitet werden kann somit, dass es sich um eine natürliche Blickstreuung in Interaktion mit dem AR Display handelte, die vergleichbar ist mit der eines HUDs. Dies bestätigen die subjektiven Bewertungen der Versuchspersonen. Demnach gaben die Versuchspersonen an, dass das AR Display weniger vom Straßengeschehen abgelenkt habe als das HUD.

³ Die Ergebnisse der Analyse der Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug, der durchschnittlichen Blickwechsellanzahl zwischen Anzeige und Zielabiegung, des Abbiegeverhaltens, der subjektiven Bewertung (bezüglich der Ablenkung durch die Anzeige, wie hilfreich die Anzeige war, der störenden Überlagerung durch AR-Informationen und der Leichtigkeit der Entscheidung für das Abbiegen vor bzw. hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug) und die entsprechenden Limitationen wurden bereits in Bauerfeind et al. (2022) diskutiert.

Es zeigten sich jedoch Unterschiede in der vertikalen Blickstreuung zwischen den beiden Anzeigearten. Mit dem HUD kam es zu einer höheren vertikalen Blickstreuung als mit dem AR Display. Dieses Verhalten ist bedingt durch die unterschiedliche Größe und Position der beiden Anzeigearten. Das AR Display ist positionsgenau in der Umwelt verortet und liegt somit mittig im primären Blickfeld der Fahrenden. Im Gegensatz dazu ist das HUD kleiner und am unteren Rand des primären Blickfeldes positioniert. Es scheint über der Motorhaube zu schweben. Somit sind zielgerichtete Blicke nach unten auf das HUD nötig, um die Navigationsinformationen zu erhalten. Dieses Verhalten wurde in den Blickdaten deutlich. Diese geringere vertikale Blickstreuung mit dem AR Display kann somit nicht auf aufmerksamkeitsbindende Effekte zurückgeführt werden. Die Versuchspersonen bewerteten die Navigationsinformationen im AR Display als besser sichtbar. Sowohl die Größe als auch die Positionierung der Informationen im AR Display wurden denen des HUDs bevorzugt.

Die Verkehrskomplexität zeigte keinen Einfluss auf die horizontale und die vertikale Blickstreuung. Die Daten lieferten keine Hinweise, dass es in der hohen Verkehrskomplexität eine unterschiedliche Blickstreuung gibt als in der niedrigen Verkehrskomplexität.

Generell wird angenommen, dass die Blickstreuung im Simulator weniger ausgeprägt ist als in einer realen Fahrsituation. Obgleich die Blicke der Versuchspersonen sowohl über die Anzeige als auch über die Fahrumgebung streuten, zeigte sich keine hohe Blickstreuung. Eine mögliche Erklärung ist das Navigieren in einer Fahrsimulation. Die Versuchspersonen navigierten in einer Vorstadt mit vielen Abbiegungen mit einem Blickfeld von 180°. Womöglich richteten die Versuchspersonen ihren Blick geradeaus und zeigten keine hohe Blickstreuung, um Simulatorübelkeit zu vermeiden. Diese Vermutung wird durch die Abbruchrate von 24% bedingt durch Simulatorübelkeit bestärkt. Es wurde sich für das Blickfeld von 180° entschieden, um ein realistisches Fahrerlebnis im Simulator zu ermöglichen. Eine weitere Erklärung für eine weniger stark ausgeprägte Blickstreuung könnte sein, dass sich die Versuchspersonen im Simulator sicherer fühlen als in einer realen Fahrsituation.

Generell ist anzumerken, dass die Operationalisierung der visuellen Aufmerksamkeitsstreuung über die horizontale und vertikale Blickstreuung womöglich nicht alle Aspekte eines möglichen Cognitive-Capture-Effekts abdeckt. Kim und Gabbard (2019) untersuchten das Ablenkungspotential von AR Displays mit einer modifizierten SAGAT-Methode, um die Versuchspersonen auf ihr Situationsbewusstsein zu testen. Sie erfassten außerdem das Blickverhalten, die Beanspruchung und das Selbstvertrauen in die eigenen Antworten. Sicherlich wird zukünftige Forschung weitere Möglichkeiten für die Untersuchung von aufmerksamkeitsbindenden Effekten im Kontext von augmentierten Inhalten aufzeigen.

Neben der Blickstreuung sollten weitere Maße der Untersuchung einer potentiellen Aufmerksamkeitsbindung bedingt durch AR-Informationen dienen. Es stellte sich die Frage was eine situationsangemessene Aufmerksamkeitsverteilung bedeutet. Dafür wurde am Ende jeder Fahrt eine komplexere Situation analysiert. Bei dieser letzten Abbiegung handelte es sich um eine uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug, welches die Entscheidung es passieren zu lassen oder vor ihm abzubiegen erschwerte. Diese Situation diente der weiteren Analyse einer potentiellen

Aufmerksamkeitsbindung insofern, dass ein situationsangemessenes Blick- und Fahrverhalten in Bezug auf das entgegenkommende Fahrzeug untersucht werden konnte.

Die Mehrheit der Versuchspersonen bog unabhängig der Anzeigart das erste Mal in dieser Situation hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug ab. Somit verleitete keine der beiden Anzeigarten zu einem riskanten Abbiegeverhalten in der letzten uneindeutigen Linksabbiegung. Des Weiteren kann somit davon ausgegangen werden, dass das entgegenkommende Fahrzeug mit beiden Anzeigarten bemerkt wurde, was gegen eine Aufmerksamkeitsbindung bedingt durch das AR Display spricht.

Die Versuchspersonen gaben an, dass sie den Gegenverkehr in dieser Abbiegesituation in den Fahrten mit dem HUD „stark“ und mit dem AR Display „mittel stark“ beachteten. Das Blickverhalten in Form der aufsummierten Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug zeigte jedoch, dass diesem mit dem AR Display mehr Aufmerksamkeit geschenkt wurde als mit dem HUD. Auch die Gegenfahrbahn wurde mit dem AR Display mehr betrachtet als mit dem HUD. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Aufmerksamkeit der Fahrenden in Interaktion mit dem AR Display stärker auf andere Verkehrsteilnehmer gerichtet war als mit einem HUD. Besonders in der uneindeutigen Linksabbiegung musste der Abstand zum entgegenkommenden Fahrzeug in Betracht gezogen werden, um die Entscheidung für das Abbiegemanöver zu treffen. Es wird abgeleitet, dass das Navigieren mit einem AR Display freie Ressourcen ermöglicht, um der Umwelt mehr Aufmerksamkeit zu schenken als mit einem HUD. Diese Daten sprechen gegen eine Aufmerksamkeitsbindung bedingt durch das AR Display.

Des Weiteren wird in den Daten der uneindeutigen Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug deutlich, dass die Verkehrskomplexität Einfluss auf das Blickverhalten der Versuchspersonen hatte. Die Versuchspersonen schauten in der hohen Verkehrskomplexität mehr auf das entgegenkommende Fahrzeug und die Gegenfahrbahn als in der niedrigen Verkehrskomplexität. Subjektiv wurde dies von den Versuchspersonen bestätigt. Sie gaben an, den Gegenverkehr „mittel stark“ in der niedrigen und „stark“ in der hohen Verkehrskomplexität beachtet zu haben. Besonders in der hohen Verkehrskomplexität schauten die Versuchspersonen mit dem AR Display mehr auf das entgegenkommende Fahrzeug als mit dem HUD.

Die Versuchspersonen wurden des Weiteren nach der Schwierigkeit der letzten Abbiegesituation befragt. Sie bewerteten diese mit dem AR Display als leichter als mit HUD. Außerdem wurde das AR Display als hilfreicher für die letzte Abbiegesituation eingeschätzt. Besonders hilfreich wurde das AR Display bewertet, wenn zuvor mit dem HUD gefahren wurde und die Anzeigarten somit im direkten Vergleich standen. Eine Erklärung für diese Einschätzung könnte das Blickverhalten in Form der durchschnittlichen Blickwechselanzahl zwischen der Zielabbiegung, der Anzeige und dem entgegenkommenden Fahrzeug geben. Mit dem HUD führten die Versuchspersonen mehr Blickwechsel zwischen der Zielabbiegung und der Anzeige durch als mit dem AR Display. Abgeleitet werden kann, dass mit dem HUD ein mentaler Abgleich der virtuellen Navigationsinformationen in die reale Fahrsituation nötig ist. Durch die positionsgenaue Platzierung der AR-Navigationsinformationen scheint dieses zusätzliche Abgleichen zu entfallen, da die Fahrenden die AR-Informationen nicht mehr mental auf die reale Fahrsituation übertragen müssen (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Die räumliche Nähe der AR-Informationen und den realen Objekten resultiert in einem intuitiven

Verständnis der AR-Informationen. Folglich wurde diese Anzeigeart als hilfreicher und die Situation als leichter bewertet.

Angemerkt werden muss, dass mit einem AR Display eine größere Straßenfläche mit virtuellen Informationen angereichert wird als bei einem HUD. Somit ist die Unterscheidung zwischen Straße und AR-Informationen erschwert. Trotzdem war die durchschnittliche Blickwechselanzahl mit dem AR Display geringer als mit dem HUD.

Des Weiteren zeigten die Versuchspersonen mit dem HUD mehr Blickwechsel zwischen der Zielabbiegung und dem entgegenkommenden Fahrzeug. Es stellt sich die Frage, ob durch das HUD ein verändertes Blickverhalten verursacht wird. Diskutiert werden sollte, ob das Abgleichen der virtuellen Informationen mit der realen Fahrsituation ebenfalls zu vermehrten Blickwechsel zwischen Objekten in der Umwelt führt.

Jedoch wurden mehr Blickwechsel zwischen dem entgegenkommenden Fahrzeug und dem AR Display als dem HUD durchgeführt. Diskutiert werden sollte, ob es sich um Blicke auf die AR-Navigationsinformationen oder Blicke auf die eigene Fahrbahn handelte. Aktuell verfügbare Messverfahren ermöglichen diese weitere Differenzierung jedoch nicht.

Auch in dieser Studie wurde die Fahrerbeanspruchung anhand einer kognitiven Nebenaufgabe während des Navigierens in uneindeutigen Navigationssituationen für die beiden Anzeigearten untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die Fahrenden mit dem AR Display mehr Aufgaben korrekt beantworteten als mit dem HUD, was auf eine reduzierte mentale Beanspruchung während des Navigierens mit dem AR Display deutet. Mit dem AR Display schienen die Fahrenden auf mehr freie Ressourcen zurückgreifen zu können und resultierend die Nebenaufgabe besser zu absolvieren. Durch die positionsgenaue Verortung der augmentierten Navigationsinformationen wird ein intuitives Verstehen und eine vereinfachte Verarbeitung ermöglicht. Angenommen wird, dass die Fahrenden die AR-Informationen nicht auf die reale Fahrsituation übertragen müssen, wie mit einem HUD, und es resultierend zu einer geringen mentalen Beanspruchung kommt (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Abgeleitet wird, dass das Navigieren in uneindeutigen Situationen mit dem AR Display weniger beansprucht als mit einem HUD und die Fahrenden somit von AR-Informationen profitieren können.

Deutlich wurde jedoch, dass die Versuchspersonen in der hohen Verkehrskomplexität die Nebenaufgabe besser absolvierten als in der niedrigen Verkehrskomplexität. Dies deutet darauf hin, dass die hohe Verkehrskomplexität ein angemessenes Beanspruchungslevel für die Versuchspersonen darstellte, wohingegen die niedrige Verkehrskomplexität möglicherweise nicht herausfordernd genug war. (Eine weitere Erklärung bezüglich der Verkehrskomplexität folgt).

Dass sich AR-Informationen unterstützend auf das Navigieren in uneindeutigen Situationen auswirken, bestätigt auch das Fahrverhalten. Auch in dieser Studie zeigte sich, dass mit dem AR Displays weniger Navigationsfehler gemacht wurden als mit dem HUD. Mit dem HUD entschieden sich die Versuchspersonen signifikant häufiger für die falsche Abbiegung in uneindeutigen Navigationssituationen. Festgestellt wurde außerdem, dass die Versuchspersonen mit einem HUD vermehrt mehrere Navigationsfehler machten, wohingegen sie mit dem AR Display keinen zweiten Fehler verursachten. Das kann auf eine verbesserte Orientierung in der Navigationsaufgabe bedingt durch das AR Display zurückgeführt werden. Diese Daten sprechen außerdem für eine schnelle Erlernbarkeit der AR-Informationen. Des Weiteren kann die digitale Distanzangabe des HUDs

Schwierigkeiten für die Fahrenden verursacht haben. Die Distanzangabe ist in einem AR Display durch die Positionsgenauigkeit in der Darstellung integriert. Resultierend müssen die Fahrenden keine digitale Zahleninformationen interpretieren und verstehen die verbleibende Distanz zur Zielabbiegung intuitiver.

Anzumerken ist, dass mit dem HUD die meisten Navigationsfehler in der niedrigen Verkehrskomplexität passierten. Eine nähere Analyse verdeutlichte, dass dies durch zwei Versuchspersonen verursacht wurde, die das HUD in der niedrigen Verkehrskomplexität als erstes erlebten und an der ersten uneindeutigen Abbiegung bis zu drei Fehlern machten.

Die subjektiven Daten untermauern den Effekt der Anzeigart. Den Versuchspersonen gefiel das AR Display besser als das HUD. Sie empfanden das Fahren mit dieser Anzeigart als angenehmer und verstanden die augmentierten Navigationsinformationen besser. Außerdem bewerteten sie das AR Display als entlastender und als nützlicher für die Navigationsaufgabe. Die Fahraufgabe bewerteten die Versuchspersonen in Interaktion mit dem AR Display als leichter als mit dem HUD. Die Verkehrskomplexität zeigte keinen Einfluss auf die Bewertung des AR Displays. Des Weiteren wurde die Überlagerung der AR-Informationen über andere Verkehrsteilnehmer in der niedrigen und in der hohen Verkehrskomplexität als „wenig störend“ bewertet.

Die Manipulation der Verkehrskomplexität wurde subjektiv nicht wahrgenommen. Lediglich etwas mehr als die Hälfte aller Versuchspersonen nahm einen Unterschied in der Verkehrskomplexität wahr. Etwas weniger als die Hälfte aller Versuchspersonen, die die unterschiedliche Verkehrskomplexitäten wahrgenommen hatten, konnte eine korrekte Zuordnung vornehmen. Angenommen wird, dass die in dieser Studie realisierte Verkehrskomplexität die Fahraufgabe zu wenig beeinflusste. So könnten die parkenden Fahrzeuge die Sicht auf die Abbiegung erschwert, die allgemeine Fahraufgabe jedoch womöglich wenig beeinflusst haben. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Verkehrskomplexität ausschließlich in spezifischen Situationen (z.B. Warten, um abzubiegen, aufgrund von einem hohen Verkehrsaufkommen) von Bedeutung ist. Diese Situationen waren im Vergleich zur ganzen Fahrt zu selten vertreten und somit wurde die Verkehrskomplexität als zu wenig störend und damit als nicht auffällig wahrgenommen. Zukünftige Studien sollten sich hinsichtlich der Verkehrskomplexität ausschließlich auf den fließenden Verkehr konzentrieren und Navigationssituationen untersuchen, in denen die Verkehrskomplexität eine große Rolle spielt, wie beispielsweise das Einfädeln bei einem hohen Verkehrsaufkommen.

In Bezug auf die Limitationen der Studie muss diskutiert werden, dass die beiden Anzeigarten nicht zu jedem Zeitpunkt die gleichen Informationen präsentierten. Das HUD präsentierte zu Beginn einen Pfeil, der geradeaus zeigte. Die Richtungsinformationen konnten gezeigt werden, wenn weniger als drei Kreuzungen bevorstanden. Im Gegensatz dazu konnten die Fahrenden im AR Display von Weitem erkennen, ob es sich um eine Links- oder eine Rechtsabbiegung handelte, da die AR-Informationen positionsgenau in der Umwelt verortet erschienen. Dies kann ein Vorteil von AR-Informationen sein.

Anzumerken ist, dass in dieser Studie der Einfluss der grafischen Gestaltung der dargestellten AR-Informationen nicht betrachtet wurde und somit keine generalisierte Aussage dazu abgeleitet werden kann.

Zusammenfassend werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Studie 2 in Tabelle 6.14 aufgeführt:

Tabelle 6.14: Ergebnisse der Studie 2.

<i>Einfluss der Anzeigart</i>
<p>(1) keine Hinweise auf einen Cognitive-Capture-Effekt bedingt durch das AR Display oder das HUD in uneindeutigen Navigationssituationen</p> <ul style="list-style-type: none"> - keine Hinweise auf Unterschiede in der horizontalen Blickstreuung zwischen den beiden Anzeigarten während der Annäherung an uneindeutige Abbiegesituationen - höhere aufsummierte Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug und die Gegenfahrbahn in der uneindeutigen Linksabbiegung mit dem AR Display als mit dem HUD - AR Display als weniger ablenkend als das HUD bewertet, beide Anzeigarten als „wenig ablenkend“ wahrgenommen
<p>(2) weniger beanspruchendes Navigieren in uneindeutigen Situationen mit dem AR Display als mit dem HUD</p> <ul style="list-style-type: none"> - bessere Leistung in der kognitiven Nebenaufgabe während der Annäherung an uneindeutige Abbiegesituationen mit dem AR Display - geringere durchschnittliche Blickwechselanzahl zwischen der Zielabbiegung und dem AR Display als mit dem HUD → mentaler Abgleich der virtuellen Informationen in die Umwelt scheinbar nicht nötig - AR Display als entlastender als das HUD bewertet
<p>(3) verbesserte Orientierung in der Fahraufgabe durch positionsgenaue Verortung der AR-Informationen</p> <ul style="list-style-type: none"> - weniger Navigationsfehler in uneindeutigen Abbiegesituationen mit dem AR Display als mit dem HUD - Fahraufgabe mit dem AR Display als leichter als mit dem HUD bewertet - AR-Informationen als verständlicher und hilfreicher bewertet als HUD-Informationen
<p>(4) keine Unterschiede im Abbiegeverhalten in uneindeutigen Navigationssituationen mit entgegenkommendem Fahrzeug zwischen den beiden Anzeigarten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mehrheit aller Versuchspersonen hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug in der uneindeutigen Linksabbiegung, unabhängig der Anzeigart, abgebogen
<p>(5) erhöhte Nutzerakzeptanz des AR Displays im Vergleich zu dem HUD</p> <ul style="list-style-type: none"> - AR Display als nützlicher und als geeigneter für die Navigationsaufgabe als das HUD bewertet
<i>Einfluss der Verkehrskomplexität</i>
<p>(1) Einfluss der Verkehrskomplexität auf die Blickdauer</p> <ul style="list-style-type: none"> - höhere aufsummierte Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug und die Gegenfahrbahn in der hohen Verkehrskomplexität als in der niedrigen Verkehrskomplexität - besonders in der hohen Verkehrskomplexität mehr auf das entgegenkommende Fahrzeug mit dem AR Display geschaut als mit dem HUD - kein Einfluss der Verkehrskomplexität auf die Blickstreuung während der Annäherung an uneindeutige Abbiegesituationen

(2) angemessenes Beanspruchungslevel durch hohe Verkehrskomplexität in dieser Fahrsimulatorstudie

- kognitive Nebenaufgabe in der hohen Verkehrskomplexität besser als in der niedrigen Verkehrskomplexität absolviert
-

(3) kein Einfluss der Verkehrskomplexität auf die Orientierung in der Fahraufgabe

- keine Unterschiede bei Navigationsfehlern zwischen der hohen und der niedrigen Verkehrskomplexität
 - kein Einfluss der Verkehrskomplexität auf die Bewertung der Schwierigkeit der uneindeutigen Linksabiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug
 - Entscheidung vor oder hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug abzubiegen in der niedrigen Verkehrskomplexität als leichter bewertet als in der hohen Verkehrskomplexität, in beiden Bedingungen als leicht wahrgenommen
-

(4) kein Einfluss der Verkehrskomplexität auf die Bewertung der AR-Informationen

- Überlagerung der AR-Informationen über andere Verkehrsobjekte in der niedrigen und in der hohen Verkehrskomplexität als „wenig störend“ bewertet
 - kein Einfluss der Verkehrskomplexität auf die Nutzerakzeptanz des AR Displays
 - unterschiedliche Verkehrskomplexität von der Hälfte der Versuchspersonen nicht wahrgenommen
-

Im Rahmen dieser Fahrsimulatorstudie konnte gezeigt werden, dass AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD ebenfalls keine Aufmerksamkeitsbindung bedingen. Des Weiteren wurde im Vergleich zu der ersten Fahrsimulatorstudie ein realistischeres Fahrszenario umgesetzt. Die Versuchspersonen navigierten pro Fahrt jeweils 12 Minuten durch ein vorstädtisches Szenario mit anderen Verkehrsteilnehmern. Im Rahmen der folgenden Untersuchung wurde eine Validierung im realen Setting angestrebt. Es stellte sich die Frage, ob sich die gefundenen Potentiale von AR in den Fahrsimulatorstudien auch in einem realen Setting zeigen. Untersucht wurde, ob ein AR Display in einem realen Setting eine unterschiedliche Blickstreuung als das HUD auslöst. Generell wurde angenommen, dass die Blickstreuung in einem Simulator weniger ausgeprägt ist als in einer realen Fahrsituation. Ebenfalls wurde untersucht, ob die Fahrerbeanspruchung durch das AR Display im Vergleich zu einem HUD in einer realen Navigationssituation reduziert werden kann. Des Weiteren wurde das Navigieren hinsichtlich Navigationsfehlern und das subjektive Erleben in einer realen Navigationssituation analysiert.

7 Realfahrtstudie: Validierung der Effektivität von AR-Informationen

7.1 Zielsetzung

In den vorangegangenen Fahrsimulatorstudien konnten Potentiale eines AR Displays im Vergleich zu einem HUD in uneindeutigen Navigationssituationen identifiziert werden. Es wurde gezeigt, dass die positionsgenaue Verortung der AR-Informationen in der Umwelt zu frühzeitigeren Entscheidungen für das bevorstehende Abbiegemanöver führte. Die Ergebnisse zeigten ebenfalls eine reduzierte kognitive Beanspruchung in Interaktion mit einem AR Display im Vergleich zu einem HUD. Des Weiteren konnten mit AR-Informationen Navigationsfehler reduziert werden. Hinsichtlich des Blickverhaltens konnte keine Aufmerksamkeitsbindung in Form eines Cognitive-Capture-Effekts bedingt durch das AR Display festgestellt werden.

Die gefundenen Potentiale wurden nun in einer realen Navigationsaufgabe validiert. Die technische Umsetzung eines AR Displays in einem realen Fahrzeug kann zu Einschränkungen führen, die sich auf die Effektivität und die Nutzerakzeptanz der AR-Informationen auswirken können (Jansen, 2018; Pfannmüller et al., 2015b; Pfannmüller, 2017; Sadovitch, 2020). So können Sensorungenauigkeiten zu versetzten AR-Informationen führen und Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs ein Mitschwingen der AR-Informationen verursachen. Untersucht werden musste u.a., ob sich diese Einschränkungen in Form einer Aufmerksamkeitsbindung auswirken können. Anzumerken ist, dass unter technischen Einschränkungen hier Ungenauigkeiten und das Mitschwingen verstanden wurden, jedoch keine Fehler (z.B. Anzeige präsentiert die falsche Fahrtrichtung in einer Einbahnstraße). Ziel der folgenden Realfahrtstudie war die Validierung der gefundenen Potentiale eines AR Displays in einer realen Navigationsaufgabe. Untersucht wurde außerdem der Einfluss der Eindeutigkeit der Situation. Analysiert wurde, ob sich Unterschiede in den Verhaltensdaten zwischen eindeutigen und uneindeutigen Navigationssituationen zeigen. Vermutet wurde, dass Fahrende besonders in uneindeutigen Navigationsaufgaben von AR-Informationen profitieren können.

Mit dieser Realfahrtstudie wurden folgenden Forschungsfragen beantwortet:

- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf das Blickverhalten in unterschiedlich eindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf die Fahrerbeanspruchung in unterschiedlich eindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf die Erfüllung der Navigationsaufgabe (richtige Route finden) in unterschiedlich eindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?
- Welchen Einfluss haben AR-Informationen auf das subjektive Erleben in Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD?

Anmerkung: Im Rahmen dieser Realfahrtstudie wurde eine Masterarbeit von Frau Franziska Flehmer zu den abhängigen Variablen Blickverhalten, Navigationsfehler und subjektives Erleben angefertigt (Flehmer, 2020).

7.2 Methodik

Im Folgenden wird die Methodik der Studie 3 (Realfahrtstudie) beschrieben.

7.2.1 Fahrstrecken

In der Studie wurden die Versuchspersonen mit Hilfe von Navigationsinformationen über das Werksgelände der Volkswagen AG in Wolfsburg navigiert. Die Versuchsfahrten beinhalteten Zebrastreifen, Kreisverkehre, Brückenüberfahrten, Bahnübergänge mit Ampelschaltung und andere Verkehrsteilnehmer inklusive Fußgänger. Um Übungseffekte zu vermeiden, fuhren die Versuchspersonen zwei verschiedene Strecken, um das AR Display und das HUD zu testen. Bei den beiden zu untersuchenden Abbiegesituationen handelte es sich um eine eindeutige (ES) und eine uneindeutige Situationen (US) (Abbildung 7.1), die in beiden Fahrten enthalten waren (Abbildung 7.2, Abbildung 7.3). Die uneindeutige Situation beinhaltete drei mögliche Abbiegungen, die dicht hintereinander gelegen waren (Abbildung 7.1). Ursprünglich sollten vier Abbiegesituationen analysiert werden. Jedoch wurden zwei Abbiegesituation von der Analyse ausgeschlossen. In einer Abbiegesituation kam es zu technischen Problemen (nähere Erläuterungen in Kapitel 7.2.2). In einer weiteren Abbiegesituation zeigten die Versuchspersonen stark abweichendes Verhalten aufgrund eines Spurwechsels während der Annäherung an die Abbiegesituation. Die Geschwindigkeitsbegrenzung auf dem Werksgelände betrug 30 km/h. Die Fahrstrecken umfassten jeweils 7 km und dauerten ca. 20 Minuten.



Abbildung 7.1: Zu analysierende Abbiegesituationen der Realfahrtstudie auf dem Werksgelände der Volkswagen AG in Wolfsburg: eindeutige Abbiegesituation (links; modifiziert nach Flehmer, 2020, mit Genehmigung der Autorin), uneindeutige Abbiegesituation (rechts; modifiziert nach Flehmer, 2020, mit Genehmigung der Autorin).

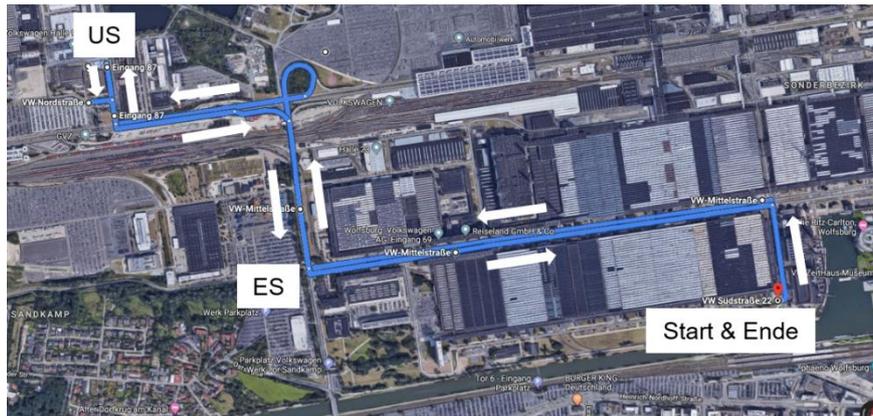


Abbildung 7.2: Vogelperspektive der Versuchsstrecke für das AR Display mit den zu untersuchenden Abbiegesituationen, US und ES (Bild abgerufen am 22.01.2023 unter www.googlemaps.de; Bilder © 2023 CNES / Airbus, GeoBasis-DE/BKG, GeoContent, Maxar Technologies, Kartendaten © 2023 GeoBasis-DE/BKG (©2009), modifiziert nach Flehmer, 2020, mit Genehmigung der Autorin).



Abbildung 7.3: Vogelperspektive der Versuchsstrecke für das HUD mit den zu untersuchenden Abbiegesituationen, US und ES (Bild abgerufen am 22.01.2023 unter www.googlemaps.de; Bilder © 2023 CNES / Airbus, GeoBasis-DE/BKG, GeoContent, Maxar Technologies, Kartendaten © 2023 GeoBasis-DE/BKG (©2009), modifiziert nach Flehmer, 2020, mit Genehmigung der Autorin).

7.2.2 Anzeigarten für die Navigation

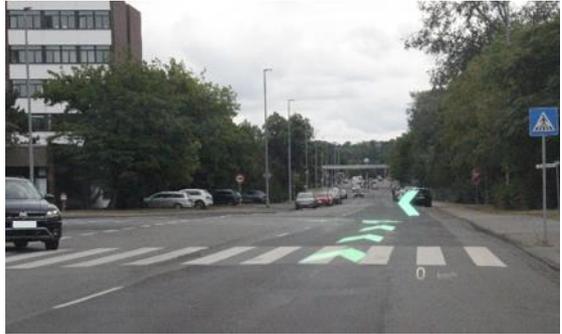
In der Studie erlebten die Versuchspersonen die Navigationsinformationen in einem HUD und in einem AR Display. Dafür fuhren sie zwei verschiedene Fahrzeuge. Tabelle 7.1 zeigt die Navigationsinformationen in den beiden Anzeigarten. In der Studie wurde das serienmäßige Windshield-HUD des VW Touaregs verwendet. Mit einer wahrgenommenen Projektionsdistanz von ca. 2 m schien die Anzeige über der Motorhaube zu schweben (Tabelle 7.1 a + b). Die projizierten Navigationshinweise erfolgten in Form eines weißen Pfeils. Außerdem wurde die verbleibende Entfernung in Metern zur Zielabbiegung angezeigt. Mit Annäherung an die Zielabbiegung wurde sowohl eine Kreuzungsübersicht als auch die eigene Position in Form eines roten Kreises auf dem weißen Navigationspfeil angezeigt. Ab 100 m vor der Zielabbiegung nahm die Entfernungsanzeige in 20-er Schritten ab.

Die AR-Anzeige war in Form einer Fischgräte in einem Golf R umgesetzt (Tabelle 7.1 c + d). Die türkisfarbigen Elemente lagen positionsgenau in der Umwelt verortet und ein stehender Pfeil zeigte in die Zielabbiegung (Tabelle 7.1). Im AR Display wurde eine Projektionsweite von 15 m vom Augpunkt entfernt realisiert. Die Größe des FOV betrug $10^\circ \times 4.8^\circ$.

Bedingt durch das begrenzte FOV und den Look-Down-Winkel des AR Displays konnten die AR-Informationen nicht direkt vor dem Fahrzeug eingeblendet werden. Die Fahrenden sahen diese mit einem gewissen Abstand zu dem Fahrzeug. Dass die Fahrenden die AR-Informationen ab 120 m vor der Zielabbiegung auf der Straße sahen, mussten diese somit früher eingeblendet werden. Es ergab sich eine Distanz von 140 m (ES) bzw. 137 m (US) vor der Zielabbiegung als die AR-Informationen eingeblendet wurden. Die unterschiedlichen Entfernungen sind auf Bedingungen in der Realfahrt zurückzuführen.

In beiden Anzeigen wurde die Geschwindigkeit im unteren Sichtfeld der Fahrenden mit einer Projektionsweite von ca. 2 m (Touareg) bzw. 15 m (Golf R) angezeigt (Tabelle 7.1 a-d). Jedoch unterschieden sich die beiden Anzeigearten hinsichtlich der durchgängigen Verfügbarkeit der Navigationsinformationen. Im HUD handelte es sich um eine durchgängige Navigationsanzeige der Serie, die zu jedem Zeitpunkt auf der Route verfügbar war. Im Gegensatz dazu war eine situative Manöverunterstützung im AR Display realisiert. In der Literatur wird im Sinne eines minimal gestalteten AR-Konzepts darauf hingewiesen ausschließlich fahrrelevante Informationen und lediglich Informationen für das bevorstehende Manöver zu präsentieren (Bengler et al., 2015; Eyraud et al., 2015; Pfannmüller, 2017; Wang et al., 2021), sodass Ablenkung (Ng-Thow-Hing et al., 2013) und eine Reizüberflutung vermieden werden. Analysiert wurden jedoch lediglich die beschriebenen Kreuzungen (US und ES), in denen die Anzeigen sichtbar waren. Somit sollte dieser Unterschied keinen Einfluss auf die zu analysierenden Daten haben. Des Weiteren wurden im AR Display keine Navigationsinformationen in der Statusleiste (zeigt Informationen am unteren Rand des Fahrerblickfeldes) präsentiert, um die gefundenen Effekte ausschließlich auf AR beziehen zu können und Einflüsse einer HUD-Darstellung zu vermeiden.

Tabelle 7.1 Navigationsinformationen in den Anzeigarten HUD (links) und AR Display (rechts) für die eindeutigen Situationen (ES) und die uneindeutigen Situationen (US) zu verschiedenen Zeitpunkten. In beiden Anzeigen wurde die gefahrene Geschwindigkeit angezeigt.

	HUD	AR Display
ES	<p>(a)</p>  	<p>(c)</p>  <p>*</p>
US	<p>(b)</p>  	<p>(d)</p> 

Anmerkung. *Dieses Bild konnte aus Sicherheitsgründen nicht aus der Fahrerperspektive aufgenommen werden, folglich zeigt es eine leichte Seitenansicht.

Wie bereits in Kapitel 7.2.1 erwähnt, sollten ursprünglich vier Abbiegesituationen analysiert werden. In einer zweiten uneindeutigen Situation kam es zu Schwierigkeiten hinsichtlich der Verortung der AR-Informationen, die auf die prototypische Integration des AR Displays zurückzuführen sind. Bedingt durch die verengte Fahrbahn durch parkende Fahrzeuge vor dieser Abbiegesituation, fuhren die Versuchspersonen weit links in der eigenen Fahrspur. Da die AR-Informationen positionsgenau verortet in der Umwelt angezeigt werden und das FOV des AR Displays begrenzt ist, wirkte die Trajektorie

abgeschnitten (Abbildung 7.4 links). In anderen Fällen wurde die AR-Trajektorie auf der Straße nicht angezeigt. Ausschließlich der stehende AR-Pfeil zeigte in die Zielabbiegung (Abbildung 7.4 rechts). Diese Information reichte jedoch nicht aus, um die richtige Zielabbiegung in dieser uneindeutigen Situation zu identifizieren. Resultierend wurde entschieden, diese Abbiegesituation von der Analyse auszuschließen.

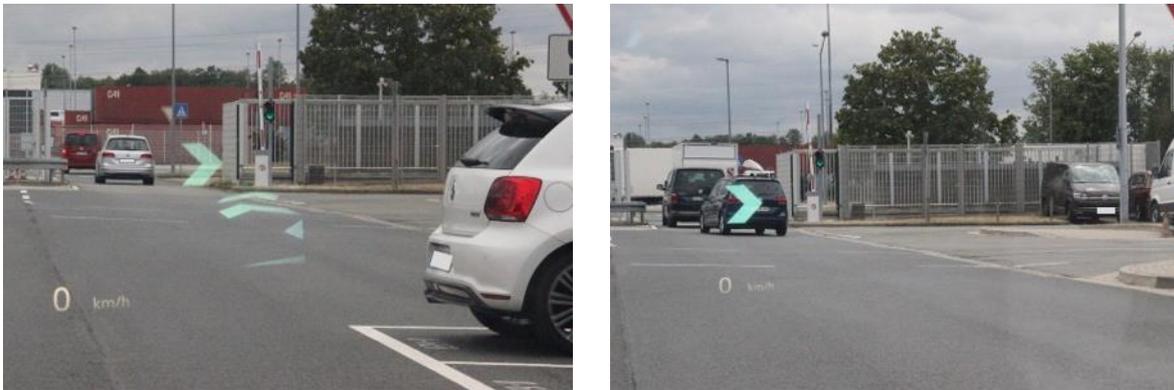


Abbildung 7.4: Fehlerhafte Darstellungen der AR-Informationen in einer zweiten uneindeutigen Abbiegesituation: abgeschnittene AR-Trajektorie durch das begrenzte FOV des AR Displays (links) und fehlende AR-Trajektorie (rechts; Flehmer, 2020, mit Genehmigung der Autorin).

7.2.3 Aufgabe der Versuchspersonen

Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, die richtige Route mit Hilfe der Navigationsinformationen im AR Display bzw. im HUD zu finden. Vermieden werden sollte, dass die Versuchspersonen ausschließlich die Anzeige fixieren, aufgrund der Neuartigkeit des AR Displays und da sie erwarteten die Anzeige nach der Fahrt zu bewerten. Somit bekamen sie die Aufgabe in der ersten Versuchsfahrt ein Paket aufzusammeln und in der zweiten Versuchsfahrt wieder auszuliefern. Dazu würden sie während der Fahrt weitere Instruktionen vom Versuchsleiter erhalten. Diese Aufgabe sollte ein natürliches Blickverhalten während der Fahrten fördern.

Neben der Navigationsaufgabe wurden die Versuchspersonen gebeten eine Nebenaufgabe zu absolvieren. Diese Aufgabe diente dazu, die Fahrerbeanspruchung zu erfassen und die Schwierigkeit der Fahraufgabe zu erhöhen. Es handelte sich um eine auditive, kognitive, räumliche Zahlenaufgabe. Dazu hörten die Versuchspersonen positive Zahlen randomisiert von eins bis neun aus einem Lautsprecher, der sich im Fußraum hinter dem Fahrersitz befand. Es wurden Druckknöpfe an den Daumen der Versuchspersonen befestigt (Abbildung 7.5), sodass sie jede Zahl bewerten konnten. Die Versuchspersonen sollten den Knopf am rechten Daumen gegen das Lenkrad drücken, wenn es sich um ungerade Zahlen handelte. Bei geraden Zahlen sollten die Versuchspersonen den Knopf am linken Daumen gegen das Lenkrad drücken. Im Rahmen eines Pre-Tests wurde das Intervall der gesagten Zahlen auf drei Sekunden festgelegt, um das sichere Fahren nicht zu gefährden.



Abbildung 7.5: Druckknöpfe an den Daumen der Versuchspersonen für die Beantwortung der Nebenaufgabe. Zur Stabilisierung der Knöpfe dienten kleine Taschen mit Klettverschluss. Klettverschlussverbände unterhalb der Ellenbogen verhinderten, dass sich das Kabel bei Bewegungen spannte und die Druckknöpfe verrutschen.

7.2.4 Stichprobe

An der Realfahrtstudie nahmen insgesamt 58 Versuchspersonen teil, wovon alle einen Prototypenführerschein besaßen. Aufgrund von technischen Problemen konnten 48 Versuchspersonen ausgewertet werden (davon 3 Frauen). Durchschnittlich waren die Versuchspersonen 42.2 Jahre ($SD = 9.1$ Jahre) alt und fuhren durchschnittlich 23312.5 km im vergangenen Jahr ($SD = 11720.4$ km). Sie gaben an den Führerschein durchschnittlich seit 25 Jahren ($SD = 9.90$ Jahren) zu besitzen. 77% der Versuchspersonen hatten Erfahrung mit einem HUD. Davon gaben jedoch 43% an, dieses nur selten zu nutzen. 77% aller Versuchspersonen sind bereits oft bzw. sehr oft auf dem Werksgelände gefahren. Vor den Versuchsfahrten absolvierten die Versuchspersonen Übungsfahrten in den Versuchsträgern. Die Versuchspersonen wurden vom Probandenpool der Group Innovation der Volkswagen AG rekrutiert und erhielten für ihre Teilnahme ein Geschenk.

7.2.5 Untersuchungsdesign

Für diese Fahrsimulatorstudie wurden die APA Ethik Standards (Ethical Principles of Psychologists and Code of Conduct, 2017) strikt befolgt. Die Realfahrtstudie wurde als 2x2 within-subjects Design mit den unabhängigen Variablen Anzeigart (AR Display vs. HUD) und Eindeutigkeit der Situation (US vs. ES) umgesetzt (Abbildung 7.6). Die Hälfte der Versuchspersonen startete mit dem HUD und fuhr anschließend das AR Display. Die andere Hälfte der Versuchspersonen startete mit dem AR Display.

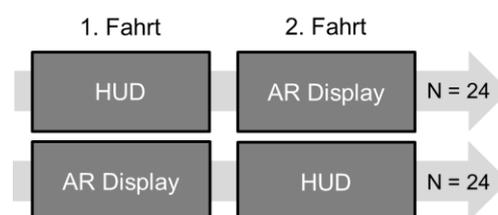


Abbildung 7.6: Untersuchungsdesign der Realfahrtstudie.

Im Rahmen der Realfahrtstudie wurden (1) die Fahrerbeanspruchung, (2) das Blickverhalten, (3) die Fahrleistung und (4) die subjektive Bewertung der Systeme erfasst.

Die Daten wurden für die zwei Abbiegesituationen (US und ES) analysiert. Die Tabelle 7.2 gibt einen detaillierten Überblick über die erfassten AVs. Die zu analysierenden Zeiträume und Zeitpunkte werden in Abbildung 7.7 deutlich.

Tabelle 7.2: Überblick über die erfassten Daten der Realfahrtstudie.

Datenbezeichnung	Art der Daten	Erklärung
Fahrerbeanspruchung	Leistung in Nebenaufgabe	Häufigkeit korrekter Antworten pro Sekunde [1/s] und Antwortzeit [s] auf gerade und ungerade Zahlen zur Erfassung der objektiven mentalen Beanspruchung
Blickverhalten	horizontale und vertikale Blickstreuung	Standardabweichung der Blickstreuung entlang der X- und der Y-Achse [°] zur Erfassung der visuellen Aufmerksamkeitsstreuung
Navigationsleistung	Navigationsfehler	Anzahl der falsch identifizierten Zielabbiegungen in der Navigationsaufgabe
subjektives Erleben	subjektive Bewertung	Fragebogen nach jeder Fahrt: <ul style="list-style-type: none"> - Anzeigebewertung - Fahrtbewertung - Bewertung der Nebenaufgabe persönliche Angaben vor der Studie: <ul style="list-style-type: none"> - Fragen zur Demographie Abschlussbefragung am Ende der Studie: <ul style="list-style-type: none"> - Anzeigepräferenz - Manipulationscheck (Eindeutigkeit der Situation)

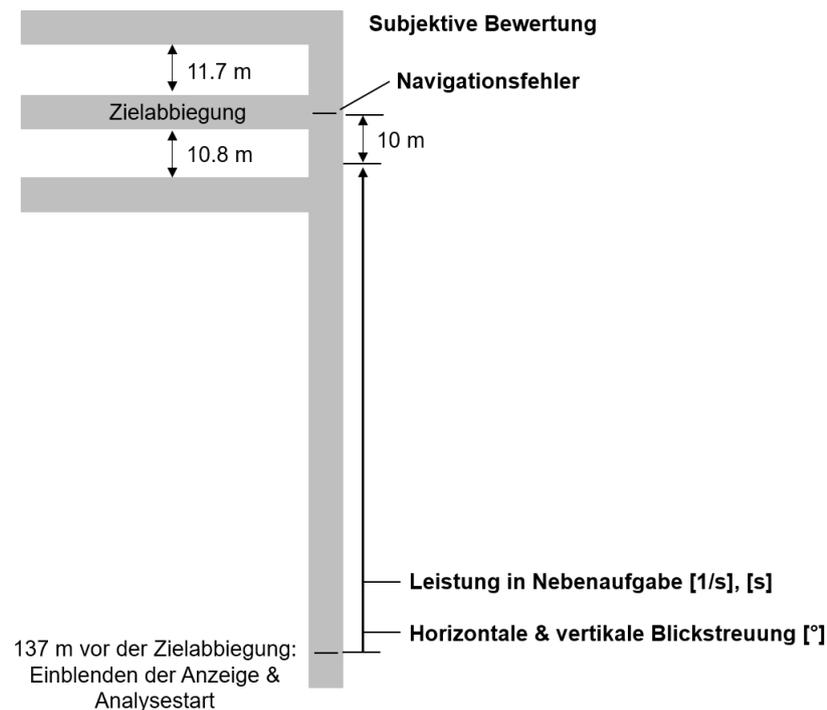


Abbildung 7.7: Exemplarische Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Annäherung an die uneindeutige Abbiegesituation mit den abhängigen Variablen der Realfahrtstudie (abhängige Variablen sind in Fett markiert).

Als objektives Maß der Fahrerbeanspruchung wurde die Leistung in einer auditiven, kognitiven, räumlichen Nebenaufgabe erfasst (Jahn et al., 2005; Kapitel 5.2.5). Wie in den Simulatorstudien zuvor handelte es sich bei der Nebenaufgabe um eine Zahlenaufgabe, die zusätzlich zur Fahraufgabe ausgeführt wurde (Kapitel 5.2.3 und 6.2.3). Die Versuchspersonen hörten positive Zahlen randomisiert von eins bis neun. Sie wurden instruiert bei geraden Zahlen den linken Druckknopf gegen das Lenkrad zu drücken und bei ungeraden Zahlen den rechten (Kapitel 7.2.3). Es handelte sich um eine räumliche Aufgabe, da die Versuchspersonen die Zahlen rechts und links zuordnen mussten. Analysiert wurden die mittlere Antwortzeit in Sekunden und die Häufigkeit korrekter Antworten pro Sekunde für die zu analysierenden Abbiegesituationen. Der Analysebereich stimmte mit dem der Blickstreuung überein (siehe unten und Abbildung 7.7). Das Intervall der gesagten Zahlen betrug 3 s.

Um Hinweise auf mögliche aufmerksamkeitsbindenden Effekte bedingt durch AR-Informationen zu erhalten, wurde die visuelle Aufmerksamkeitsstreuung (Operationalisierung in Kapitel 6.2.5) während des Suchens und Entscheidens für die richtige Zielabbiegung in Interaktion mit den Navigationsanzeigen untersucht. Dafür wurde die Standardabweichung der Pupillenposition entlang der X-Achse bzw. der Y-Achse des Fahrerblickfeldes erfasst (Abbildung 6.4 in Kapitel 6.2.5). Dieses Maß entspricht der horizontalen bzw. vertikalen Blickstreuung (Suchaktivität) und wurde in der Einheit Grad erfasst. Um natürliche Kopfbewegungen der Versuchspersonen im Realfahrzeug zu berücksichtigen, wurde ein markerbasiertes Koordinatensystem für die Analyse der Blickstreuung ausgewählt. Der Marker konnte jedoch nicht im zentralen Fahrerblickfeld angebracht werden, da er mittig auf der Windschutzscheibe positioniert wäre und dementsprechend fahrrelevante Informationen in der Umwelt und die Anzeige verdeckt

hätte. Die Analyse basiert somit auf zwei Markern, die rechts und links des zentralen Fahrerblickfelds im Fahrzeug angebracht waren und parallel ausgewertet wurden. Es wird jedoch ein vergleichbares Ergebnis der beiden Marker erwartet (nähere Erläuterungen in Kapitel 7.3.1).

Somit diente die Untersuchung der Blickstreuung in dieser Realfahrtstudie als Maß für eine situationsangemessene Aufmerksamkeitsstreuung. Die Blickdauer auf ein entgegenkommendes Fahrzeug in einer Linksabbiegung (Kapitel 6.2.5) wurde nicht untersucht, da sich die benötigte Standardisierung im realen Straßenverkehr als schwierig gestaltete.

Startpunkt für den Analysebereich der Fahrerbeanspruchung und der Blickstreuung war der Punkt, an dem die Navigationsanzeige sichtbar wurde. Aufgrund der Bedingungen in der Realfahrt variierte dieser zwischen den einzelnen Situationen (US: 137 m und ES: 140 m vor der jeweiligen Zielabbiegung). Mit Hilfe einer visuellen Inspektion wurde der Endpunkt festgelegt, sodass erste zielgerichtete Blicke für das bevorstehende Abbiegemanöver bzw. erste Manöverhandlungen ausgeschlossen werden konnten. Diese Entscheidung basiert auf der Annahme, dass erste zielgerichtete Blicke für das bevorstehende Abbiegemanöver nicht mehr zum Suchen und Entscheiden für die Zielabbiegung zählen. Erste Manöverhandlungen dagegen interferieren mit dem Ausführen der Nebenaufgabe. Resultierend wurden folgende Endpunkte festgelegt: US: 10 m (Abbildung 7.7) und ES: 33 m vor der jeweiligen Zielabbiegung. Demnach ergeben sich die Analysebereiche wie folgt: US: 127 m und ES: 107 m. Analysiert wurden alle Antworten auf Zahlen sowie alle Blicke, die in den jeweiligen Analysebereichen lagen.

Die Navigationsfehler geben Aufschluss über die falsche Identifizierung der Zielabbiegung und dienen als Maß der Navigationsleistung. Im Fall eines Navigationsfehlers wurde die Versuchsperson vom Versuchsleiter über seinen Fehler informiert und mündlich an der nächsten Gelegenheit auf die Navigationsstrecke zurückgeführt.

Neben den objektiven Daten wurden zusätzlich subjektive Daten zur Bewertung der Anzeige, der Fahrt und der Nebenaufgabe erhoben (Anhang: Fragebögen Studie 3). Die Tabelle 7.3 gibt einen Überblick über die verschiedenen Fragebögen. Die Beantwortung der Fragen erfolgte auf einer 15-Punkte Kategorienunterteilungsskala (Heller, 1982) (Abbildung 7.8). Die offenen Fragen ergaben keinen Mehrwert zu den geschlossenen Items und werden hier nicht aufgeführt. Hinsichtlich der Anzeigebewertung wurde das allgemeine Gefallen der Anzeige, der Nutzen, die Funktionalität, das angenehme Fahren mit der Anzeige und wie stark die Anzeige die Aufmerksamkeit auf sich gezogen hat erhoben (Tabelle 7.3). Die Bewertung des Nutzens umfasste die Nützlichkeit, die Eignung, die Entlastung, die Ablenkung und die störende Überlagerung (ausschließlich für das AR Display). Die Bewertung der Funktionalität bezog sich auf die Verständlichkeit. Ergänzend wurde der evaluierte Fragebogen zur Akzeptanzbewertung von Van der Laan et al. (1997) eingesetzt. Für diesen wurden neun bipolare Itempaare auf einer fünfstufigen Skala bewertet. Die subjektiv erlebte Beanspruchung während der Fahrten mit den beiden Anzeigearten wurde mit dem Driver Activity Load Index (DALI) von Pauzié (2008) erfasst. Die Items wurden auf einer Skala von 0 bis 100 bewertet. Um die Wahrnehmung und die Reaktion der Nutzer auf die Anzeigearten differenzierter zu untersuchen, wurde die User Experience mit dem gleichnamigen Fragebogen in der Kurzversion (UEQ-S) von Schrepp et al. (2017) erfasst. Bewertet wurden acht bipolare Itempaare auf einer siebenstufigen Skala. Des Weiteren wurde die Anzeigegestaltung bewertet. Diese umfasste die allgemeine

Gestaltung, die Positionierung, die Größe und die Transparenz. Nach der Studie wurde die Präferenz hinsichtlich der Anzeigeart erfragt.

Neben der Anzeige wurde auch die Fahraufgabe (Navigationsaufgabe + Nebenaufgabe) und die Nebenaufgabe bewertet (Tabelle 7.3). Erfasst wurde die Schwierigkeit der Fahraufgabe sowie die Schwierigkeit der Navigationsaufgabe mit der Anzeige. Bewertet wurde außerdem die Leichtigkeit die Abbiegung zu finden. Fragen zur Nebenaufgabe umfassten die Anstrengung der Nebenaufgabe sowie die Ablenkung und die Beanspruchung durch die Nebenaufgabe.

Vor und nach dem Versuch wurde das Befinden für einen Prä-Post-Vergleich erhoben, der der Kontrolle des Versuchsleiters hinsichtlich des Wohlbefindens der Versuchspersonen diente (der Fragebogen wurde von Professor Mark Vollrath entwickelt). Fragen zur Demographie umfassten das Alter, das Geschlecht, wann der Führerschein erworben wurde und die gefahrenen Kilometer des vergangenen Jahres. Die bisherige Erfahrung mit HUDs wurde ebenfalls erfasst. Erfasst wurde außerdem, wie häufig die Versuchspersonen bereits über das Werksgelände gefahren sind. Gefragt wurde ebenfalls wie leicht das Handling des jeweiligen Fahrzeugs war.

Am Ende der Studie erfolgte ein Manipulationscheck, um herauszufinden, ob sich die getesteten Situationen in ihrer Eindeutigkeit unterschieden. Dafür bewerteten die Versuchspersonen die Eindeutigkeit der eindeutigen und der uneindeutigen Situationen.

Tabelle 7.3: Art und Zeitpunkt der Fragebögen mit den Items der Studie 3.

Art und Zeitpunkt des Fragebogens	Kategorie	Items
Fragebogen vor den Versuchsfahrten	Demographie	<ul style="list-style-type: none"> - Geschlecht - Alter - Führerschein erworben - gefahrene Kilometer im letzten Jahr - Erfahrung Fahren Werksgelände - Erfahrung mit HUD
	Befinden	<ul style="list-style-type: none"> - momentane Anspannung - momentane Aktivität - momentane positive Stimmung - momentane Leistungsfähigkeit - momentane nach außen Gerichtetheit
Fragebogen nach den Versuchsfahrten mit jeweiliger Anzeigeart	Anzeigebewertung	<ul style="list-style-type: none"> - allgemeines Gefallen der Anzeige - Nutzen (Nützlichkeit, Eignung, Entlastung, Ablenkung, störende Überlagerung [ausschließlich für AR Display]) - Anzeige zieht Aufmerksamkeit - die Funktionalität (Verständlichkeit) - angenehmes Fahren - Driver Activity Load Index (Pauzié, 2008) - Akzeptanzbewertung (Van der Laan et al., 1997) - User Experience Questionnaire Kurzversion (Schrepp et al., 2017) - Anzeigegestaltung (Gestaltung allgemein, Positionierung, Größe, Transparenz) - Handling des Fahrzeugs
	Fahrtbewertung	<ul style="list-style-type: none"> - Schwierigkeit der Fahraufgabe - Schwierigkeit der Navigationsaufgabe - Leichtigkeit die Abbiegung zu finden
	Bewertung der Nebenaufgabe	<ul style="list-style-type: none"> - Anstrengung der Nebenaufgabe - Ablenkung durch die Nebenaufgabe - Beanspruchung durch die Nebenaufgabe
Abschlussbefragung	Anzeigepräferenz & Manipulationscheck	<ul style="list-style-type: none"> - gewünschte Anzeige im eigenen Fahrzeug - Manipulationscheck (Eindeutigkeit der Situation)
	Befinden	<ul style="list-style-type: none"> - s.o.

nicht sehr nützlich			nicht nützlich			mittel			nützlich			sehr nützlich		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Abbildung 7.8: 15-Punkte Kategorienunterteilungsskala, angelehnt an Heller (1982) am Beispiel: „Wie nützlich empfanden Sie die Anzeige für die Navigationsaufgabe?“

7.2.6 Fahrzeuge, Eye-Tracker und Nebenaufgabe

Die Abbildung 7.9 zeigt die beiden Versuchsträger, die in der Realfahrtstudie zum Einsatz kamen: Ein Golf R mit eingebautem AR Display der Größe $10^\circ \times 4.8^\circ$ und das Serienfahrzeug VW Touareg mit einem Windshield-HUD.



Abbildung 7.9: Versuchsfahrzeuge der Realfahrt: Golf R mit eingebauten AR Display (links; Flehmer, 2020, mit Genehmigung der Autorin) und VW Touareg mit Serien-HUD, das in die Windschutzscheibe projiziert wird (rechts; Flehmer, 2020, mit Genehmigung der Autorin).

Um das Blickverhalten zu erfassen, wurde ein binokularer Eye-Tracker, Dikablis Glasses 3 von Ergoneers (Dikablis glasses 3, 2018) verwendet (Abbildung 7.10). Es handelte sich um ein Head-Mounted-System, welches mit einer Frequenz von 60 Hertz aufzeichnete. Neben der Feldkamera, die das Sichtfeld der Versuchsperson erfasste, waren zwei Kameras auf die Augen der Versuchsperson gerichtet.

Für das Abspielen der Nebenaufgabe befand sich ein Lautsprecher im Fußraum hinter dem Fahrersitz. Ein Raspberry Pi spielte die Zahlen randomisiert ab. Um die Antworten der Versuchspersonen zu erfassen, wurden kleine Drückknöpfe an den Daumen der Versuchspersonen befestigt. Um die Knöpfe zu stabilisieren wurden kleine Taschen mit Klettverschluss auf die Daumen gesetzt. Zur Erfassung und Speicherung der Antworten waren die Druckknöpfe mit dem Raspberry verbunden (Abbildung 7.10). Klettverschlussverbände unterhalb der Ellenbogen verhinderten, dass sich das Kabel bei Bewegungen spannte und die Druckknöpfe verrutschen.



Abbildung 7.10: Versuchssetting der Realfahrt. Zur Erfassung des Blickverhaltens trug die Versuchsperson eine Eye-Tracking Brille von Ergoneers (Dikablis glasses 3, 2018). Druckknöpfe für die Erfüllung der Nebenaufgabe waren an beiden Daumen befestigt.

7.2.7 *Versuchsablauf*

Nachdem die Versuchspersonen eine Datenschutzerklärung unterschrieben hatten, nahmen sie randomisiert in einem der beiden Fahrzeuge (AR-Prototyp oder Touareg) Platz. Sie füllten die Vorbefragung zu persönlichen Daten und Angaben über das eigene Fahrverhalten aus. Anschließend wurde der Eye-Tracker auf ihrem Kopf justiert und kalibriert. Es folgte die Erklärung der Coverstory: Ein Paket zu finden und in der zweiten Versuchsfahrt wieder abzuliefern. Dazu sollten sie die richtige Route mit Hilfe von Navigationshinweisen in einer Anzeige finden. Die zum ersten Fahrzeug gehörende Anzeigeart, HUD oder AR Display, wurde den Versuchspersonen mit Bildmaterial gezeigt und erklärt. Es folgte eine Übungsfahrt. Im nächsten Schritt erlernten die Versuchspersonen die auditive, kognitive, räumliche Nebenaufgabe. Diese wurde zuerst im Stand und im Anschluss während einer weiteren Übungsfahrt trainiert. Im Rahmen der Versuchsfahrt wurden die Versuchspersonen im Fall eines Navigationsfehlers vom Versuchsleiter über ihren Fehler informiert und mündlich auf die Navigationsstrecke zurückgeführt. Nach der Hälfte der Versuchsfahrt wurde der Ablageort des Pakets erreicht. Der Versuchsleiter informierte die Versuchspersonen, dass das Paket hier eingesammelt wird. Dazu stieg der Versuchsleiter aus und nahm das Paket. Nach der Fahrt füllten die Versuchspersonen einen Fragebogen zur Evaluation der Anzeige aus. In dieser Zeit wurde die Messtechnik aus dem ersten Fahrzeug genommen und im zweiten Fahrzeug montiert. Nachdem die Versuchspersonen in das zweite Fahrzeug gewechselt hatten, wurde der Eye-Tracker auf ihrem Kopf justiert und kalibriert. Nachdem die Erklärung der Anzeigeart des zweiten Fahrzeugs in Form von Bildmaterial erfolgt war, wurde eine Übungsfahrt (ohne Nebenaufgabe) durchgeführt. Es folgte die zweite Versuchsfahrt mit Nebenaufgabe, in der das Paket in der Hälfte der Strecke auf Anweisung des Versuchsleiters an einer zweiten Stelle ausgeliefert wurde. Nach der Fahrt wurden den Versuchspersonen der Eye-Tracker abgenommen. Es folgte eine Abschlussbefragung. Nachdem die Versuchspersonen als Dankeschön ein Geschenk erhalten hatten, wurden sie verabschiedet. Der Versuch dauert jeweils 120 Minuten pro Versuchsperson.

7.3 Ergebnisse

7.3.1 Datenaufbereitung und –auswertung

Im Folgenden wird das Vorgehen der Analysen der einzelnen Daten beschrieben. Technische Probleme führten zu reduzierten Datensätzen in einzelnen Analysen. Für die interferenzstatistische Auswertung wurde ein Signifikanzniveau von 5% angenommen. Die varianzstatistische Analyse wird als robust gegenüber Verletzungen der Normalverteilung angesehen (Blanca et al., 2017; Schmider, et al., 2010).

Im Rahmen der Analyse des Blickverhaltens zur visuellen Aufmerksamkeitsstreuung konnten Datensätze von 27 Versuchspersonen berücksichtigt werden. Es wurden 21 Versuchspersonen aufgrund von technischen Problemen und einer zu langen Fahrdauer bedingt durch ein hohes Verkehrsaufkommen in den Analysebereichen ausgeschlossen. Die Aufbereitung der Blickdaten erfolgte mit der Software D-Lab (Ergoneers GmbH, 2022b). Als erstes wurden die zu analysierenden Zeiträume gekennzeichnet. Für diese Zeiträume wurden Fehler in der Pupillenerkennung und nicht erkannte Frames händisch korrigiert. Für die Analyse wurde ein markerbasiertes Koordinatensystem ausgewählt. Mit diesem können natürliche Kopfbewegungen der Versuchspersonen berücksichtigt werden. Dafür wird ein sogenannter Marker im Fahrzeuginnenraum angebracht, der der Datenanalyse dient. Der Marker konnte jedoch nicht im zentralen Fahrerblickfeld angebracht werden, da er mittig auf der Windschutzscheibe positioniert wäre und dementsprechend fahrrelevante Informationen in der Umwelt und die Anzeige verdeckt hätte. Folglich wurden zwei Marker angebracht: links (an der A-Säule) und rechts (über der Mittelkonsole) des zentralen Fahrerblickfelds (Abbildung 7.11). Das markerbasierte Koordinatensystem ist auf den Bildausschnitt der Feldkamera begrenzt. Liegt der Marker außerhalb des Ausschnitts der Feldkamera (z.B. durch ein Wegdrehen des Kopfes), kann kein Koordinatensystem aufgespannt werden, was zu Datenverlust führt. So wird im Fall von starken Blicken zur Seite nur einer der Marker im Video erfasst. Somit gab es Videoabschnitte mit jeweils nur einem erkannten Marker, der der Analyse diente. Insofern handelt es sich bei den Markern um unterschiedliche Referenzen. Auf Grund dessen erfolgt eine parallele Auswertung beider Marker. Sichertgestellt wurde, dass die Erkennungsrate der Marker für eine valide Analyse ausreichend hoch war. Es wird jedoch ein vergleichbares Ergebnis der beiden Marker erwartet.

Aus den Rohdaten der Blickkoordinaten erfolgte die Berechnung der Standardabweichungen der Pupillenposition entlang der X-Achse bzw. der Y-Achse als Maß für die horizontale bzw. vertikale Blickstreuung in der Einheit Grad für die zu analysierenden Abbiegesituationen. Es folgten varianzstatistische Analysen in Form von rmANOVAs mit den Faktoren Anzeigeart (HUD, AR Display) und Eindeutigkeit der Situation (US, ES). Eine Korrektur nach Greenhouse-Geißer wurde durchgeführt, wenn eine Verletzung der Sphärizitätsannahme (Mauchley-Test auf Sphärizität) vorlag (Field, 2009). Das partielle Eta-Quadrat wurde berechnet.

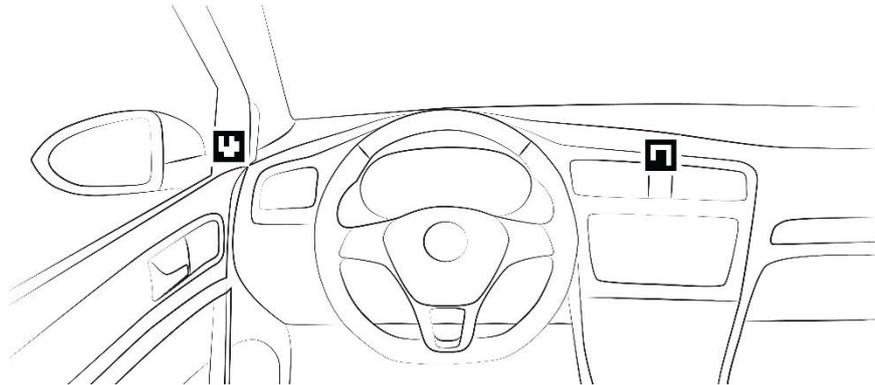


Abbildung 7.11: Ein Marker an der A-Säule und ein Marker über dem Mittelkonsolendisplay dienen der Auswertung des Blickverhaltens im markerbasierten Koordinatensystem.

Für die Analyse der Fahrerbeanspruchung wurde die Leistung in einer kognitiv beanspruchenden Zahlenaufgabe ausgewertet. Es konnten Datensätze von 35 Versuchspersonen berücksichtigt werden. Durch technische Schwierigkeiten mussten 13 Versuchspersonen von der Analyse ausgeschlossen werden. Ausgewertet wurde, ob die Antworten auf die auditiven Zahlen korrekt oder inkorrekt (falsche Zuordnung oder nicht beantwortet) waren. Analysiert wurde die mittlere Antwortzeit in Sekunden und die Häufigkeit korrekter Antworten pro Sekunde während der Annäherung an die zu untersuchenden Abbiegesituationen.

Hinsichtlich der Analyse der Häufigkeit korrekter Antworten, muss bedacht werden, dass die Annäherungsgeschwindigkeit an die Zielabbiegung zwischen den Probanden variieren konnte. Somit variierte auch die verbrachte Zeit im Analysebereich und damit die Anzahl der abgespielten Zahlen. Es wird davon ausgegangen, dass die gefahrene Geschwindigkeit Einfluss auf die Leistbarkeit der Nebenaufgabe hat. Folglich wurde sich dazu entschieden, die verbrachte Zeit im Analysebereich in der Analyse zu berücksichtigen. Das Intervall der gesagten Zahlen betrug 3 Sekunden. Wenn die erste auszuwertende Zahl gleich bei Einfahrt in den Analysezeitraum abgespielt wurde, und die Versuchsperson alle Zahlen im Analysebereich richtig beantwortete, wurde eine Rate von 0.33 1/s erwartet. Analysiert wurden alle Antworten auf Zahlen, die im Analysebereich (Kapitel 7.2.5) lagen. Wurde eine Zahl vor dem Analysebereich abgespielt, wurde die dazugehörige Antwort nicht in der Analyse berücksichtigt. Des Weiteren musste die Antwort auf die letzte Zahl im Analysebereich vor dem Ende des Analysebereichs erfolgt sein. Blieb keine Zeit zur Beantwortung der letzten Zahl im Analysebereich, wurde die abgespielte Zahl inklusive der Antwort der Versuchsperson nicht in der Analyse berücksichtigt. Es wurden rmANOVAs mit den Faktoren Anzeigart (HUD, AR Display) und Eindeutigkeit der Situation (US, ES) durchgeführt. Es konnte von einer Intervallskalierung durch die Einheit ausgegangen werden. Das partielle Eta-Quadrat wurde berechnet. Die Analysen wurde mit der Software IBM SPSS Statistics 19 durchgeführt.

Für die Betrachtung der Fahrleistung, hier der Navigationsfehler, konnten Datensätze von 48 Versuchspersonen berücksichtigt werden. Die Daten wurden mit einem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test mit der Software IBM SPSS Statistics 19 analysiert. Die Effektstärke r wurde berechnet. Als Navigationsfehler zählte das Fahren in eine andere Abbiegung als die Zielabbiegung und das Verpassen der Zielabbiegung.

Die subjektiven Daten wurden mit rmANOVAs mit dem Faktor Anzeigeart (HUD vs. AR Display) und dem Zwischensubjektfaktor Reihenfolge der Anzeigeart (beginnend mit dem HUD vs. beginnend mit dem AR Display) ausgewertet ($N = 48$). Durch die Antwortformate konnte von einer Intervallskalierung ausgegangen werden. Das partielle Eta-Quadrat wurde berechnet.

Für die Akzeptanzbewertung (Van der Laan et al., 1997) wurden Reliabilitätsanalysen für die beiden Subskalen Usefulness und Satisfying getrennt nach den Anzeigearten durchgeführt ($N = 45-48$). Diese erfüllten die Voraussetzungen von $\alpha > .65$ und erreichten Werte von $\alpha = .75$ bis $.87$. Aufgrund von Abweichungen von der Normalverteilung wurde sich für Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests entschieden.

Reliabilitätsanalysen wurden ebenfalls für den Driver Activity Load Index (Pauzié, 2008) für beide Anzeigearten durchgeführt ($N = 48$). Diese erfüllten die Voraussetzungen von $\alpha > .70$ und erreichten Werte von $\alpha = .86$ bis $.88$. Da eine Normalverteilung gegeben war, erfolgte die Analyse mit t -Tests für abhängige Stichproben.

Für den User Experience Questionnaire (Schrepp et al., 2017) wurden Reliabilitätsanalysen für die beiden Subskalen Pragmatische und Hedonische Qualität getrennt nach den Anzeigearten durchgeführt ($N = 45-48$). Diese erfüllten die Voraussetzungen mit einem Cronbach Alpha von $\alpha = .88$. Die Analysen erfolgten mit t -Tests und Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests (im Fall einer Abweichung von der Normalverteilung). Sie wurden mit der Software IBM SPSS Statistics 19 durchgeführt.

7.3.2 Blickverhalten

Im Folgenden werden die Ergebnisse der horizontalen (Tabelle 7.4, Abbildung 7.12, Abbildung 7.13) und der vertikalen Blickstreuung (Tabelle 7.5, Abbildung 7.14, Abbildung 7.15) vorgestellt. Die Ergebnisse liegen getrennt für die beiden Marker (1) über der Mittelkonsole und (2) an der A-Säule vor.

Die Analyse des Markers über der Mittelkonsole ergab, dass die Blicke der Versuchspersonen horizontal durchschnittlich zwischen 15.14° und 19.99° streuten (Tabelle 7.4, Abbildung 7.12). Die Analyse zeigte keinen signifikanten Haupteffekt für die Anzeigeart ($F(1, 26) = 4.07, p > .05, \eta_p^2 = .14$). Somit konnten keine Unterschiede zwischen dem AR Display und dem HUD in der horizontalen Blickstreuung festgestellt werden. Auch die Eindeutigkeit der Situation zeigte keinen Einfluss auf die horizontale Blickstreuung ($F(1, 26) = 0.57, p > .10, \eta_p^2 = .02$). Die Interaktion zwischen der Anzeigeart und der Eindeutigkeit der Situation war statistisch nicht bedeutsam ($F(1, 26) = 2.46, p > .10, \eta_p^2 = .09$).

Die Blickanalyse der horizontalen Streuung auf Basis des Markers an der A-Säule ergab ein vergleichbares Ergebnis. Die Daten zeigten, dass die Blicke der Versuchspersonen horizontal durchschnittlich zwischen 14.04° und 15.84° streuten (Tabelle 7.4, Abbildung 7.13). Es zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt bezüglich der Anzeigeart ($F(1, 26) = 0.15, p > .10, \eta_p^2 = .01$). Auch die Eindeutigkeit der Situation zeigte keinen Einfluss auf die horizontale Blickstreuung ($F(1, 26) = 0.85, p > .10, \eta_p^2 = .03$). Die Interaktion zwischen der Anzeigeart und der Eindeutigkeit der Situation war nicht signifikant ($F(1, 26) = 0.17, p > .10, \eta_p^2 = .01$).

Tabelle 7.4: Mittelwert und Standardabweichung für die mittlere Standardabweichung der Pupillenposition auf der X-Achse [°] als Maß für die horizontale Blickstreuung, getrennt nach den verwendeten Markern, der Anzeigeart und der Eindeutigkeit der Situation.

Markerort, Anzeigeart und Eindeutigkeit der Situation		M [°]	SD [°]
Rechter Marker an Mittelkonsole			
AR	Uneindeutige Situation	16.71	5.32
	Eindeutige Situation	19.99	7.17
HUD	Uneindeutige Situation	16.63	9.79
	Eindeutige Situation	15.14	6.44
Linker Marker an A-Säule			
AR	Uneindeutige Situation	14.96	4.59
	Eindeutige Situation	15.84	6.00
HUD	Uneindeutige Situation	14.04	6.89
	Eindeutige Situation	15.80	8.80

Anmerkung. N = 27.

Standardabweichung der Pupillenposition entlang der X-Achse [°]
(Rechter Marker an Mittelkonsole)

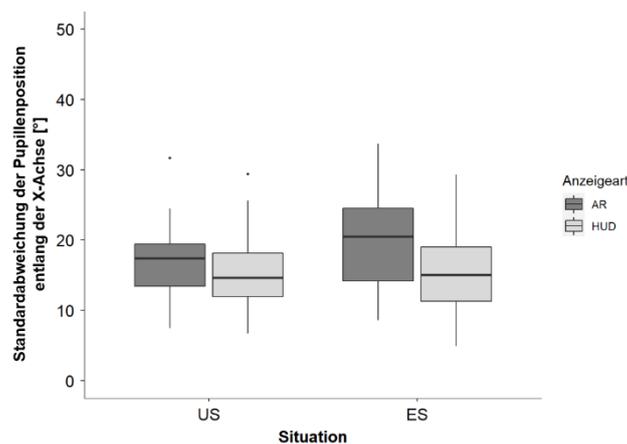


Abbildung 7.12: Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der X-Achse (horizontale Blickstreuung) in Grad (N = 27). Ergebnisse der markerbasierten Auswertung des rechten Markers an der Mittelkonsole.

Standardabweichung der Pupillenposition entlang der X-Achse [°]
(Linker Marker an A-Säule)

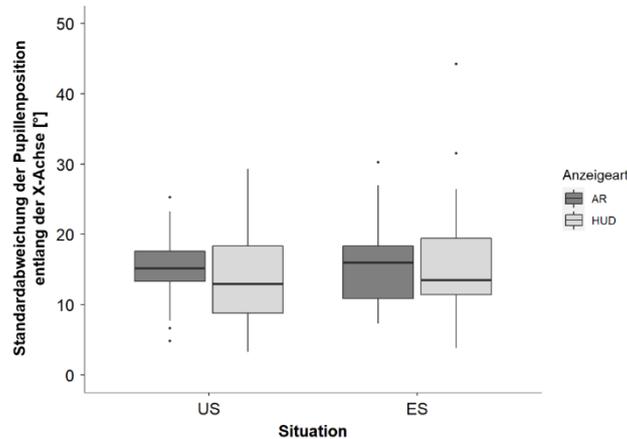


Abbildung 7.13: Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der X-Achse (horizontale Blickstreuung) in Grad (N = 27). Ergebnisse der markerbasierten Auswertung des linken Markers an der A-Säule.

Hinsichtlich der vertikalen Blickstreuung zeigten die Daten des Markers über der Mittelkonsole, dass die Blicke der Versuchspersonen durchschnittlich zwischen 5.00° und 7.34° streuten (Tabelle 7.5, Abbildung 7.14). Die Analyse ergab weder für die Anzeigeart ($F(1, 26) = 0.43, p > .10, \eta_p^2 = .02$) noch für die Eindeutigkeit der Situation ($F(1, 26) = 3.19, p > .05, \eta_p^2 = .11$) einen signifikanten Haupteffekt. Somit sind keine Unterschiede in der vertikalen Streuung auf die Anzeigeart oder die Eindeutigkeit der Situation zurückzuführen. Es zeigte sich kein Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Eindeutigkeit der Situation ($F(1, 26) = 0.57, p > .10, \eta_p^2 = .02$).

Die Blickanalyse der vertikalen Streuung auf Basis des Markers an der A-Säule bestätigte die Ergebnisse der beiden Haupteffekte. Weder die Anzeigeart ($F(1, 26) = 0.00, p > .10, \eta_p^2 = .00$) noch die Eindeutigkeit der Situation ($F(1, 26) = 2.21, p > .10, \eta_p^2 = .08$) hatten einen signifikanten Einfluss auf die vertikale Blickstreuung (Tabelle 7.5, Abbildung 7.15). Die Daten des Markers an der A-Säule zeigten, dass die Blicke der Versuchspersonen vertikal durchschnittlich zwischen 5.62° und 8.83° streuten. Es zeigte sich kein Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Eindeutigkeit der Situation ($F(1, 26) = 2.54, p > .10, \eta_p^2 = .09$).

Tabelle 7.5: Mittelwert und Standardabweichung für die mittlere Standardabweichung der Pupillenposition entlang der Y-Achse [°] als Maß für die vertikale Blickstreuung in den einzelnen Abbiegesituationen, getrennt nach der Anzeigeart und den verwendeten Markern.

Marker, Anzeigeart und Eindeutigkeit der Situation		M [°]	SD [°]
Rechter Marker an Mittelkonsole			
AR	Uneindeutige Situation	7.03	4.94
	Eindeutige Situation	6.41	4.22
HUD	Uneindeutige Situation	7.34	7.99
	Eindeutige Situation	5.00	3.13
Linker Marker an A-Säule			
AR	Uneindeutige Situation	8.83	5.72
	Eindeutige Situation	5.62	2.38
HUD	Uneindeutige Situation	7.36	4.51
	Eindeutige Situation	7.20	8.06

Anmerkung. N = 27.

Standardabweichung der Pupillenposition entlang der Y-Achse [°]
(Rechter Marker an Mittelkonsole)

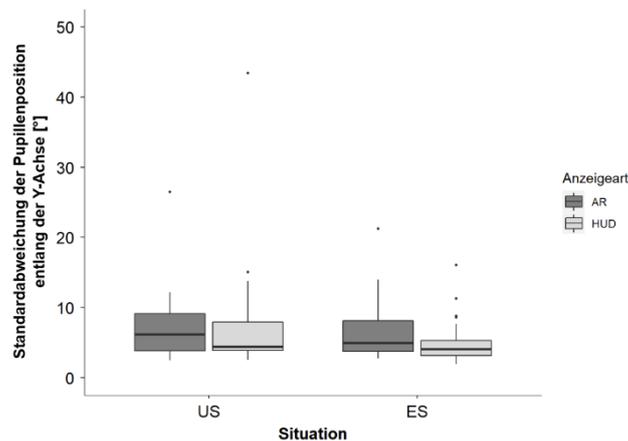


Abbildung 7.14: Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der Y-Achse (vertikale Blickstreuung) in Grad (N = 27). Ergebnisse der markerbasierten Auswertung des rechten Markers an der Mittelkonsole.

Standardabweichung der Pupillenposition entlang der Y-Achse [°]
(Linker Marker an A-Säule)

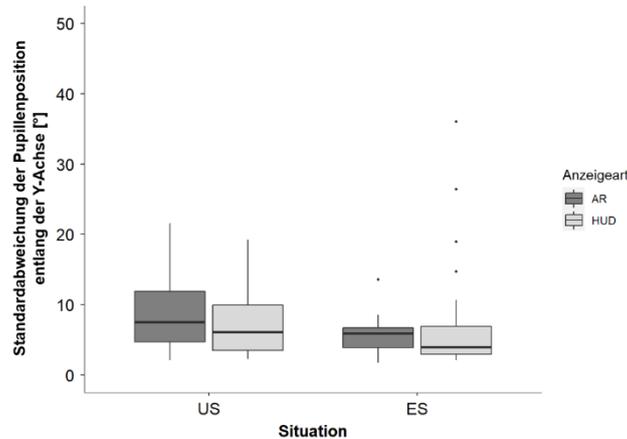


Abbildung 7.15: Boxplots der Standardabweichung der Pupillenposition entlang der Y-Achse (vertikale Blickstreuung) in Grad ($N = 27$). Ergebnisse der markerbasierten Auswertung des linken Markers an der A-Säule.

7.3.3 Fahrerbeanspruchung

Die Ergebnisse der Fahrerbeanspruchung zeigten, dass die Anzeigart keinen signifikanten Einfluss auf die Häufigkeit korrekter Antworten hatte ($F(1, 34) = 0.82, p > .10, \eta_p^2 = .02$) (Tabelle 7.6). Jedoch zeigte die Eindeutigkeit der Situation einen Effekt ($F(1, 34) = 31.09, p < .001, \eta_p^2 = .48$). In der ES ($M = 0.29, SD = 0.04$) wurden mehr Aufgaben korrekt beantwortet als in der US ($M = 0.25, SD = 0.05$). Es zeigten sich keine Interaktionseffekte zwischen der Anzeigart und der Eindeutigkeit der Situation ($F(1, 34) = 3.16, p > .05, \eta_p^2 = .09$).

Tabelle 7.6: Mittelwert und Standardabweichung der Häufigkeit korrekter Antworten [1/s], getrennt nach der Anzeigart und der Eindeutigkeit der Situation.

	Eindeutigkeit der Situation	M [1/s]	SD [1/s]
AR	Uneindeutige Situation	0.26	0.05
	Eindeutige Situation	0.28	0.05
HUD	Uneindeutige Situation	0.24	0.07
	Eindeutige Situation	0.29	0.04

Anmerkung. $N = 35$, das Intervall der Nebenaufgabe betrug 3 Sekunden. Wenn die erste auszuwertende Zahl gleich bei Einfahrt in den Analysezeitraum abgespielt wurde und die Versuchsperson alle Zahlen im Analysebereich richtig beantwortete, wurde eine Rate von 0.33 1/s erwartet.

Des Weiteren wurde deutlich, dass die durchschnittliche Antwortzeit 1.02 s bis 1.22 s betrug (Tabelle 7.7). Die Anzeigart zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Schnelligkeit der Antworten während der Annäherungen an die Abbiegesituationen ($F(1, 34) = 0.71, p > .10, \eta_p^2 = .02$). Die Eindeutigkeit der Situation hatte einen Effekt auf die Antwortzeit ($F(1, 34) = 10.47, p < .05, \eta_p^2 = .23$). In der ES ($M = 1.01$ s, $SD = 0.21$ s) wurde die kognitive Nebenaufgabe signifikant schneller gelöst als in der US ($M = 1.18$ s, $SD = 0.30$ s). Es zeigten

sich keine Interaktionseffekte zwischen der Anzeigart und der Eindeutigkeit der Situation ($F(1, 34) = 0.49, p > .10, \eta_p^2 = .01$).

Tabelle 7.7: Mittelwert und Standardabweichung für die mittlere Antwortzeit [s], getrennt nach der Anzeigart und der Eindeutigkeit der Situation.

	Eindeutigkeit der Situation	<i>M</i> [s]	<i>SD</i> [s]
AR	Uneindeutige Situation	1.22	0.39
	Eindeutige Situation	1.02	0.20
HUD	Uneindeutige Situation	1.15	0.35
	Eindeutige Situation	1.01	0.30

Anmerkung. N = 35.

7.3.4 Fahrleistung

Aus Tabelle 7.8 wird deutlich, dass insgesamt wenig Navigationsfehler in der Realfahrtstudie passierten. Unabhängig der Anzeigart passierten die meisten Fehler in der US. Die Versuchspersonen machten mit dem AR Display weniger Navigationsfehler als mit dem HUD, jedoch war dieser Unterschied statistisch nicht bedeutsam (AR Display: *Mdn* = 0.00; HUD: *Mdn* = 0.00; $z = -1.39, p > .10, r = -.14$).

Tabelle 7.8: Anzahl der Navigationsfehler, getrennt nach der Anzeigart und der Eindeutigkeit der Situation (Daten aus Flehmer, 2020).

	Uneindeutige Situation	Eindeutige Situation
AR	3	0
HUD	7	1

Anmerkung. N = 48.

7.3.5 Subjektive Bewertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der subjektiven Evaluation vorgestellt. Zwischensubjekteffekte (erlebte Reihenfolge der Anzeigart) und Interaktionseffekte zwischen der Anzeigart und der Reihenfolge (beginnend mit dem HUD vs. beginnend mit dem AR Display) werden ausschließlich im Fall einer statistischen Bedeutsamkeit erwähnt.

Bezüglich des Gefallens der Anzeige zeigten die Ergebnisse einen signifikanten Haupteffekt zwischen den Anzeigarten ($F(1, 45) = 8.75, p = .05, \eta_p^2 = .16$). Den Versuchspersonen gefiel das AR Display „gut“ und damit signifikant besser als das HUD, das sie mit „mittel gut“ bewerteten (AR Display: $M = 11.09, SD = 2.39$; HUD: $M = 9.51, SD = 3.06$) (Abbildung 7.16 a) (siehe Anhang: Fragebögen Studie 3 für die spezifischen Antwortkategorien). Es zeigte sich ein Reihenfolgeeffekt der erlebten Anzeige ($F(1, 45) = 4.30, p < .05, \eta_p^2 = .09$). Versuchspersonen, die mit dem HUD starteten, bewerteten beide Anzeigen signifikant besser als Versuchspersonen, die zuerst mit dem AR Display fuhren.

Es zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt zwischen den Anzeigearten hinsichtlich der Bewertung des angenehmen Fahrens mit der Anzeige. Demnach wurde das Fahren mit dem AR Display von den Versuchspersonen als „angenehm“ bewertet. Dagegen bewerteten die Versuchspersonen das Fahren mit dem HUD als „mittel angenehm“ (AR Display: $M = 10.73$, $SD = 2.77$; HUD: $M = 9.54$, $SD = 2.81$; $F(1, 46) = 6.09$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .12$) (Abbildung 7.16 b).

Bezüglich der Verständlichkeit der Anzeige zeigte sich ebenfalls ein Haupteffekt zwischen den beiden Anzeigearten ($F(1, 45) = 9.21$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .17$). Demnach bewerteten die Versuchspersonen das AR Display als „gut verständlich“ für die Navigationsaufgabe und das HUD als „mittel verständlich“ (AR Display: $M = 11.00$, $SD = 2.81$; HUD: $M = 9.23$, $SD = 3.09$) (Abbildung 7.16 c).

Die wahrgenommene Entlastung durch die Anzeige in der Navigationsaufgabe unterschied sich ebenfalls signifikant ($F(1, 45) = 15.56$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .26$). Das AR Display wurde als „stark entlastend“ und das HUD als „mittel entlastend“ für die Navigationsaufgabe wahrgenommen (AR Display: $M = 11.02$, $SD = 2.03$; HUD: $M = 9.26$, $SD = 2.69$) (Abbildung 7.16 d). Ein hybrider Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Reihenfolge (beginnend mit dem HUD vs. beginnend mit dem AR Display) verwies darauf, dass der Haupteffekt der Anzeigeart zur Bewertung der Entlastung global interpretierbar ist ($F(1, 45) = 4.83$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .10$) (Abbildung 7.17).

Angesichts der Nützlichkeit zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Haupteffekt zwischen den Anzeigearten ($F(1, 45) = 7.73$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .15$). Obgleich die Versuchspersonen beide Anzeigen als „nützlich“ für das Finden der korrekten Zielabbiegung bewerteten, wurde das AR Display etwas nützlicher bewertet (AR Display: $M = 12.02$, $SD = 2.09$; HUD: $M = 10.81$, $SD = 2.53$) (Abbildung 7.16 e).

Bezüglich der Eignung zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Haupteffekt zwischen den Anzeigearten ($F(1, 45) = 14.42$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .24$). Die Versuchspersonen nahmen beide Anzeigen als „gut geeignet“ für die Navigationsaufgabe wahr, wobei das AR Display etwas besser bewertet wurde (AR Display: $M = 12.19$, $SD = 2.12$; HUD: $M = 10.64$, $SD = 2.29$) (Abbildung 7.16 f).

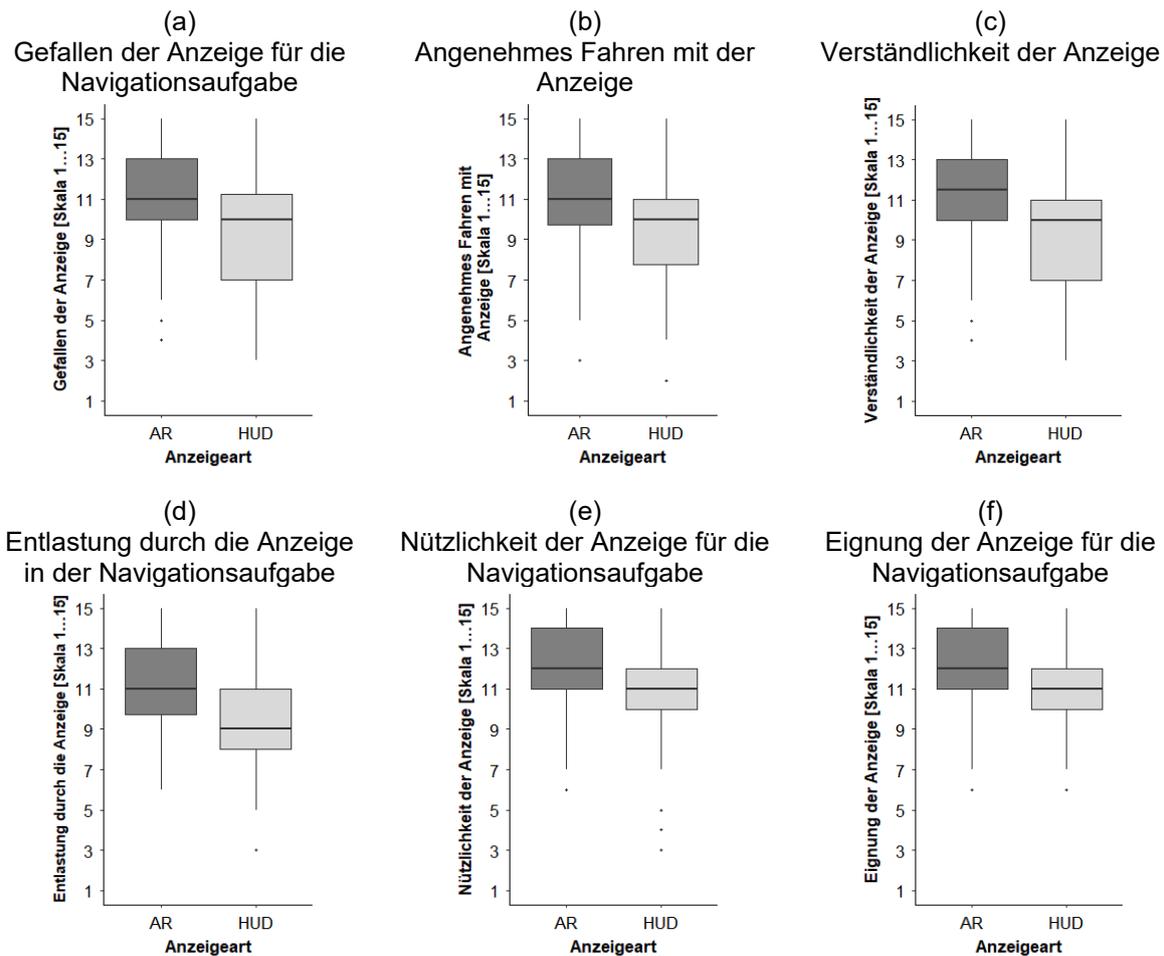


Abbildung 7.16: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich des Gefallens der Anzeige, des angenehmen Fahrens mit der Anzeige, der Verständlichkeit der Anzeige, der Entlastung durch die Anzeige, der Nützlichkeit der Anzeige und der Eignung der Anzeige für die Navigationsaufgabe ($N = 48$), (1: niedrige Zustimmung, 15: hohe Zustimmung auf dem jeweiligen Item).

Interaktion zwischen Anzeigeart und Reihenfolge:
Entlastung durch die Anzeige in der Navigationsaufgabe

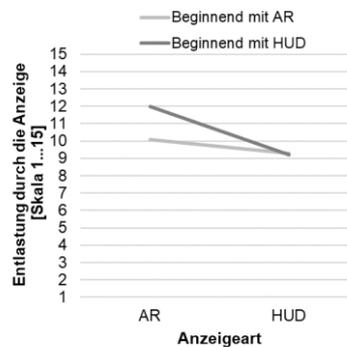


Abbildung 7.17: Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Reihenfolge bezüglich der Entlastung durch die Anzeige in der Navigationsaufgabe.

Hinsichtlich der Ablenkung durch die Anzeige zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Anzeigen ($F(1, 45) = 0.03, p > .10, \eta_p^2 = .00$). Die Versuchspersonen bewerteten sie als „wenig ablenkend“ (AR Display: $M = 5.64, SD = 2.31$; HUD: $M = 5.72, SD = 2.57$) (Abbildung 7.18 a). Jedoch zeigte sich ein signifikanter Unterschied bezüglich der Reihenfolge (beginnend mit dem HUD vs. beginnend mit dem AR Display) ($F(1, 45) = 4.68, p < .05, \eta_p^2 = .09$). Die Versuchspersonen, die das AR Display zuerst erlebten, stuften die Ablenkung durch beide Anzeigearten generell höher ein als die Versuchspersonen, die zuerst mit dem HUD fuhren. Es zeigte sich kein Unterschied in der Bewertung der Aufmerksamkeitsbindung durch die Anzeige ($F(1, 46) = 1.20, p > .10, \eta_p^2 = .03$). Sowohl das AR Display als auch das HUD wurden als „mittel stark“ hinsichtlich der Aufmerksamkeitsbindung bewertet (AR Display: $M = 8.60, SD = 2.87$; HUD: $M = 8.04, SD = 2.68$) (Abbildung 7.18 b). Die Überlagerung der AR-Informationen über andere Verkehrsobjekte wurde von den Versuchspersonen als „wenig störend“ bewertet (AR Display: $M = 4.96, SD = 2.79$) (Abbildung 7.18 c).

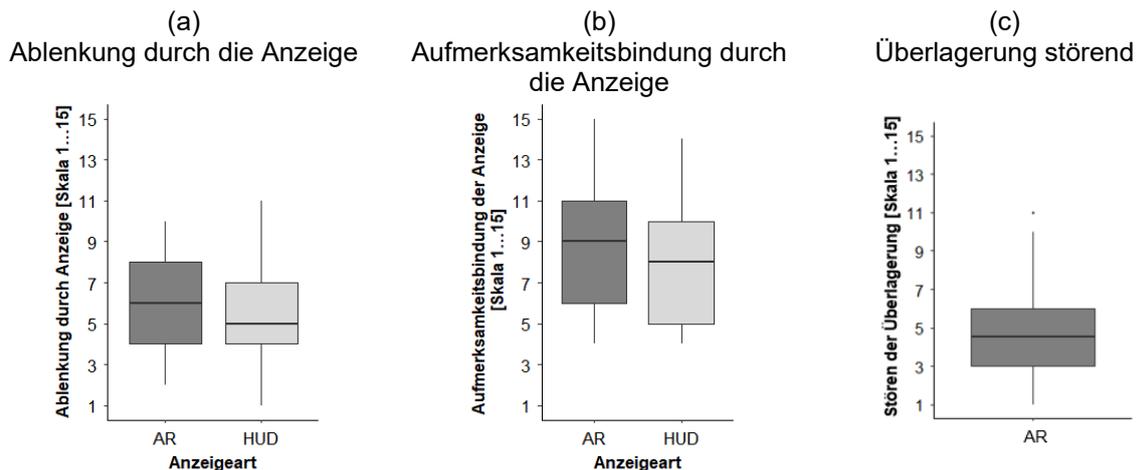


Abbildung 7.18: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Ablenkung und der Aufmerksamkeitsbindung durch die Navigationsanzeige sowie der störenden Überlagerung der AR-Informationen über andere Verkehrsobjekte (N = 48), (1: niedrige Zustimmung, 15: hohe Zustimmung auf dem jeweiligen Item).

Hinsichtlich der Akzeptanzbewertung (Van der Laan et al., 1997) zeigten sich signifikante Unterschiede für die Subskalen und für den Globalscore (Abbildung 7.19). Das AR Display wurde in Bezug auf Usefulness und Satisfying von den Versuchspersonen mehr akzeptiert als das HUD (Abbildung 7.19, Tabelle 7.9).

Akzeptanzbewertung nach Van der Laan et al. (1997)

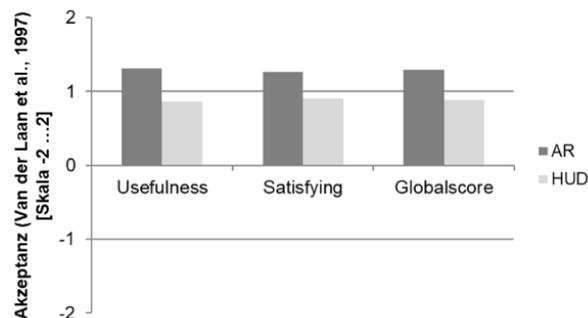


Abbildung 7.19: Akzeptanzbewertung (Van der Laan et al., 1997) unterteilt in Usefulness, Satisfying und den Globalscore für die Anzeigarten AR Display und HUD.

Tabelle 7.9: Ergebnisse der Akzeptanzbewertung (Van der Laan et al., 1997) (Flehmer, 2020).

	AR		HUD		z	p
	M	SD	M	SD		
Nützlich – nutzlos *	1.48	0.80	1.22	0.85	-2.10	< .05
Angenehm – unangenehm **	1.23	0.83	0.96	0.85	-2.06	< .05
Gut – schlecht *	1.38	0.70	0.82	0.98	-3.34	= .001
Nett – nervig **	1.04	0.85	0.73	0.94	-2.07	< .05
Effizient – unnötig *	1.31	0.69	0.84	0.93	-2.56	< .05
Erfreulich – ärgerlich **	1.31	0.66	0.87	0.89	-2.99	< .05
Hilfreich – wertlos *	1.62	0.49	1.09	0.73	-3.65	< .001
Wünschenswert – nicht wünschenswert **	1.48	0.83	1.04	0.82	-3.00	< .05
Aktivierend – einschläfernd *	0.79	0.88	0.36	0.74	-2.86	< .05
Usefulness	1.32	0.56	0.87	0.67	-3.60	< .001
Satisfying	1.27	0.60	0.90	0.75	-3.00	< .05
Globalscore	1.29	0.55	0.88	0.68	-3.37	= .001

Anmerkung. N = 45-48. * Item für Usefulness, **Item für Satisfying

Ergebnisse des Driver Activity Load Index (Pauzié, 2008) zeigten, dass die Versuchspersonen die Interaktion mit dem AR Display als weniger beanspruchend wahrnahmen als mit dem HUD (Abbildung 7.20, Tabelle 7.10). Die gesamte Aufmerksamkeit, die für das Navigieren und die Erfüllung der Nebenaufgabe benötigt wurde, wurde dementsprechend mit dem AR Display als weniger beanspruchend bewertet als mit dem HUD. Dies zeigte sich ebenfalls für die visuellen Anforderungen während der Fahrt. Auch das Stressempfinden und die wahrgenommene Störung bei der Navigation und deren Auswirkungen auf die Navigationsleistung aufgrund der Nebenaufgabe wurde mit dem AR Display signifikant weniger beanspruchend erlebt. Die auditiven und zeitlichen Anforderungen unterschieden sich nicht zwischen den beiden Anzeigearten (Abbildung 7.20, Tabelle 7.10).

Driver Activity Load Index nach Pauzié (2008)

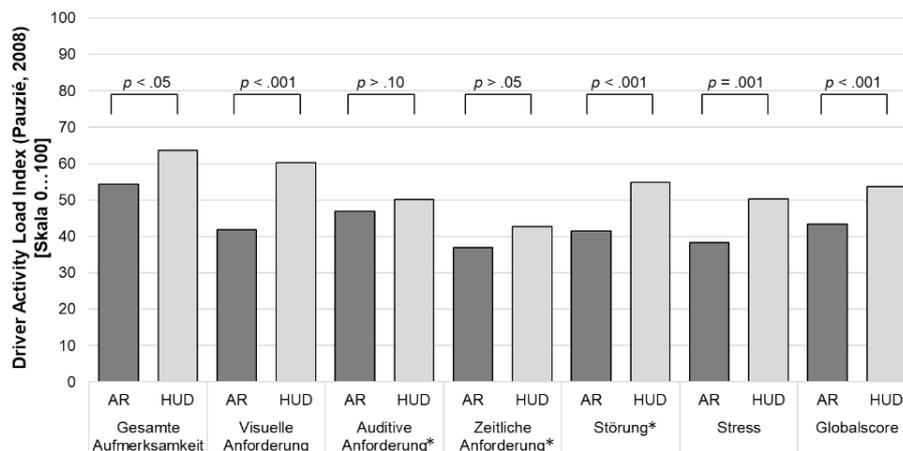


Abbildung 7.20: Ergebnisse der einzelnen Items und des Globalscores für den Driver Activity Load Index (Pauzié, 2008) für die beiden Anzeigearten. *Auditive Anforderung, zeitliche Anforderung und Störung beziehen sich in dieser Studie auf folgende Aspekte: „Auditive Anforderung, die während der Fahrt nötig war, um das Navigieren bei gleichzeitiger Bearbeitung der Nebenaufgabe auszuführen.“, „Zeitlicher Druck, der während der Fahrt vorlag, um das Navigieren bei gleichzeitiger Bearbeitung der Nebenaufgaben auszuführen.“, „Störung bei der Navigation und deren Auswirkungen auf die Navigationsleistung aufgrund der Nebenaufgabe.“

Tabelle 7.10: Ergebnisse des Driver Activity Load Index (Pauzié, 2008).

	AR		HUD		t	p
	M	SD	M	SD		
Gesamte Aufmerksamkeit	54.38	23.12	63.65	20.67	-2.71	< .05
Visuelle Anforderung	41.77	22.18	60.21	23.15	-5.58	< .001
Auditive Anforderung	46.88	19.72	50.10	21.35	-1.68	> .10
Zeitliche Anforderung	36.98	20.44	42.60	22.17	-1.98	> .50
Störung	41.56	22.27	54.79	24.41	-4.03	< .001
Stress	38.23	21.00	50.31	23.26	-3.63	= .001
Globalscore	43.30	16.42	53.61	17.72	-4.78	< .001

Anmerkung. N = 48.

Die Bewertung der User Experience zeigte, dass die Versuchspersonen eine höhere User Experience mit dem AR Display als mit dem HUD erlebten (Abbildung 7.21, Tabelle 7.11). Es ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den beiden Anzeigearten in den einzelnen Items, in den Subskalen (Pragmatische und Hedonische Qualität) und im Globalscore. Die Ausnahme bildete das Item *verwirrend – übersichtlich*, das sich nicht zwischen den beiden Anzeigearten unterschied.

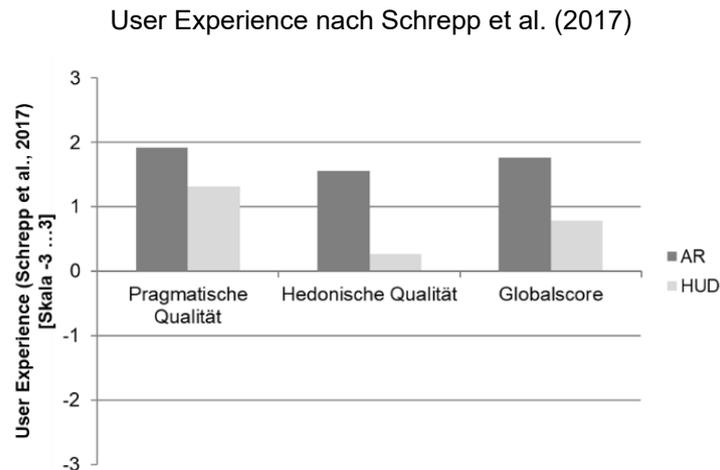


Abbildung 7.21: Ergebnisse der User Experience (Schrepp et al., 2017) unterteilt in Pragmatische Qualität, Hedonische Qualität und den Globalscore für die Anzeigarten AR Display und HUD.

Tabelle 7.11: Ergebnisse des User Experience Questionnaire (Schrepp et al., 2017) (Daten teilweise aus Flehmer, 2020).

	AR		HUD		z	T	p
	M	SD	M	SD			
Behindernd – unterstützend	2.25	0.91	1.40	1.20	-3.97		< .001
Kompliziert – einfach	2.02	0.91	1.38	1.25	-3.02		< .05
Ineffizient – effizient	1.96	0.97	1.29	1.29	-2.89		< .05
Verwirrend – übersichtlich	1.44	1.11	1.18	1.50	-1.17		> .10
Langweilig – spannend	1.12	1.62	0.36	1.50	-3.39		= .001
Uninteressant – interessant	1.63	1.33	0.89	1.45	-3.37		= .001
Konventionell – originell	1.56	1.18	-0.09	1.64	-5.11		< .001
Herkömmlich – neuartig	1.85	1.07	-0.07	1.57	-5.32		< .001
Pragmatische Qualität	1.92	0.85	1.31	1.07	-3.49		< .001
Hedonische Qualität	1.56	1.11	0.27	1.39		7.46	< .001
Globalscore	1.76	0.82	0.79	1.06		6.86	< .001

Anmerkung. N = 45-48.

Hinsichtlich der Anzeigegestaltung zeigte sich kein Unterschied zwischen dem AR Display und dem HUD ($F(1, 45) = 0.02, p > .10, \eta_p^2 = .00$). Den Versuchspersonen gefielen beide Anzeigen „gut“ (AR Display: $M = 10.23, SD = 2.66$; HUD: $M = 10.17, SD = 2.64$) (Abbildung 7.22 a). Jedoch unterschied sich die Bewertung der Anzeigegröße signifikant ($F(1, 45) = 22.52, p < .001, \eta_p^2 = .33$). Die Versuchspersonen bewerteten die Größe des AR Displays als „gut“, wohingegen sie die Größe des HUDs als „mittel“ einstufen (AR Display: $M = 11.72, SD = 2.13$; HUD: $M = 9.17, SD = 3.32$) (Abbildung 7.22 b). Die Bewertung der Transparenz und der Positionierung der Informationen unterschied sich

nicht zwischen den beiden Anzeigearten (Abbildung 7.22 c + d). Die Versuchspersonen bewerteten die Transparenz der dargestellten Navigationsinformationen als „gut“ (AR Display: $M = 10.81$, $SD = 2.66$; HUD: $M = 10.89$, $SD = 2.56$; $F(1, 45) = 0.04$, $p > .10$, $\eta_p^2 = .00$). Die Positionierung der Informationen gefiel den Versuchspersonen ebenfalls „gut“ (AR Display: $M = 11.34$, $SD = 2.55$; HUD: $M = 10.77$, $SD = 2.87$; $F(1, 45) = 0.98$, $p > .10$, $\eta_p^2 = .02$). Hinsichtlich der Positionierung zeigte sich ein Reihenfolgeeffekt der erlebten Anzeigeart ($F(1, 45) = 4.64$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .09$). Versuchspersonen, die zuerst mit dem HUD fahren, bewerteten die Positionierung der Informationen in beiden Anzeigen besser als die Versuchspersonen, die zuerst mit dem AR Display fahren.

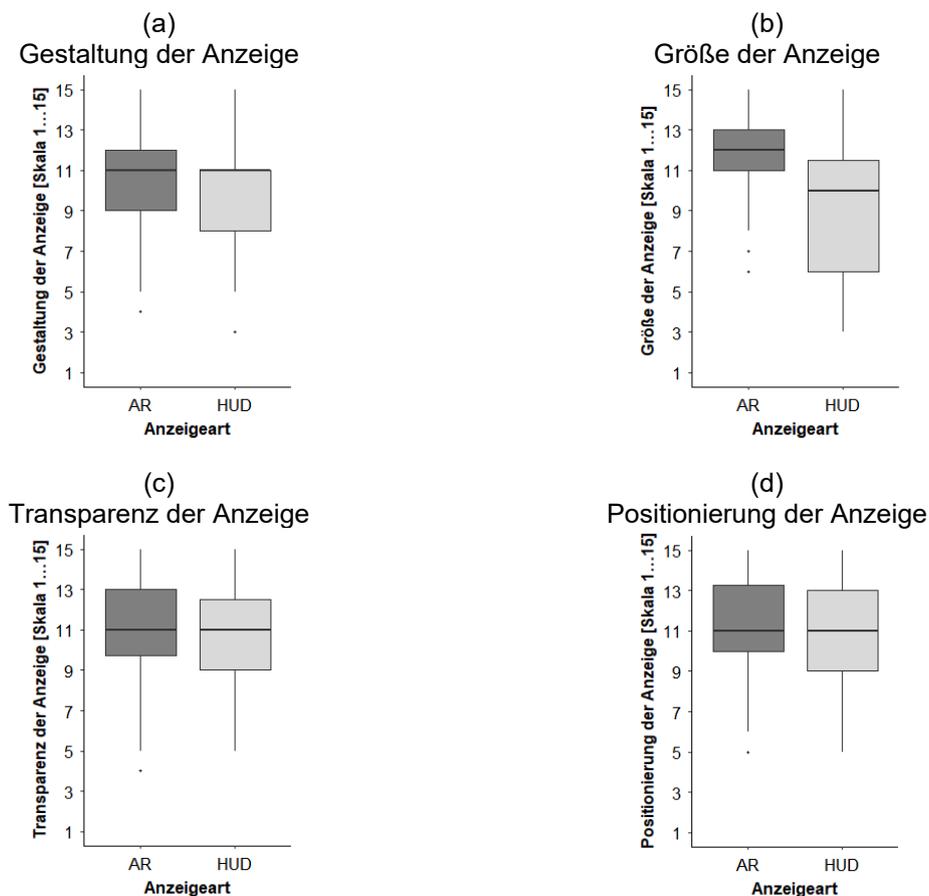


Abbildung 7.22: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich des Gefallens der Gestaltung, der Anzeigengröße, der Positionierung der Anzeige und der Transparenz ($N = 48$), (1: niedrige Zustimmung, 15: hohe Zustimmung auf dem jeweiligen Item).

Es zeigte sich ein Haupteffekt hinsichtlich der Schwierigkeit der Fahraufgabe ($F(1, 46) = 9.67$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .17$). Die Fahraufgabe umfasste die Navigationsaufgabe inklusive der Nebenaufgabe. Mit beiden Anzeigen wurde die Fahraufgabe als „mittel“ eingestuft, mit dem AR Display jedoch als leichter wahrgenommen (AR Display: $M = 9.40$, $SD = 2.58$; HUD: $M = 8.00$, $SD = 2.48$ [negativ gepoltes Item]) (Abbildung 7.23 a). Ein hybrider Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Reihenfolge zeigte, dass der Haupteffekt der Anzeigeart global interpretierbar ist ($F(1, 46) = 7.50$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .14$) (Abbildung 7.23 b).

Die Ergebnisse zeigten außerdem einen Haupteffekt angesichts der Schwierigkeit der Navigation mit der Anzeige ($F(1, 46) = 6.66, p < .05, \eta_p^2 = .13$). Mit dem AR Display wurde sie als „leicht“ und mit dem HUD als „mittel“ eingestuft (AR Display: $M = 11.10, SD = 2.30$; HUD: $M = 9.96, SD = 2.63$ [negativ gepoltes Item]) (Abbildung 7.23 c). Ein hybrider Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Reihenfolge zeigte, dass der Haupteffekt der Anzeigeart global interpretierbar ist ($F(1, 46) = 4.07, p = .05, \eta_p^2 = .08$) (Abbildung 7.23 d).

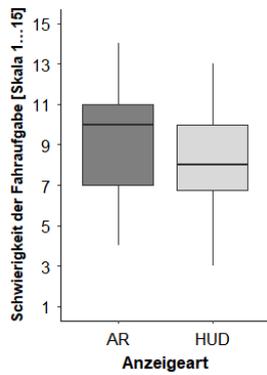
Des Weiteren wurde die Leichtigkeit die Abbiegung zu finden mit dem AR Display als „leicht“ und mit dem HUD als „mittel“ wahrgenommen (AR Display: $M = 10.53, SD = 2.33$; HUD: $M = 8.28, SD = 2.95$; $F(1, 45) = 21.17, p < .001, \eta_p^2 = .32$) (Abbildung 7.23 e). Ein hybrider Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Reihenfolge verwies darauf, dass der Haupteffekt der Anzeigeart global interpretierbar ist ($F(1, 45) = 7.59, p < .05, \eta_p^2 = .14$) (Abbildung 7.23 f).

Es zeigte sich außerdem ein signifikanter Haupteffekt der Anzeigeart hinsichtlich der Anstrengung durch die Nebenaufgabe ($F(1, 46) = 7.70, p < .05, \eta_p^2 = .14$; AR Display: $M = 7.65, SD = 2.37$; HUD: $M = 8.65, SD = 2.62$) (Abbildung 7.23 g). Jedoch verwies ein disordinaler Interaktionseffekt zwischen der Anzeigeart und der Reihenfolge darauf, dass dieser Haupteffekt nicht global interpretierbar ist ($F(1, 46) = 10.48, p < .05, \eta_p^2 = .19$) (Abbildung 7.23 h).

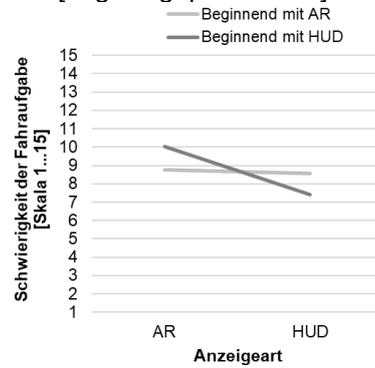
Die Ablenkung und die Beanspruchung durch die Nebenaufgabe unterschied sich zwischen den zwei Anzeigearten signifikant. Zwar wurde die Ablenkung durch die Nebenaufgabe als „mittel“ eingestuft, jedoch mit dem HUD als stärker wahrgenommen (AR Display: $M = 7.46, SD = 2.63$; HUD: $M = 8.33, SD = 2.60$; $F(1, 46) = 5.97, p < .05, \eta_p^2 = .12$) (Abbildung 7.23 i).

Auch die Beanspruchung durch die Nebenaufgabe wurde mit beiden Anzeigearten als „mittel“ bewertet und ebenfalls mit dem HUD als stärker empfunden (AR Display: $M = 7.29, SD = 2.18$; HUD: $M = 8.65, SD = 2.56$; $F(1, 46) = 11.25, p < .05, \eta_p^2 = .20$) (Abbildung 7.23 j).

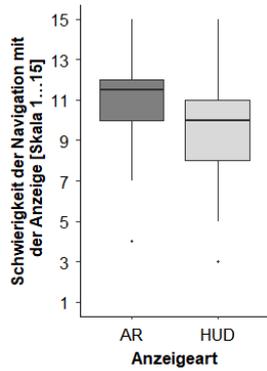
(a) Schwierigkeit der Fahraufgabe [negativ gepoltes Item]*



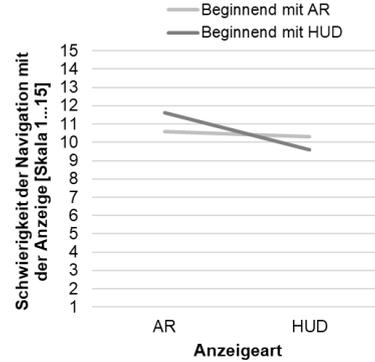
(b) Interaktion zwischen Anzeigertyp und Reihenfolge: Schwierigkeit der Fahraufgabe [negativ gepoltes Item]*



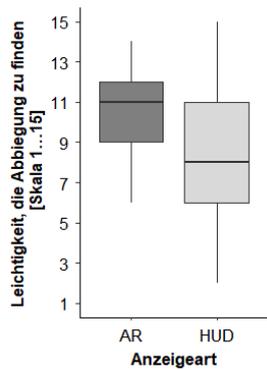
(c) Schwierigkeit Navigationsaufgabe [negativ gepoltes Item]*



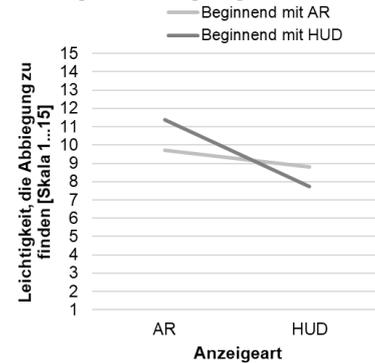
(d) Interaktion zwischen Anzeigertyp und Reihenfolge: Schwierigkeit Navigationsaufgabe [negativ gepoltes Item]*



(e) Leichtigkeit, die Abbiegung zu finden



(f) Interaktion zwischen Anzeigertyp und Reihenfolge: Leichtigkeit, die Abbiegung zu finden



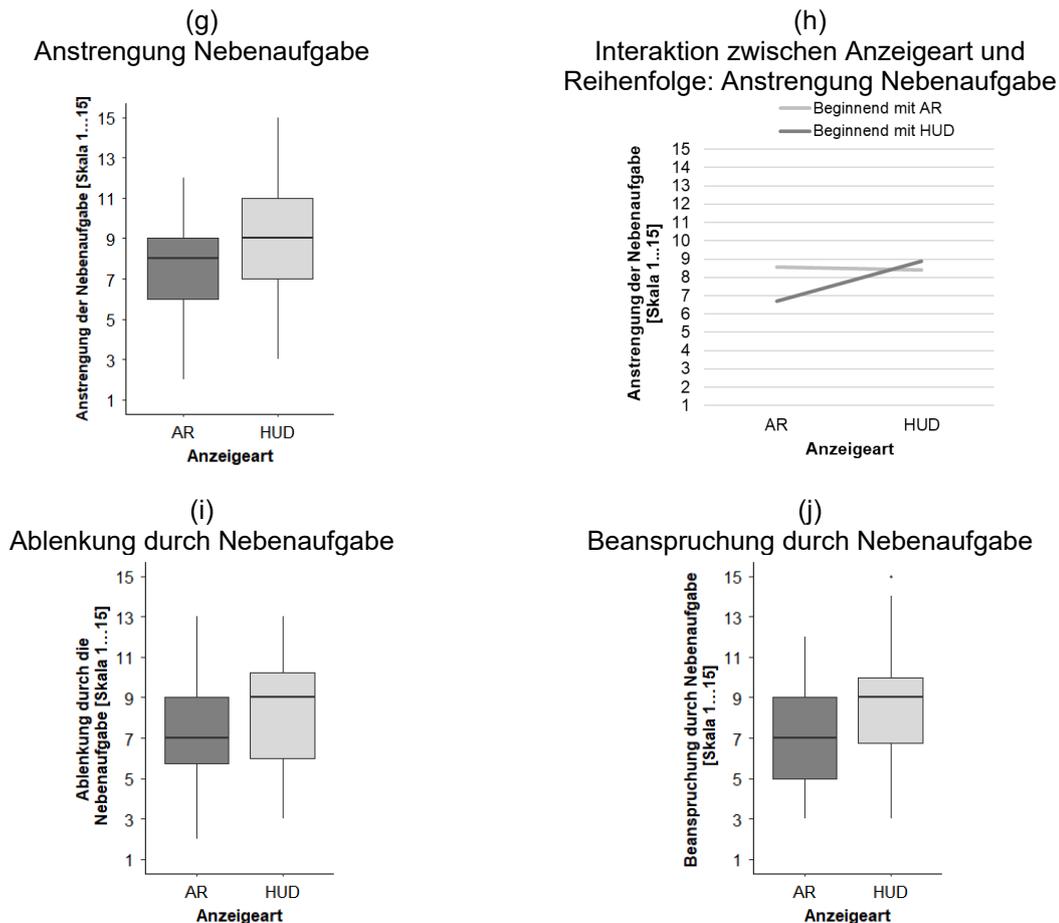


Abbildung 7.23: Boxplots der subjektiven Evaluation bezüglich der Schwierigkeit der Fahraufgabe, der Schwierigkeit der Navigationsaufgabe, der Leichtigkeit die Abbiegung zu finden, der Anstrengung der Nebenaufgabe, der Ablenkung durch die Nebenaufgabe und der Beanspruchung durch die Nebenaufgabe (1: niedrige Zustimmung, 15: hohe Zustimmung auf dem jeweiligen Item; *negativ gepoltes Item: 1: sehr schwer, 15: sehr leicht) und die jeweiligen Interaktionen zwischen der Anzeigeart und der Reihenfolge (N = 48)

Es zeigte sich ein signifikanter Unterschied in der Bewertung des Handlings der beiden Fahrzeuge ($F(1, 46) = 19.14, p < .001, \eta_p^2 = .29$). Das Handling beider Fahrzeuge wurde als „leicht“ bewertet, jedoch wurde der Umgang mit dem AR-Versuchsträger (Golf) etwas besser eingestuft als mit dem Serien-Touareg (AR Display: $M = 12.98, SD = 1.54$; HUD: $M = 11.73, SD = 1.98$) (Abbildung 7.24).

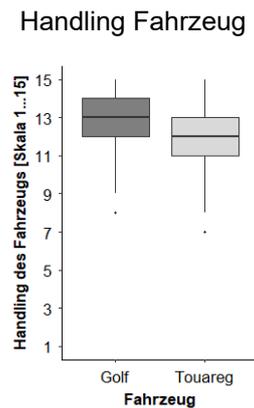


Abbildung 7.24: Boxplot der subjektiven Evaluation bezüglich des Handlings des Fahrzeugs: Golf mit eingebauten AR Display und VW Touareg mit Serien-HUD (N = 48), (1: sehr schwer, 15: sehr leicht).

Offene Abschlussanmerkungen im Rahmen der Realfahrtstudie verdeutlichten, dass sich zehn von 48 Versuchspersonen in Ergänzung zu den AR-Informationen Entfernungsangaben in Form einer Distanzanzeige wünschten. Drei dieser Versuchspersonen und weitere zehn wünschten sich eine dauerhaft verfügbare Statusleiste, welche Entfernungs- und Richtungshinweise für das anstehende Manöver am unteren Rand des Fahrerblickfeldes zeigt. 18 Versuchspersonen vermerkten im Fragebogen zur Evaluierung des AR Displays, dass sie sich in einigen Situationen präzisere AR-Informationen gewünscht hätten und verwiesen u.a. auf die Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs, die ein Mitschwingen der AR-Informationen verursachen können.

Nach der Studie gaben die Versuchspersonen ihre Präferenz hinsichtlich der Anzeigart an. Sieben Versuchspersonen entschieden sich für das HUD, 39 Versuchspersonen wünschten sich das AR Display und zwei Versuchspersonen präferierten keine der beiden Anzeigen.

Hinsichtlich des Manipulationschecks zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen der Bewertung der Eindeutigkeit der uneindeutigen Situation, die als „wenig eindeutig“ bezeichnet wurde ($M = 6.43$, $SD = 2.52$) und der eindeutigen Situation, die als „stark eindeutig“ eingestuft wurde ($M = 10.57$, $SD = 3.13$), ($t(45) = 7.74$, $p < .001$, $r = .76$).

7.4 Diskussion und Zusammenfassung

In dieser Realfahrtstudie wurden AR-Informationen in realen Navigationssituationen untersucht. Besonders im Kontext von Augmented Reality ist das Erleben in einem realen Setting besonders wichtig für die Untersuchung des menschlichen Verhaltens und der subjektiven Einschätzung. Auch in dieser Studie war die Navigation in beiden Displays ohne eine ergänzende Sprachansage umgesetzt, um die gefundenen Effekte ausschließlich auf die Anzeige zurückzuführen.

Bei den zwei untersuchten Abbiegesituationen handelte es sich um eine uneindeutige und eine eindeutige Navigationssituation. Die uneindeutige Situation bot drei dicht gelegene Abbiegemöglichkeiten. Es handelte sich um eine verengte Fahrbahn aufgrund beidseitig parkender Fahrzeuge. Dagegen war die eindeutige Situation eine breite und übersichtliche Straße mit einem großen Zebrastreifen kurz vor der Abbiegemöglichkeit.

Die Ergebnisse dieser Studie lieferten keine Hinweise auf eine Aufmerksamkeitsbindung in Form eines Cognitive-Capture-Effekts bedingt durch Informationen im AR Display oder im HUD. Die Daten zeigten, dass die Blicke der Versuchspersonen mit beiden Anzeigen sowohl über die Umgebung als auch über die präsentierten Navigationsinformationen streuten. Die Blickdaten der horizontalen und vertikalen Blicksteuerung lieferten keine Hinweise, dass das AR Display ein unterschiedliches Blickverhalten als das HUD auslöst. Zu diskutieren ist jedoch, dass sich die beiden Anzeigearten in ihrer Größe und Positionierung unterschieden. Gegen die mögliche Vermutung, dass die Blicksteuerung mit dem AR Display ausschließlich durch die Breite und die Höhe der AR-Informationen bedingt wurde, spricht die Tatsache, dass die durchschnittliche Blicksteuerung mit dem AR Display ähnlich zu der durchschnittlichen Blicksteuerung mit dem HUD war. Wäre die Blicksteuerung nur auf die Größe der AR-Informationen zurückzuführen, wäre die Wahrscheinlichkeit groß, dass sich diese zur Blicksteuerung mit dem HUD unterschieden hätte. Abgeleitet werden kann somit, dass es sich um eine natürliche Blicksteuerung in Interaktion mit dem AR Display handelte, die vergleichbar ist mit der eines HUDs. Dies bestätigten die subjektiven Daten. Die Bewertungen hinsichtlich der Aufmerksamkeitsbindung und der Ablenkung verdeutlichten, dass die Versuchspersonen keinen Unterschied zwischen den beiden Anzeigen wahrnahmen. Beide Anzeigearten wurden als „wenig ablenkend“ und „mittel“ aufmerksamkeitsbindend eingestuft. Die Überlagerung der AR-Informationen über andere Verkehrsobjekte wurde von den Versuchspersonen als „wenig störend“ bewertet. Des Weiteren gaben die Versuchspersonen an, dass ihnen die Größe des AR Displays „gut“ und die des HUDs „mittel“ gefiel. Somit kann abgeleitet werden, dass sich die AR-Informationen nicht salient in Form einer Aufmerksamkeitsbindung auswirkten, obwohl die AR-Informationen größer und präsenter im primären Blickfeld der Fahrenden positioniert waren.

Im Vergleich zu der horizontalen Blicksteuerung war die vertikale Blicksteuerung mit beiden Anzeigearten geringer ausgeprägt. In vertikaler Richtung betrachteten die Versuchspersonen die eigene Fahrspur und die Geschwindigkeitsanzeige am unteren Rand des primären Sichtfelds, welche für beide Anzeigearten auf gleicher Position implementiert war. Resultierend zeigten sich keine Unterschiede in der vertikalen Blicksteuerung zwischen den beiden Anzeigearten.

Somit kann abgeleitet werden, dass die Versuchspersonen die AR-Informationen genau wie Informationen im HUD als Unterstützung für die Navigationsaufgabe wahrnahmen und ein situationsangepasstes Blickverhalten ohne Aufmerksamkeitsbindung zeigten. Dieses Ergebnis zeigt auch, dass leichte Einschränkungen, wie das Mitschwingen der AR-Informationen durch Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs und Sensorungenauigkeiten keine Aufmerksamkeitsbindung verursachten.

Bisherige Forschung zu HUDs im Fahrkontext zeigte, dass HUDs keine Aufmerksamkeitsbindung in Form eines Cognitive-Capture-Effekt oder des Perceptual Tunnelings verursachen (Horrey et al., 2003; Milicic, 2010). Die Ergebnisse dieser Realfahrtstudie zeigen, dass AR-Informationen keine Aufmerksamkeitsbindung im Vergleich zu einem HUD hervorrufen. Zukünftige Forschung sollte sich ergänzend zu diesen Ergebnissen auf die Untersuchung von Kontrollblicken in die Spiegel zum Absichern des eigenen Fahrmanövers konzentrieren. Neben der Aufmerksamkeitssteuerung kann damit eine Aussage über ein potentiell verändertes Kontrollverhalten in Interaktion mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD abgeleitet werden.

Anzumerken ist, dass die Operationalisierung der visuellen Aufmerksamkeitsstreuung über die horizontale und vertikale Blickstreuung womöglich nicht alle Aspekte eines möglichen Cognitive-Capture-Effekts abdeckt. Kim und Gabbard (2019) untersuchten das Ablenkungspotential von AR Displays mit einer modifizierten SAGAT-Methode, um die Fahrenden auf ihr Situationsbewusstsein zu testen. Des Weiteren wurde das Blickverhalten, die Beanspruchung und das Selbstvertrauen in die eigenen Antworten analysiert. Sicherlich wird zukünftige Forschung weitere Möglichkeiten für die Untersuchung von aufmerksamkeitsbindenden Effekten im Kontext von AR-Informationen aufzeigen.

Die Eindeutigkeit der Situation zeigte keinen Effekt auf die horizontale und vertikale Blickstreuung mit den beiden Anzeigarten. Die Daten lieferten somit keine Hinweise, dass uneindeutige Abbiegesituationen eine unterschiedliche Aufmerksamkeitsstreuung auslösen als eindeutige Abbiegesituationen. Abgeleitet werden kann, dass in dieser Realfahrtstudie uneindeutige Abbiegungen die Aufmerksamkeit der Fahrenden nicht stärker banden als eindeutige Abbiegungen. Jedoch muss angemerkt werden, dass die meisten Versuchspersonen oft bis sehr oft auf dem Werksgelände unterwegs waren und somit durchaus mit den Abbiegungen vertraut waren.

Hinsichtlich der Untersuchung der Fahrerbeanspruchung, die auch in dieser Studie über die Leistung in einer Nebenaufgabe operationalisiert war, konnten keine Unterschiede zwischen den beiden Anzeigarten festgestellt werden. Die Anzeigarten unterschieden sich weder in der Häufigkeit der richtigen Antworten noch in der Schnelligkeit der Antworten. Es muss angemerkt werden, dass die Nebenaufgabe für das Navigieren auf womöglich bekannten Strecken des Werksgeländes zu leicht war. Angenommen wird außerdem, dass die reduzierte Geschwindigkeit von 30 km/h auf dem Werksgelände Einfluss auf die Leistbarkeit der Nebenaufgabe hatte. Dementsprechend war die Nebenaufgabe mit beiden Anzeigarten leichter als mit der üblichen Geschwindigkeit von 50 km/h.

Das Intervall von drei Sekunden zeigte sich als nicht beanspruchend genug, um potentielle Effekte zwischen den Anzeigarten in dieser Realfahrtstudie zu detektieren. Sowohl im Fahrsimulator als auch in einem Pre-Test erwies sich das Intervall von drei Sekunden als adäquat. Es wurde sich gegen ein kleineres Intervall als drei Sekunden entschieden, um die Sicherheit der Versuchspersonen in Fahrten im realen Straßenverkehr nicht zu gefährden und somit den APA Ethik Standards zu entsprechen (Ethical Principles of Psychologists and Code of Conduct, 2017).

Jedoch ließen die subjektiven Daten auf Unterschiede zwischen den Anzeigarten schließen. Das AR Display wurde als „stark entlastend“ und das HUD als „mittel entlastend“ für die Navigationsaufgabe bewertet. Die Ergebnisse des Driver Activity Load Index (Pauzié, 2008) zeigten, dass die Versuchspersonen das Navigieren mit dem AR Display bei gleichzeitiger Bearbeitung der Nebenaufgabe als weniger beanspruchend wahrnahmen als mit dem HUD. Die gesamte Aufmerksamkeit, die für das Navigieren und die Erfüllung der Nebenaufgabe benötigt wurde, wurde dementsprechend mit dem AR Display als weniger beanspruchend bewertet als mit dem HUD. Es zeigte sich des Weiteren, dass die visuellen Anforderungen während der Fahrt mit dem AR Display im Vergleich zu dem HUD als weniger stark empfunden wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass die Versuchspersonen mit dem AR Display weniger Stress empfanden als mit dem HUD.

Die Eindeutigkeit der Situation zeigte einen Einfluss auf die Leistung in der Nebenaufgabe. In der eindeutigen Situation wurden die meisten korrekten und die schnellsten Antworten detektiert. Es handelte sich hier um eine breite und übersichtliche Straße mit einem großen Zebrastreifen kurz vor der Zielabbiegung. Daraus lässt sich ableiten, dass diese Situation im Vergleich zu der uneindeutigen Situation als mental weniger beanspruchend für die Fahrenden war, sodass sie eine Leistungssteigerung in der Nebenaufgabe erzielen konnten.

Die Versuchspersonen zeigten in dieser Realfahrstudie mit dem AR Display und dem HUD eine gute Navigationsleistung. Generell wurden wenig Navigationsfehler verursacht. Deskriptiv wurden die meisten Fehler in der uneindeutigen Situation verursacht, was die Schwierigkeit dieser Situation im Vergleich zu der eindeutigen Situation unterstreicht. Die Ergebnisse zeigten auch, dass die Versuchspersonen mit dem AR Display weniger Fehler als mit dem HUD machten, jedoch war dieser Unterschied statistisch nicht bedeutsam. Somit zeigten die Fahrenden mit beiden Anzeigearten eine gute Orientierung in der Fahraufgabe. Zu diskutieren ist, ob die niedrige Geschwindigkeit von 30 km/h auf dem Werksgelände zu weniger Fehlern geführt hat.

Anzumerken ist, dass aufgrund von Verortungsschwierigkeiten die AR-Informationen in einer weiteren uneindeutigen Situation ungenau beziehungsweise unvollständig angezeigt wurden. Resultierend wurde diese Situation von der Analyse ausgeschlossen (Kapitel 7.2.2). 73 % aller Versuchspersonen sind in dieser Situation falsch abgebogen. Im Umkehrschluss wird deutlich, dass eine korrekte Verortung der AR-Informationen Grundvoraussetzung für eine korrekte Navigationsleistung ist.

Die subjektiven Einschätzungen der Versuchspersonen verdeutlichten jedoch signifikante Unterschiede zwischen den beiden Anzeigearten. Die Versuchspersonen empfanden das Finden der Abbiegung mit dem AR Display als „leicht“ und mit dem HUD als „mittel“. Das AR Display wurde als „gut verständlich“ für die Navigationsaufgabe wahrgenommen, wohingegen das HUD als „mittel verständlich“ bewertet wurde. Die Versuchspersonen empfanden beide Anzeigen als „nützlich“ für das Finden der korrekten Zielabbiegung und als „gut geeignet“ für die Navigationsaufgabe, bewerteten das AR Display jedoch leicht positiver. Auch die Akzeptanzbewertung nach Van der Laan et al. (1997) zeigte, dass das AR Display von den Versuchspersonen mehr akzeptiert wurde als das HUD. Des Weiteren empfanden die Versuchspersonen mit dem AR Display eine höhere User Experience. Diskutiert werden muss, ob der Innovations- bzw. der Neuheitswert des AR Displays einen positiven Bias bei den Versuchspersonen hervorgerufen hat.

Ein weiterer möglicher Grund für die höhere Nutzerakzeptanz ist, dass Fahrende mit einem AR Display keine digitalen Zahleninformationen interpretieren müssen. Die Distanzangabe ist in einem AR Display durch die Positionsgenauigkeit in der Darstellung integriert. Resultierend verstehen Fahrende die verbleibende Distanz zur Zielabbiegung intuitiver. Jedoch verdeutlichten offene Abschlussanmerkungen im Rahmen der Realfahrstudie, dass sich zehn von 48 Versuchspersonen in Ergänzung zu den AR-Informationen Entfernungsangaben in Form einer Distanzanzeige wünschten. Drei dieser Versuchspersonen und weitere zehn wünschten sich eine dauerhaft verfügbare Statusleiste, welche Entfernungs- und Richtungshinweise für das anstehende Manöver am unteren Rand des Fahrerblickfeldes zeigt. Jedoch muss bedacht werden, dass es sich um Fahrende handelte, die AR das erste Mal erlebten. Es stellt sich die Frage, ob sich diese Einschätzungen im Rahmen einer Langzeiterfahrung verändern.

Zusammenfassend zeigt diese Realfahrtstudie, dass Fahrende von AR-Informationen profitieren können. Bedacht werden muss, dass ein begrenztes FOV von $10^\circ \times 4.8^\circ$ bedingt durch aktuell technische Limitationen realisiert werden konnte. Ein begrenztes FOV kann dazu führen, dass die zu präsentierenden Informationen in bestimmten Situationen außerhalb des FOVs lagen und somit nicht mehr vollständig sichtbar für die Fahrenden waren. Eingetreten sein könnte das beispielsweise, wenn Versuchspersonen mittig auf der Straße und somit nicht mehr in der eigenen Fahrspur gefahren sind. Technische Herausforderungen umfassen des Weiteren auch das Mitschwingen der Informationen bedingt durch Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs. Jedoch wirkten sich diese nicht negativ auf die Effektivität und die Bewertung des AR Displays aus. Wenngleich 18 Versuchspersonen im Fragebogen vermerkten, dass sie sich in einigen Situationen präzisere AR-Informationen gewünscht hätten, bewerteten sie die Anzeigart dennoch positiv. Im Laufe der Weiterentwicklung der AR-Technologie werden Herausforderungen, wie das Mitschwingen der Anzeige durch Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs, zukünftig reduziert und das FOV vergrößert werden. Festgestellt werden kann, dass trotz Ungenauigkeiten die Navigationsaufgabe mit dem AR Display als leichter als mit dem HUD wahrgenommen und eine hohe Nutzerakzeptanz erzielt wurde. Des Weiteren konnte keine Aufmerksamkeitsbindung bedingt durch AR-Informationen festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigten jedoch auch, dass ungenaue und unvollständige AR-Informationen zu Navigationsfehlern führten. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit einer korrekten Verortung der AR-Informationen.

Im Rahmen der Interpretation der Ergebnisse müssen folgende Gegebenheiten diskutiert werden. Anzumerken ist, dass die Versuchspersonen Mitarbeitende der Volkswagen AG waren und einen Prototypenführerschein als Voraussetzung für die Teilnahme besaßen. Resultierend ist die Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu diskutieren. Dennoch handelte es sich nicht um ein hochselektives Sample. Teilnehmer, die sich beruflich mit Augmented Reality auseinandersetzen, stellten die Ausnahme dar. Die Versuchspersonen wurden von dem Probandenpool der Volkswagen AG rekrutiert und somit kamen die Teilnehmer aus ganz unterschiedlichen Bereichen des Unternehmens. Durch Teilnehmer, die nicht in einem Automobilkonzern arbeiten, werden keine anderen Ergebnisse in den Verhaltensdaten erwartet (Sedlmeier & Renkewitz, 2008). Lediglich die subjektive Einschätzung der getesteten Anzeigen könnte sich im Vergleich zu Teilnehmern aus konzernfremden Berufen unterscheiden. Somit ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse legitim.

Des Weiteren ist die Vertrautheit des Werksgeländes zu nennen. 37 von 48 Teilnehmer fuhren oft bis sehr oft auf dem Werksgelände und somit könnten die Versuchsstrecken bekannt gewesen sein. Nichtsdestotrotz haben sich die Fahrten mit dem AR Display und dem HUD unterschieden und somit ein Antizipieren der Strecke erschwert. Außerdem beträgt die Geschwindigkeitsbegrenzung auf dem Werksgelände 30 km/h, was jedoch keine Einbuße im Erleben der Anzeigen bewirkte. Jedoch wird angenommen, dass die niedrige Geschwindigkeit Einfluss auf die Leistbarkeit der Nebenaufgabe und auf die Anzahl der Navigationsfehler hatte.

Für die Durchführung dieser Studie wurden Zeitslots gewählt, in denen kein Wechsel der Produktionsschicht lag, um für alle Fahrten vergleichbare Bedingungen hinsichtlich des Verkehrsaufkommens zu erzielen.

Die Versuchsfahrzeuge für die beiden Anzeigarten unterschieden sich hinsichtlich der Größe und der Höhe des Fahrzeugs. Das AR Display war in einem Golf (Kompaktklasse)

verbaut, wohingegen die Versuchspersonen das Serien-HUD in einem Touareg (Geländewagen) erlebten, da in diesem die Navigation mit verschiedenen Zwischenzielen gut umsetzbar war. Die Versuchspersonen gaben jedoch an, dass das Handling beider Fahrzeuge „leicht“ war, auch wenn der Umgang mit dem Golf etwas besser eingestuft wurde als mit dem Touareg.

Anzumerken ist, dass in dieser Studie der Einfluss der grafischen Gestaltung der dargestellten AR-Informationen nicht betrachtet wurde und somit keine generalisierte Aussage dazu abgeleitet werden kann.

Zusammenfassend werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Studie 3 in Tabelle 7.12 aufgeführt:

Tabelle 7.12: Ergebnisse der Studie 3.

<i>Einfluss der Anzeigart</i>
(1) keine Hinweise auf einen Cognitive-Capture-Effekt bedingt durch das AR Display oder das HUD in dieser Realfahrtstudie
<ul style="list-style-type: none"> - keine Hinweise auf Unterschiede in der horizontalen und vertikalen Blickstreuung zwischen den beiden Anzeigarten - beide Anzeigarten als „wenig ablenkend“ und „mittel“ aufmerksamkeitsbindend bewertet - Überlagerung der AR-Informationen über andere Verkehrsobjekte als „wenig störend“ bewertet
(2) keine Unterschiede in der objektiven Fahrerbeanspruchung zwischen dem AR Display und dem HUD ableitbar
<ul style="list-style-type: none"> - kein Einfluss der Anzeigart auf die Leistung in der Nebenaufgabe - AR Display jedoch als entlastender als das HUD bewertet
(3) gute Orientierung in der Fahraufgabe mit beiden Anzeigarten
<ul style="list-style-type: none"> - wenig Navigationsfehler mit beiden Anzeigarten - Navigationsfehler durch ungenaue bzw. unvollständige Verortung der AR-Informationen - Finden der Abbiegung mit dem AR Display als leichter als mit dem HUD bewertet
(4) erhöhte Nutzerakzeptanz des AR Displays im Vergleich zu dem HUD
<ul style="list-style-type: none"> - AR Display als nützlicher und verständlicher als das HUD bewertet - höhere User Experience und höhere Akzeptanz mit dem AR Display als mit dem HUD
<i>Einfluss der Eindeutigkeit der Abbiegesituation</i>
(1) kein Einfluss der Eindeutigkeit der Abbiegesituation auf das Blickverhalten
<ul style="list-style-type: none"> - keine Hinweise auf Unterschiede in der horizontalen und vertikalen Blickstreuung zwischen der eindeutigen und der uneindeutigen Abbiegesituation
(2) eindeutige Abbiegesituation weniger beanspruchend als uneindeutige Abbiegesituation
<ul style="list-style-type: none"> - meiste korrekte und schnellste Antworten in der eindeutigen Abbiegesituation detektiert
(3) verschlechterte Orientierung in der uneindeutigen Abbiegesituation
<ul style="list-style-type: none"> - deskriptiv mehr Navigationsfehler in uneindeutiger als in eindeutiger Abbiegesituation - uneindeutige Abbiegesituation als „wenig eindeutig“ und eindeutige Abbiegesituation als „stark eindeutig“ wahrgenommen

8 Diskussion und kritische Auseinandersetzung

Es folgt die Diskussion aller Ergebnisse der vorliegenden Dissertation. Anschließend werden spezifische Untersuchungsgegebenheiten und das methodische Vorgehen kritisch beleuchtet. Abschließend werden die praktischen Implikationen dieser Dissertation zusammengefasst.

8.1 Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde die Effektivität und Bewertung von AR-Informationen in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD untersucht. Angenommen wurde, dass Fahrende besonders in uneindeutigen Navigationssituationen von AR-Informationen profitieren, da die Informationen im direkten Bezug zur Umwelt dargestellt werden. Es wurde analysiert, ob AR-Informationen zu einer verbesserten Orientierung und gleichzeitig einer reduzierten Beanspruchung in uneindeutigen Navigationssituationen im Vergleich zu einem HUD verhelfen können. Zudem wurde untersucht, ob AR-Informationen eine Aufmerksamkeitsbindung bedingen können. Dazu wurden drei Nutzerstudien durchgeführt.

Die erste Studie verhalf zu einem grundlegenden Verständnis der Interaktion mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD. Die Zielsetzung dieser Fahrsimulatorstudie war die Untersuchung der Effektivität und der Beanspruchung von AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD in uneindeutigen Navigationssituationen in einer Vorstadt.

Es folgte eine Evaluationsstudie mit dem Ziel zu untersuchen, ob das Navigieren mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD zu aufmerksamkeitsbindenden Effekten führt. Des Weiteren wurde untersucht, ob die Verkehrskomplexität einen Einfluss auf die Effektivität und Bewertung der AR-Informationen hat. Da die Informationen positionsgenau in der Umwelt verortet sind, kann es zu Überlagerungen kommen, welche als störend von Fahrenden wahrgenommen werden könnten.

Um die gefundenen Effekte in einem realen Setting zu validieren, wurde eine Realfahrtstudie als dritte Studie durchgeführt. Dazu wurde die Effektivität und die Beanspruchung von AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD in realen Navigationssituationen untersucht.

Angemerkt werden muss, dass die gefundenen Ergebnisse auf den in dieser Dissertation getesteten Anzeigen beruhen. Aus diesem Grund wurde darauf geachtet, die verwendeten Anzeigen möglichst universell zu gestalten, um eine Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. In den durchgeführten Studien wurde der Einfluss der grafischen Gestaltung der dargestellten Inhalte im AR Display nicht betrachtet. Daher können dazu keine generalisierten Aussagen abgeleitet werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Dissertation zeigen, dass die Erkennbarkeit des Navigationspfades durch AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD gesteigert werden konnte. Des Weiteren führten AR-Informationen zu einer verbesserten Orientierung in der Navigationsaufgabe (Studie 1 & 2). Dabei zeigte sich, dass die Versuchspersonen mit einem AR Display die richtige Zielabiegung in uneindeutigen Navigationsaufgaben frühzeitiger

identifizieren konnten als mit einem HUD (Studie 1). Zugleich konnten mit AR-Informationen Navigationsfehler reduziert (Studie 1 & 2) und die Fahraufgabe erleichtert werden (Studie 1-3). In der Realfahrstudie (Studie 3) zeigten die Versuchspersonen mit beiden Anzeigearten eine gute Navigationsleistung und somit eine gute Orientierung in der Fahraufgabe. Generell wurden in dieser Studie wenig Navigationsfehler verursacht, was durch die niedrige Geschwindigkeit von 30 km/h auf dem Werksgelände begründet sein kann. Dennoch zeigten die deskriptiven Daten, dass die Versuchspersonen mit dem AR Display besonders in der uneindeutigen Abbiegesituation weniger Fehler als mit dem HUD machten. Somit können die Befunde in der Literatur bestätigt werden (Israel, 2012; Kim & Dey, 2009). Die bessere Erkennbarkeit des Navigationspfades ist zum einen begründet durch die Positionierung der AR-Informationen im primären Blickfeld der Fahrenden. Wie auch im HUD sind die Informationen somit für die Fahrenden schnell und einfach zugänglich. Zudem liegen AR-Informationen auf der Sichtachse der Fahrenden, wodurch der Bottom-up-Prozess der Aufmerksamkeitslenkung zusätzlich erleichtert ist. Laut des SEEV-Modells (Wickens et al., 2001) ist somit die „Anstrengung“ (Effort) der Informationsaufnahme reduziert. Folglich kann auf die visuelle Suche verzichtet werden und es entstehen keine „Suchkosten“ für die Fahrenden.

Eine weitere Begründung stellt die positionsgenaue Verortung der AR-Informationen in der Fahrumgebung dar. AR-Informationen werden am Ort des Entstehens angezeigt und somit entsteht eine räumliche Nähe zwischen den virtuellen und den realen Objekten (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Resultierend müssen Fahrende ihre Aufmerksamkeit nicht zwischen den virtuellen Informationen und der Umwelt aufteilen (Gabbard et al., 2014), wie es bei einem HUD nötig ist.

Hinsichtlich einer geteilten Aufmerksamkeit konnte in dieser Dissertation gezeigt werden, dass es in Interaktion mit AR-Informationen zu einer reduzierten Blickwechselanzahl zwischen der Zielabiegung und der Anzeige kam (Studie 2). Somit ist scheinbar ein mentaler Abgleich zwischen den virtuellen Informationen und der realen Fahrsituation, wie mit einem HUD, nicht länger notwendig. Abgeleitet werden kann, dass AR-Informationen nicht in die Umwelt übertragen werden müssen. Dieses Ergebnis bestätigt die Befunde in der Literatur (Kim und Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Vorausgesetzt wird jedoch eine fehlerfreie Verortung der AR-Informationen. Im Rahmen der Realfahrtstudie wurde deutlich, dass es zu vermehrten Navigationsfehlern kam, als die AR-Informationen nicht korrekt in der Umwelt verortet waren (Studie 3). Die Erkenntnisse von Schneider et al. (2019) können somit bestätigt werden.

In Bezug auf eine verbesserte Orientierung erleichterte das AR Display im Vergleich zu einem HUD des Weiteren die Einschätzung der verbleibenden Distanz zur Zielabiegung. AR-Informationen bewiesen sich als weniger komplex, da die Distanzangabe in der Darstellung integriert ist. Die subjektiven Daten bestätigen dies. Sowohl im Fahrsimulator als auch im Realfahrzeug zeigte sich eine erhöhte Nutzerakzeptanz des AR Displays im Vergleich zu dem HUD (Studie 1-3). Die Versuchspersonen gaben an, dass Ihnen das AR Display besser gefiel als das HUD. Das Navigieren in uneindeutigen Situationen wurde mit dieser Anzeigeart als angenehmer und verständlicher wahrgenommen. Demnach wurde das AR Display als nützlicher als das HUD für uneindeutige Navigationssituationen eingeschätzt. Die Versuchspersonen bewerteten das AR Display folglich als geeigneter.

Weitere Ergebnisse der Studie 1 zeigten, dass die Versuchspersonen im Vergleich zu dem HUD mit dem AR Display eine höhere Geschwindigkeit während der Annäherung an

uneindeutige Navigationssituationen zeigten. Im Gegensatz dazu, fuhren die Versuchspersonen mit einem HUD langsamer zur Zielabbiegung, was auf ein Kompensationsverhalten hindeuten kann (Studie 1). Durch eine reduzierte Geschwindigkeit mit dem HUD gewannen sie Zeit für die Navigationsentscheidung in der uneindeutigen Abbiegesituation. Folglich kann eine reduzierte mentale Beanspruchung durch AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD abgeleitet werden. In den Studien konnte festgestellt werden, dass AR-Informationen mental weniger beanspruchend zu verarbeiten sind als Informationen im HUD (Studie 1-3) und bestätigen somit Behauptungen aus der Literatur (Bengler et al., 2015; Israel, 2012; Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017; Pfannmüller et al., 2015a). Dies zeigte sich durch das bessere Absolvieren der kognitiv beanspruchenden Nebenaufgabe mit dem AR Display im Vergleich zu einem HUD (Studie 1 & 2). Die Versuchspersonen beantworteten die Nebenaufgabe schneller und machten weniger Fehler. Des Weiteren bewerteten sie das AR Display als „entlastender“ für die Navigationsaufgabe als das HUD (Studie 1-3). Abgeleitet werden kann somit, dass AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD weniger kognitive Ressourcen der Fahrenden beanspruchen. Begründet werden kann dies durch jegliche Unterschiede zwischen den beiden Anzeigearten. Vermutet wird, dass die reduzierte mentale Beanspruchung durch die positionsgenaue Verortung der AR-Informationen in der Fahrumgebung erreicht wurde. Resultierend können Fahrende scheinbar auf einen mentalen Abgleich verzichten, da die virtuellen Navigationsinformationen nicht in die Umwelt übertragen werden müssen (Kim & Dey, 2009; Pfannmüller, 2017). Im Gegensatz dazu ist dieser in Interaktion mit einem HUD nötig, da die HUD-Informationen nicht in der Umwelt verortet dargestellt werden und folglich in die Umwelt übertragen werden müssen. Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in den subjektiven Daten wider. Die Versuchspersonen gaben an, dass die Nebenaufgabe in uneindeutigen Navigationssituationen anstrengender und schwieriger mit dem HUD zu absolvieren war (Studie 1-3).

Jedoch konnte die reduzierte Fahrerbeanspruchung durch AR-Informationen in der realen Navigationsaufgabe ausschließlich durch subjektive Daten bestätigt werden (Studie 3). Es wird angenommen, dass das Navigieren in einem realen Setting eine stark vertraute Aufgabe darstellt. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Nebenaufgabe mit einem Intervall von drei Sekunden in der Realfahrtstudie nicht beanspruchend genug war, um potentielle kleine Effekte bedingt durch die Anzeigeart messbar zu machen. Im Simulator und in Pre-Tests erwies sich dieses Intervall jedoch als geeignet. Es wurde sich gegen ein beanspruchenderes Intervall von zwei Sekunden entschieden, um die Verkehrssicherheit nicht zu gefährden.

Ein weiteres Kernergebnis der durchgeführten Studien im Simulator und im realen Setting zeigte keine aufmerksamkeitsbindenden Effekte bedingt durch das AR Display und das HUD. Der Cognitive-Capture-Effekt (Weintraub, 1987 nach Tufano, 1997), welcher die Unfähigkeit die Aufmerksamkeit situationsangemessen zwischen der Anzeige und der Umwelt zu verteilen beschreibt (Gish & Staplin, 1995), zeigte sich nicht. Die Blickdaten der horizontalen und vertikalen Blickstreuung lieferten keine Hinweise, dass das AR Display ein unterschiedliches Blickverhalten als das HUD auslöst (Studie 2 & 3). Der Befund der Literatur hinsichtlich dem Ausbleiben des Cognitive-Capture-Effekts im Fahrkontext (Horrey et al., 2003; Milicic, 2010) kann somit auch für das Fahren mit AR-Informationen bestätigt werden.

Generell wurde festgestellt, dass die Blickstreuung im Simulator weniger ausgeprägt war als in einer realen Fahrsituation. Womöglich fühlten sich die Versuchspersonen sicherer im Simulator als im Realverkehr. Außerdem navigierten die Versuchspersonen im Simulator mit einem Blickfeld von 180°. Sie könnten eine hohe Blickstreuung gemieden haben, um Simulatorübelkeit zu vermeiden.

In einer komplexeren standardisierten Situation, bei der es sich um eine uneindeutige Linksabbiegung mit einem entgegenkommenden Fahrzeug handelte, zeigte sich des Weiteren, dass mit dem AR Display mehr Blicke auf das entgegenkommende Fahrzeug gerichtet wurden als mit dem HUD (Studie 2). Dies spricht gegen eine Aufmerksamkeitsbindung bedingt durch AR-Informationen.

Generell wird empfohlen AR-Informationen ausschließlich situativ und nicht dauerhaft anzuzeigen, um aufmerksamkeitsbindende Effekte zu vermeiden (Bengler et al., 2015; Pfannmüller, 2017). Diese Empfehlung wurde in allen Studien umgesetzt. Es handelte sich somit um eine situative Manöverunterstützung. Offene Abschlussanmerkungen im Rahmen der Realfahrtstudie verdeutlichten, dass sich 13 der 48 Versuchspersonen in Ergänzung zu den AR-Informationen eine dauerhaft verfügbare Statusleiste wünschten (Studie 3). Diese präsentiert Hinweise für das anstehende Manöver am unteren Rand des Fahrerblickfeldes. Jedoch muss bedacht werden, dass es sich um Fahrende handelte, die AR das erste Mal erlebten. Es stellt sich die Frage, ob sich diese Einschätzungen im Rahmen einer Langzeiterfahrung verändern würden.

Des Weiteren wurde im Rahmen dieser Dissertation kein Einfluss der Verkehrskomplexität auf die Effektivität und die Bewertung der AR-Informationen festgestellt (Studie 2). Die Versuchspersonen bewerteten die Überlagerung der AR-Informationen über andere Verkehrsteilnehmer als wenig störend. Jedoch zeigte sich ein Einfluss der Verkehrskomplexität auf das Verhalten der Versuchspersonen. In der hohen Verkehrskomplexität zeigten die Versuchspersonen eine höhere aufsummierte Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug und die Gegenfahrbahn in der uneindeutigen Linksabbiegung als in der niedrigen Verkehrskomplexität. Des Weiteren empfanden sie die Entscheidung vor oder hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug abzubiegen in der niedrigen Verkehrskomplexität leichter als in der hohen Verkehrskomplexität, nahmen die Entscheidung in beiden Bedingungen jedoch als leicht wahr. Außerdem absolvierten die Versuchspersonen die kognitive Nebenaufgabe in der hohen Verkehrskomplexität besser, was auf ein angemessenes Beanspruchungslevel schließen lässt (Studie 2). Die niedrige Verkehrskomplexität bewies sich somit als nicht herausfordernd genug. Subjektiv wurde die unterschiedliche Verkehrskomplexität jedoch von der Hälfte der Versuchspersonen nicht wahrgenommen. Angenommen wird, dass die in dieser Studie realisierte Verkehrskomplexität die Fahraufgabe zu wenig beeinflusste (Kapitel 8.2).

Weitere Erkenntnisse der vorliegenden Dissertation betreffen den Einfluss der Eindeutigkeit der Navigationssituation auf das Verhalten der Fahrenden (Studie 3). In uneindeutigen Navigationssituationen wurden deskriptiv mehr Navigationsfehler gemacht als in eindeutigen Situationen. Bestätigend wurde die uneindeutige Abbiegesituation als „wenig eindeutig“ und die eindeutige Abbiegesituation als „stark eindeutig“ bewertet. In der eindeutigen Abbiegesituation wurden die meisten korrekten und schnellsten Antworten detektiert. Abgeleitet werden kann, dass die eindeutige Abbiegesituation weniger beanspruchend war als die uneindeutige Abbiegesituation. Die Eindeutigkeit der Situation hatte keinen Einfluss auf die horizontale und vertikale Blickstreuung.

Zusammenfassend wird in Bezug auf die menschliche Informationsverarbeitung von AR-Informationen angenommen, je näher die präsentierten Informationen an der natürlichen räumlichen Orientierung und am menschlichen Wahrnehmungsprozess liegen, desto besser bzw. schneller kann eine Entscheidung getroffen bzw. ein Verhalten gezeigt werden. Das wiederum wirkt sich positiv auf das subjektive Erleben aus.

Tabelle 8.1 zeigt die Haupteckkenntnisse der vorliegenden Dissertation.

Tabelle 8.1: Haupteckkenntnisse dieser Dissertation.

<p>(1) verbesserte Orientierung in uneindeutigen Navigationssituationen mit dem AR Display im Vergleich zu dem HUD</p> <ul style="list-style-type: none"> - frühzeitigere Identifizierung uneindeutiger Abbiegesituationen mit dem AR Display als mit dem HUD (Studie 1) - weniger Navigationsfehler mit dem AR Display als mit dem HUD (Studie 1 & 2) - frühzeitigeres Lösen des Gaspedals mit dem AR Display als mit dem HUD vor uneindeutigen Abbiegesituationen aufgrund frühzeitigerer Identifikation der Zielabiegung, deutet auf vorausschauendes Fahren hin (Studie 1) - Fahraufgabe mit dem AR Display als leichter als mit dem HUD bewertet (Studie 1-3)
<p>(2) reduzierte mentale Beanspruchung in uneindeutigen Navigationssituationen durch AR-Informationen im Vergleich zu dem HUD</p> <ul style="list-style-type: none"> - schnelleres Absolvieren und weniger Fehler in der kognitiven Nebenaufgabe mit dem AR Display als mit dem HUD (Studie 1 & 2) - geringere durchschnittliche Blickwechselanzahl zwischen der Zielabiegung und dem AR Display als mit dem HUD → mentaler Abgleich der virtuellen Informationen in die Umwelt scheinbar nicht nötig, Einsparung mentaler Ressourcen mit AR-Informationen (Studie 2) - AR Display als entlastender als das HUD bewertet (Studie 1-3) - höhere Geschwindigkeit mit dem AR Display während der Annäherung an uneindeutige Abbiegesituationen im Vergleich zum HUD, reduzierte Geschwindigkeit mit dem HUD → Kompensationsverhalten mit dem HUD, um Zeit für Entscheidung in uneindeutigen Abbiegesituationen zu gewinnen (Studie 1)
<p>(3) keine Hinweise auf einen Cognitive-Capture-Effekt bedingt durch das AR Display oder das HUD</p> <ul style="list-style-type: none"> - keine Hinweise auf Unterschiede in der horizontalen Blickstreuung zwischen dem AR Display und dem HUD (Studie 2 & 3) - höhere aufsummierte Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug und die Gegenfahrbahn in einer uneindeutigen Linksabiegung mit dem AR Display als mit dem HUD (Studie 2)
<p>(4) erhöhte Nutzerakzeptanz der AR-Informationen im Vergleich zu dem HUD</p> <ul style="list-style-type: none"> - AR Display als verständlicher, geeigneter, nützlicher und entlastender als das HUD für uneindeutige Navigationssituationen bewertet (Studie 1-3) - höhere User Experience und höhere Akzeptanz mit dem AR Display als mit dem HUD (Studie 3)
<p>(5) Einfluss der Verkehrskomplexität auf das Verhalten der Versuchspersonen, unterschiedliche Verkehrskomplexität jedoch von der Hälfte der Versuchspersonen nicht wahrgenommen (Studie 2)</p> <ul style="list-style-type: none"> - höhere aufsummierte Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug und die Gegenfahrbahn in der hohen Verkehrskomplexität als in der niedrigen Verkehrskomplexität

-
- besonders in der hohen Verkehrskomplexität mit dem AR Display mehr auf das entgegenkommende Fahrzeug geschaut als mit dem HUD
 - Entscheidung vor oder hinter dem entgegenkommenden Fahrzeug abzubiegen in der niedrigen Verkehrskomplexität als leichter bewertet als in der hohen Verkehrskomplexität, in beiden Bedingungen als leicht wahrgenommen
 - kognitive Nebenaufgabe in der hohen Verkehrskomplexität besser als in der niedrigen Verkehrskomplexität absolviert → deutet auf ein angemessenes Beanspruchungslevel hin, niedrige Verkehrskomplexität erwies sich als nicht herausfordernd genug
 - kein Einfluss der Verkehrskomplexität auf die Blickstreuung während der Annäherung an uneindeutige Abbiegesituationen
 - keine Unterschiede bei Navigationsfehlern zwischen der hohen und der niedrigen Verkehrskomplexität
 - Überlagerung der AR-Informationen über andere Verkehrsobjekte in der niedrigen und in der hohen Verkehrskomplexität als „wenig störend“ bewertet
 - kein Einfluss der Verkehrskomplexität auf die Bewertung der AR-Informationen
-

(6) Einfluss der Eindeutigkeit der Navigationssituationen auf das Verhalten der Versuchspersonen (Studie 3)

- deskriptiv mehr Navigationsfehler in uneindeutiger als in eindeutiger Abbiegesituation → verschlechterte Orientierung in der uneindeutigen Abbiegesituation
 - meiste korrekte und schnellste Antworten in der eindeutigen Abbiegesituation detektiert → eindeutige Abbiegesituation weniger beanspruchend als uneindeutige Abbiegesituation
 - kein Einfluss der Eindeutigkeit der Situation auf die horizontale und vertikale Blickstreuung
 - uneindeutige Abbiegesituation als „wenig eindeutig“ und eindeutige Abbiegesituation als „stark eindeutig“ wahrgenommen
-

8.2 Kritik der Studien

Im Rahmen der Interpretation der Ergebnisse werden im Folgenden das methodische Vorgehen und spezifische Untersuchungsgegebenheiten diskutiert.

Primär ist die Vergleichbarkeit zwischen dem AR Display und dem HUD zu nennen. Neben dem Umweltbezug, der in dieser Dissertation Fokus der Untersuchungen war, unterscheiden sich die angezeigten Informationen hinsichtlich der Platzierung im Sichtfeld und ihrer Größe. Demnach stellt sich die Frage der Vergleichbarkeit dieser beiden Anzeigearten. Das HUD wurde in dieser Arbeit als Baseline angesehen, da es sich zum Zeitpunkt dieser Dissertation um den neusten Stand der Technik in aktuellen Fahrzeugmodellen handelte, der im Vergleich zu HDDs viele Vorteile für Fahrende bietet (Kapitel 2.1). Angenommen wurde jedoch, dass besonders der Umweltbezug der präsentierten Informationen, der durch die AR-Technologie ermöglicht wird, Potentiale in uneindeutigen Navigationssituationen für Fahrende verspricht. In dieser Dissertation wurde die positionsgenaue Verortung der Informationen in die reale Fahrsituation als der primäre Unterschied zu einem HUD angesehen. Jedoch gehen damit auch die Position im primären Blickfeld der Fahrenden und die Größe der angezeigten Informationen einher. Die AR-Informationen sind durch die positionsgenaue Verortung vorwiegend mittig im primären Blickfeld, auf der Sichtachse der Fahrenden, angesiedelt und zusätzlich auch größer als die Informationen im HUD dargestellt. Somit muss angemerkt werden, dass die gefundenen Ergebnisse in dieser Dissertation grundsätzlich durch jegliche Unterschiede zwischen den beiden Anzeigearten bedingt sein können. Angenommen wird jedoch, dass besonders der

Umweltbezug für das Navigieren in uneindeutigen Navigationssituationen eine entscheidende Rolle spielt.

Zu Studie 3 muss bedacht werden, dass durch aktuell technische Limitationen (u.a. die Größe des zur Verfügung stehenden Bauraums) nur ein begrenztes FOV von $10^\circ \times 4.8^\circ$ in dem Prototyp der Realfahrtstudie realisiert werden konnte. Diese Begrenzung kann dazu geführt haben, dass die zu präsentierenden Informationen in bestimmten Situationen außerhalb des FOVs lagen und somit nicht mehr vollständig sichtbar für Fahrende waren. Besonders wenn die Versuchspersonen mittig auf der Straße und demnach nicht mehr in der eigenen Fahrspur gefahren sind, sahen sie die AR-Informationen nicht mehr vollumfänglich. Weitere technische Herausforderungen betreffen Ungenauigkeiten der AR-Informationen in Bezug auf die korrekte Platzierung in der Umwelt und das Mitschwingen der Informationen verursacht durch Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs. Obwohl 18 Versuchspersonen im Fragebogen zur Evaluierung des AR Displays angaben, dass sie sich in einigen Situationen präzisere AR-Informationen gewünscht hätten, wurde die Anzeigart dennoch sehr positiv bewertet. Diese Herausforderungen müssen im Laufe der Weiterentwicklung der AR-Technologie zukünftig reduziert werden. Abgeleitet werden kann, dass trotz Ungenauigkeiten die Navigationsaufgabe durch AR erleichtert und eine hohe Nutzerakzeptanz erzielt wurde. Des Weiteren konnte keine Aufmerksamkeitsbindung bedingt durch AR-Informationen festgestellt werden.

Des Weiteren muss zu Studie 3 festgestellt werden, dass die Nebenaufgabe mit einem Intervall von drei Sekunden für das Navigieren auf womöglich bekannten Strecken des Werksgeländes und einer reduzierten Geschwindigkeit von 30 km/h zu leicht war. Um mögliche Effekte zwischen den Anzeigarten in dieser Realfahrtstudie zu ermitteln, erwies sich das Intervall von drei Sekunden als nicht beanspruchend genug. Sowohl in einem Pre-Test als auch im Fahr Simulator wurde das Intervall von drei Sekunden als angemessen wahrgenommen. Im Rahmen der Realfahrt wurde sich gegen ein Intervall von zwei Sekunden entschieden, um für die Sicherheit der Versuchspersonen entsprechend den APA Ethik Standards (Ethical Principles of Psychologists and Code of Conduct, 2017) zu sorgen.

Zu Studie 2 muss angemerkt werden, dass der Faktor Verkehrskomplexität die Navigationsaufgabe zu wenig beeinflusste. Resultierend bemerkte die Hälfte der Versuchspersonen keinen Unterschied zwischen der niedrigen und der hohen Verkehrskomplexität. Jedoch zeigte sich ein Einfluss der Verkehrskomplexität auf das Verhalten der Versuchspersonen. Die Versuchspersonen absolvierten die kognitive Nebenaufgabe in der hohen Verkehrskomplexität besser, was auf ein angemessenes Beanspruchungslevel schließen lässt. Die niedrige Verkehrskomplexität erwies sich somit als nicht herausfordernd genug. Des Weiteren zeigten die Versuchspersonen in der hohen Verkehrskomplexität eine höhere aufsummierte Blickdauer auf das entgegenkommende Fahrzeug und die Gegenfahrbahn in der uneindeutigen Linksabbiegung als in der niedrigen Verkehrskomplexität. Angenommen wird, dass die Verkehrskomplexität ausschließlich in spezifischen Situationen sehr präsent für Fahrende ist. Zu diesen Situationen können beispielsweise Stau oder das Einfädeln auf eine stark befahrene Straße gehören. Diese Situationen schienen in der Studie nicht stark genug vertreten gewesen zu sein. Resultierend erschien den Versuchspersonen die Verkehrskomplexität als nicht auffällig genug. In dieser Studie wurde die Verkehrskomplexität in Form der Anzahl fahrender und parkender Fahrzeuge in den Fahrten variiert. Die parkenden Fahrzeuge könnten die Sicht auf die Abbiegungen erschwert haben, haben die allgemeine Fahraufgabe jedoch vermutlich wenig

beeinflusst. Demzufolge wird für zukünftige Untersuchungen empfohlen, sich lediglich auf den fließenden Verkehr zu konzentrieren und Navigationssituationen zu untersuchen, in denen die Verkehrskomplexität von großer Bedeutung ist.

Diskutiert werden muss außerdem, dass die Versuchspersonen der Studien Mitarbeitende der Volkswagen AG waren und einen Prototypenführerschein als Teilnahmevoraussetzung für die Realfahrtstudie besaßen. Demzufolge muss die Generalisierbarkeit der Ergebnisse diskutiert werden. Trotzdem handelte es sich nicht um eine hochselektive Teilnehmergruppe. Die Versuchspersonen wurden von dem Probandenpool der Volkswagen AG rekrutiert und kamen somit aus ganz unterschiedlichen Bereichen des Unternehmens, die den Einsatz in der Produktion am Band, über Arbeiten in der Kantine, bis zur Erforschung von neuen Technologien umfassen. Es wird angenommen, dass es zu keinen Abweichungen in den untersuchten Verhaltensdaten kommt durch die Teilnahme von Versuchspersonen außerhalb eines Automobilkonzerns (Sedlmeier & Renkewitz, 2008). Ausschließlich die subjektiven Bewertungen der untersuchten Anzeigen könnten im Vergleich zu Versuchspersonen aus konzernfremden Berufen abweichen. Grundsätzlich ist somit die Übertragbarkeit der Ergebnisse legitim.

In der vorliegenden Dissertation wurden keine Lerneffekte mit AR-Navigationsinformationen untersucht und somit können diesbezüglich keine Ableitungen getroffen werden. Für die Entwicklung der Technologie bedarf es systematische Untersuchungen von Langzeiteffekten, um eine potentiell veränderte Interaktion und die Bewertung der Fahrenden zu erfassen.

8.3 Praktische Implikationen dieser Dissertation

Im Rahmen dieser Dissertation erwiesen sich AR-Informationen im Fahrkontext als intuitiv und nützlich. Es zeigte sich, dass die Fahrenden die Navigationsaufgabe mit AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD als leichter wahrnahmen. Des Weiteren zeigten die Ergebnisse, dass Fahrende mit einem AR Display die richtige Zielabbiegung in uneindeutigen Navigationsaufgaben frühzeitiger identifizieren konnten als mit einem HUD. Zugleich konnten mit AR-Informationen Navigationsfehler reduziert werden. Abgeleitet werden kann, dass die Orientierung in Navigationssituationen durch AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD gesteigert werden konnte. Im Vergleich zu einem HUD, schienen die Fahrenden mit AR-Informationen über mehr freie Ressourcen zu verfügen, da das Navigieren mit AR-Informationen mental weniger beanspruchend war. Daraus lässt sich ableiten, dass AR-Informationen Potential für das Navigieren, besonders in uneindeutigen Situationen, bieten.

In dieser Dissertation konnten die diskutierten negativen Auswirkungen von AR-Informationen nicht bestätigt werden: Die Ergebnisse zeigten keine aufmerksamkeitsbindenden Effekte in Form eines Cognitive-Capture-Effekts bedingt durch AR-Informationen. Es zeigte sich, dass die Blicke der Fahrenden sowohl mit dem AR Display als auch mit dem HUD über die Fahrumgebung und die präsentierten Navigationsinformationen streuten. Aus den durchgeführten Studien dieser Dissertation kann abgeleitet werden, dass Fahrende in Interaktion mit AR-Informationen ihre Aufmerksamkeit situationsangemessen zwischen der Anzeige und der Umwelt verteilen. Zudem bietet diese Dissertation eine Operationalisierungsmöglichkeit, um aufmerksamkeitsbindende Effekte, die auf einen Cognitive-Capture-Effekt deuten können, zu untersuchen.

Die Gestaltung der AR-Informationen orientierte sich in dieser Dissertation an den Empfehlungen in der Literatur. Die Literatur zeigt auf, dass zu saliente AR-Informationen die Fahreraufmerksamkeit ungewollt auf sich ziehen können (Pfanmüller, 2017). Empfohlen wird des Weiteren auf eine hohe Informationsdichte zu verzichten, um Verdeckungen und Maskierungen von Umweltreizen auszuschließen (Gabbard et al., 2014; Pautz, 2015; Schneider et al., 2019). Stattdessen sollten ausschließlich fahrrelevante AR-Informationen präsentiert bzw. eine situative Manöverunterstützung realisiert werden, um Ablenkung bzw. eine Aufmerksamkeitsbindung zu vermeiden (Bengler et al., 2015; Eyraud et al., 2015; Ng-Thow-Hing et al., 2013; Pfanmüller, 2017; Wang et al., 2021). Im Rahmen der Pre-Studien dieser Dissertation wird auf Basis einzelner Erkenntnisse empfohlen die Farbgebung der AR-Elemente sorgfältig auszuwählen, sodass die Farbe der Anzeige keine Missinterpretation, wie beispielsweise Vorfahrtsregeln betreffend, bedingt. Des Weiteren zeigten einzelne Erkenntnisse, dass Animationen bewusst und reduziert zum Einsatz kommen sollten, um keine Aufmerksamkeitsbindung zu bewirken.

Herausforderungen zeigen sich aktuell noch im Bereich der technischen Integration eines AR Displays in ein reales Fahrzeug. Beispielsweise können Sensorungenauigkeiten zu versetzten AR-Informationen führen und Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs ein Mitschwingen der AR-Informationen bewirken. Des Weiteren ist bedingt durch aktuell technische Limitationen am Fahrzeug (u.a. die Größe des zur Verfügung stehenden Bauraums) ausschließlich ein begrenztes FOV möglich. Das bedeutet, dass AR-Informationen aktuell nicht auf der gesamten Windschutzscheibe angezeigt werden können und ausschließlich in einem begrenzten Bereich sichtbar sind. Resultierend kann die technische Umsetzung zu Einschränkungen führen, die sich auf die Effektivität und die Nutzerakzeptanz der AR-Informationen auswirken können (Jansen, 2018; Pfanmüller et al., 2015b; Pfanmüller, 2017; Sadovitch, 2020). Somit wird im Rahmen der Untersuchung der Effektivität und Nutzerakzeptanz dem Erleben einer AR-Anzeige in einem realen Setting eine besondere Bedeutung zugeschrieben. Da es sich bei AR um eine neuartige Technologie handelt, kann die Verfügbarkeit eines Fahrzeugs, das augmentierte Inhalte präsentieren kann, eine Herausforderung darstellen. Im Rahmen dieser Dissertation konnte auf einen AR-Versuchsträger zugegriffen werden. Somit bietet diese Dissertation erste Ansätze die Interaktion mit AR-Informationen sowohl in einem Simulator als auch in einem realen Fahrzeug im Straßenverkehr zu bewerten. Die Ergebnisse der Realfahrtstudie zeigen, dass trotz Ungenauigkeiten die Navigationsaufgabe mit dem AR Display als leichter als mit dem HUD wahrgenommen und eine hohe Nutzerakzeptanz erzielt wurde. Abgeleitet werden kann somit, dass Fahrende von der realen Verortung der AR-Informationen profitieren. Des Weiteren wurde in der Realfahrtstudie die korrekte positionsgenaue Verortung der AR-Informationen deutlich. Werden die Informationen versetzt oder unvollständig angezeigt, kann es besonders in uneindeutigen Navigationssituationen zu Navigationsfehlern kommen. Im Laufe der Weiterentwicklung der AR-Technologie werden Herausforderungen, wie das Mitschwingen der Anzeige durch Nick-Wank-Bewegungen des Fahrzeugs, zukünftig reduziert und das FOV vergrößert werden. Zusammenfassend zeigt diese Dissertation, dass AR-Informationen die nächste Generation innovativer Navigationssysteme darstellen können. Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit deuten darauf hin, dass die Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrkontext durch AR vereinfacht werden kann. In dieser Dissertation zeigte sich, dass Fahrende besonders in uneindeutigen Navigationssituationen durch die intuitive Darstellung der AR-Informationen profitieren können.

9 Ausblick und Fazit

Die vorliegende Dissertation trägt zu einem verbesserten Verständnis der Rolle von AR-Informationen in uneindeutigen Navigationssituationen bei. Des Weiteren wurde ein verbessertes Verständnis der menschlichen Informationsverarbeitung von augmentierten Inhalten während des manuellen Navigierens erarbeitet.

Die Ergebnisse der vorliegenden Dissertation zeigen, dass AR-Informationen im Bereich der Navigation Potential bieten. Besonders das manuelle Navigieren in uneindeutigen Navigationssituationen ist durch AR-Informationen im Vergleich zu einem HUD leichter. Dies konnte durch objektive Leistungsparameter und subjektive Einschätzungen gezeigt werden. Im Gegensatz zu einem HUD, erfolgte das Finden der richtigen Zielabbiegung mit einem AR Display frühzeitiger und gleichzeitig konnte eine Reduzierung von Navigationsfehlern erreicht werden. Das deutet auf eine verbesserte Orientierung in der Navigationsaufgabe hin. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass AR-Informationen leicht verstanden und verarbeitet werden können. Des Weiteren zeigten die Versuchspersonen mit AR-Informationen eine höhere Geschwindigkeit während der Annäherung an die Abbiegesituation als mit einem HUD. Eine reduzierte Geschwindigkeit mit dem HUD lässt auf ein Kompensationsverhalten schließen, um Zeit für die Navigationsentscheidung in uneindeutigen Abbiegesituationen zu gewinnen. Mit dem AR Display konnte außerdem eine reduzierte mentale Beanspruchung im Vergleich zu einem HUD erreicht werden. AR-Informationen scheinen im Vergleich zu einem HUD weniger kognitive Ressourcen der Fahrenden zu beanspruchen. Das AR Display erzielte im Vergleich zu einem HUD eine höhere Nutzerakzeptanz in der Navigationsaufgabe, was für ein verbessertes Fahrerlebnis spricht. Im Rahmen dieser Dissertation konnten keine Hinweise auf aufmerksamkeitsbindende Effekte durch AR-Informationen gefunden werden. Zukünftige Forschung sollte sich auf die Untersuchung verschiedener Beanspruchungslevel konzentrieren, um zu analysieren, ob ein hohes Beanspruchungslevel das Auftreten des Cognitive-Capture-Effekts begünstigt (Gish & Staplin, 1995).

Offen bleibt, inwiefern Lerneffekte und die Langzeitnutzung von AR-Navigationsinformationen zu einer Veränderung der Interaktion und des subjektiven Erlebens, wie der Akzeptanz, führen. Diese Erkenntnisse sollten in die Entwicklung der Technologie fließen.

In der Literatur wird diskutiert, ob AR-Informationen zu übersteigertem Vertrauen führen können (Gabbard et al., 2014). Untersucht werden sollte, ob Fahrende AR-Informationen zu viel Vertrauen schenken und resultierend fahrrelevante Umweltreize ignorieren. Gegenteilig verweisen Gabbard et al. (2014) darauf, dass Fahrende relevante AR-Informationen ignorieren könnten, wenn AR-Informationen in der Vergangenheit fehlerhaft waren. Somit besteht ebenfalls Forschungsbedarf bezüglich eines veränderten Umgangs bedingt durch fehlerhafte AR-Informationen.

Auch der Einfluss von Umweltfaktoren, wie Wetterbedingungen, sollten systematisch hinsichtlich der Effektivität von AR-Informationen untersucht werden. Eine besondere Herausforderung stellen helle Lichtverhältnisse oder Gegenlicht für die Lesbarkeit der AR-Informationen dar. Dagegen sind AR-Informationen unter dunklen Lichtverhältnissen (Nacht- oder Schlechtwetterfahrten) besonders leicht wahrnehmbar. So sollte die Helligkeit

der AR-Informationen abhängig von Umweltfaktoren adaptiv im Fahrzeug realisiert werden.

Des Weiteren sollte die Anzeigestaltung in Form von verschiedenen Konzepten in Bezug auf die Wahrnehmung und die Verarbeitung systematisch untersucht werden. Erste Erkenntnisse liefern dazu Pfanmüller et al. (2015a), Pfanmüller (2017) und Schneider et al. (2019).

Im Rahmen dieser Forschung wurde sich ausschließlich auf die manuelle Navigation mit AR-Informationen konzentriert. Die Literatur zeigt Forschung auf zu Potentialen und Herausforderungen eines AR Displays zu weiteren Informationsarten wie Warnungen oder Fahrerassistenzsystemen (Quer- und Längsführung, Kapitel 3). Erste Erkenntnisse liegen außerdem im Bereich des automatisierten Fahrens vor. So könnten AR-Informationen eingesetzt werden, um automatisierte Fahrfunktionen transparent für den Nutzer zu gestalten und um Nutzervertrauen zu erhöhen (de Oliveira Faria et al., 2021; Kunze et al., 2018; Sawitzky et al., 2019). Dies kann besonders für Erstnutzer von großem Vorteil sein. Hier ist jedoch weitere Forschung notwendig.

Zusammengefasst werden kann, dass AR-Informationen Potential für den Individualverkehr im Bereich des manuellen Fahrens bieten. Besonders das Navigieren in uneindeutigen Navigationssituationen stellt ein attraktives Anwendungsgebiet dieser Technologie dar. Die Ergebnisse der vorliegenden Dissertation zeigen, dass AR-Informationen leicht und intuitiv von Fahrenden verstanden werden können. Im Vergleich zu einem HUD, schienen die Fahrenden mit AR-Informationen über mehr freie Ressourcen zu verfügen. Mit AR-Informationen konnten sich die Fahrenden frühzeitiger für die richtige Zielabiegung in uneindeutigen Navigationssituationen entscheiden und zeigten eine verbesserte Orientierung. Dies kann zu einem gesteigerten Fahrerlebnis führen. Es wird angenommen, dass AR-Informationen durch die intuitive Informationsdarstellung und leichte Erlernbarkeit Potential für die Mensch-Maschine-Interaktion in weiteren Anwendungsfällen bieten. Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Dissertation dienen der Weiterentwicklung der AR-basierten Mensch-Maschine-Interaktion, um das größtmögliche Potential von AR auszuschöpfen.

Literaturverzeichnis

- Abdi, L., & Meddeb, A. (2017). In-vehicle augmented reality system to provide driving safety information. *Journal of Visualization*, 21(1), 163-184.
- Ablaßmeier, M. (2009). *Multimodales, kontextadaptives Informationsmanagement im Automobil* (Dissertation). Technische Universität München.
- Abramovich, G. (o. D.). *5 innovative Beispiele für Augmented Reality in der Praxis*. Adobe Experience Cloud. Abgerufen am 8. Februar 2021, von <https://business.adobe.com/de/resources/5-realworld-examples-of-augmented-reality-innovation.html>
- Augmented Reality Head-up-Display*. (2021, 14. April). Audi MediaCenter. Abgerufen am 18. Januar 2022, von <https://www.audi-mediacycenter.com/de/elektro-suvs-im-premium-kompaktsegment-der-audi-q4-e-tron-und-der-q4-sportback-e-tron-13887/augmented-reality-head-up-display-13897>
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6 (4), 355-385.
- Azuma, R. T., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent Advances in Augmented Reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21 (6), 34-47.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Hrsg.), *Psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (8. Aufl., S. 47-89). Academic press New York.
- Barr, D. J., Levy, R., Scheepers, C., & Tily, H. J. (2013). Random effects structure for confirmatory hypothesis testing: Keep it maximal. *Journal of memory and language*, 68(3), 255-278.
- Bauerfeind, K., Drüke, J., Bendewald, L., & Baumann, M. (2019). When does the driver benefit from AR-information in a navigation task compared to a Head-Up Display? Results of a driving simulator study. In D. de Waard, K. Brookhuis, D. Coelho, S. Fairclough, D. Manzey, A. Naumann, L. Onnasch, S. Röttger, A. Toffetti, and R. Wiczorek (Hrsg.) (2019). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2018 Annual Conference* (S. 219-230). ISSN 2333-4959 (online). Abgerufen von <https://www.hfes-europe.org/wp-content/uploads/2018/10/Bauerfeind2018.pdf>
- Bauerfeind, K., Drüke, J., Bendewald, L., & Baumann, M. (2022). How does navigating with Augmented Reality information affect drivers' glance behaviour in terms of attention allocation? *Front. Virtual Real.* 3:930117. doi: 10.3389/frvir.2022.930117. Abgerufen von <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frvir.2022.930117/full>
- Bauerfeind, K., Drüke, J., Schneider, J., Haar, A., Bendewald, L., & Baumann, M. (2021). Navigating with Augmented Reality – How does it affect drivers' mental load?. *Applied Ergonomics*, 94, 103398. Abgerufen von <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103398>

- Bengler, K., Götze, M., Pfannmüller, L., & Zaindl, A. (2015). To See or not to See - Innovative Display Technologies as Enablers for Ergonomic Cockpit Concepts. Ergonomic requirements, future mobility, future functionality. In *Proceedings of the electronic displays Conference*.
- Bergmeier, U. (2009). *Kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem. Entwicklung und experimentelle Absicherung* (Dissertation), Technische Universität München.
- Birbaumer, N., & Schmidt, R. F. (2007). Das visuelle System. *Biologische Psychologie* (S. 375-414). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Blanca, M. J., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R., & Bendayan, R. (2017). Non-normal data: Is ANOVA still a valid option? *Psicothema*, 29(4), 552–557. doi:10.7334/psicothema2016.383
- Bossi, L. L., Ward, N. J., Parkes, A. M., & Howarth, P. A. (1997). The effect of vision enhancement systems on driver peripheral visual performance. In Y. I. Noy (Hrsg.), *Ergonomics and safety of intelligent driver interfaces* (S. 239-260). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Boston, B. N., & Braun, C. C. (1996). Clutter and display conformality: Changes in Cognitive Capture. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 40(2), 57–61. <https://doi.org/10.1177/154193129604000211>
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. Oxford: Pergamon Press.
- Bubb, H. (1975). *Untersuchungen über die Anzeige des Bremsweges im Fahrzeug* (Dissertation). Technische Universität München.
- de Oliveira Faria, N., Merenda, C., Greatbatch, R., Tanous, K., Suga, C., Akash, K., Misu, T., & Gabbard, J. (2021). The Effect of Augmented Reality Cues on Glance Behavior and Driver-Initiated Takeover on SAE Level 2 Automated-Driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 65, No. 1, S. 1342-1346). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Deutsches Institut für Normung (2018). *Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 1: Allgemeine Aspekte und Konzepte und Begriffe*. (DIN EN ISO 10075-1:2018-01). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Dikablis glasses 3. (2018, 9. April). Ergoneers GmbH. Abgerufen am 22. Februar 2021, von https://www.ergoneers.com/wp-content/uploads/2018/04/Marketing-Datenblatt-Dikablis-Glasses-3-20180409_final.pdf
- Donges, E. (1982). Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 27(2), 183-190.
- Endsley, M. R. (1988). Design and evaluation for situation awareness enhancement. In *Proceedings of the Human Factors Society annual meeting* (Vol. 32, No. 2, pp. 97-101). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications.
- Ergoneers GmbH. (2022a). *D-LAB* (3.4) [Software]. <https://www.ergoneers.com/>
- Ergoneers GmbH. (2022b). *D-LAB* (3.5) [Software]. <https://www.ergoneers.com/>

- Ethical Principles of Psychologists and Code of Conduct*. (2017, 1. Januar). American Psychological Association. Abgerufen am 23. Januar 2022, von <https://www.apa.org/ethics/code>
- Evans, K. K., Horowitz, T. S., Howe, P., Pedersini, R., Reijnen, E., Pinto, Y., Kuzmova, Y., Wolfe, J. M. (2011). Visual attention. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Cognitive Science*, 2(5), 503–514. <https://doi.org/10.1002/wcs.127>
- Eyraud, R., Zibetti, E., & Baccino, T. (2015). Allocation of visual attention while driving with simulated augmented reality. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 32, 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.04.011>
- Field, A. (2009). *Discovering Statistics using SPSS*, Third Edition. London: SAGE Publications Ltd.
- Flehmer, F. (2020). *Einfluss einer Augmented Reality Navigationsanzeige auf den Fahrer in einer Realfahrt: Blickverhalten, Navigationsleistung, subjektives Erleben* (unveröffentlichte Masterarbeit). Technische Universität Chemnitz.
- Gabbard, J. L., Fitch, G. M., & Kim, H. (2014). Behind the glass: Driver challenges and opportunities for AR automotive applications. *Proceedings of the IEEE*, 102(2), 124–136. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2294642>
- Garrett, H. E. (1922). *A study of the relation of accuracy to speed* (8. Aufl.). Columbia university.
- Gish, K. W., & Staplin, L. (1995). *Human Factors Aspects of Using Head Up Displays in Automobiles: A Review of the Literature* (Report No. DOT HS 808 320). Washington D.C.: National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transportation.
- Goldstein, E. B. (2008). *Wahrnehmungspsychologie. Der Grundkurs* (7. Aufl.). Berlin Heidelberg: Spektrum, Akad. Verlag.
- Grant, B. S., Kiefer, R. J., & Wierwille, W. W. (1995). Drivers' detection and identification of head-up versus head-down telltale warnings in automobiles. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 39(17), 1087–1091. <https://doi.org/10.1177/154193129503901705>
- Heitz, R. P. (2014). The speed-accuracy tradeoff: history, physiology, methodology, and behavior. *Frontiers in neuroscience*, 8, 150.
- Heller, O. (1982). Theorie und Praxis des Verfahrens der Kategorieunterteilung (KU). In O. Heller (Hrsg.), *Forschungsbericht 1981* (S. 1-15). Würzburg, Germany: Department of Psychology.
- Hexagon AB. (2021a). *Virtual Test Drive* (2.0.3) [Software]. <https://www.mssoftware.com/de/virtual-test-drive>
- Hexagon AB. (2021b). *Virtual Test Drive* (2.1) [Software]. <https://www.mssoftware.com/de/virtual-test-drive>
- Hills, B. L. (1980). Vision, Visibility, and Perception in Driving. *Perception*, 9 (2), 183–216.

- Horrey, W. J., Alexander, A. L., & Wickens, C. D. (2003). Does workload modulate the effects of In-vehicle display location on concurrent driving and side task performance? In *Driving Simulation Conference North America Proceedings*.
- Israel, B. (2012). *Potenziale eines kontaktanalogen Head-up Displays für den Serieneinsatz* (Dissertation). Technische Universität München.
- Jachens, A., Zühlsdorf, M., Kern, T. A., & Abel, H. (2017). Augmented Reality Head-Up Display. System Requirements and Solutions Concerning Precise Augmentation of Information within the Road Scene. In *ELIV - Electronic in Vehicles* (S. 581–592). Bonn.
- Jahn, G., Oehme, A., Krems, J. F., & Gelau, C. (2005). Peripheral detection as a workload measure in driving: Effects of traffic complexity and route guidance system use in a driving study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(3), 255-275.
- Janczura, S. (2021, 8. Januar). *Weltneuheit bei AR-Technologie: Ärzten gelingt Unglaubliches im OP*. Ingenieur.de. Abgerufen am 20. April 2022, von <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/medizin/3d-technik-und-augmented-reality-fuehren-zu-weltneuheit-im-op-saal/>
- Jansen, A. (2018). *Augmented Reality in der Fahrzeugnavigation* (Dissertation). Technische Universität München.
- Jarmasz, J., Herdman, C. M., & Johannsdottir, K. R. (2005). Object-Based Attention and Cognitive Tunneling. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 11(1), 3–12. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.11.1.3>
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort* (Prentice-Hall series in experimental psychology). Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Kansteiner, N. (2014, 1. Juli). *ARCHIVES: JULY 2014*. Ergoneers GmbH. Abgerufen am 22. Februar 2021, von <https://www.ergoneers.com/en/2014/07/>
- Kiefer, R. J. (1991). Effect of a Head-Up versus Head-Down digital speedometer on visual sampling behavior and speed control performance during daytime automobile driving. SAE Technical Paper 910111.
- Kim, H., & Gabbard, J. L. (2019). Assessing distraction potential of Augmented Reality Head-Up Displays for vehicle drivers. *Human Factors*, 28, 18720819844845. <https://doi.org/10.1177/0018720819844845>
- Kim, H., Isleib, J. D., & Gabbard, J. L. (2016). Virtual shadow: Making cross traffic dynamics visible through augmented reality head up display. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 60, No. 1, S. 2093-2097). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Kim, H., Wu, X., Gabbard, J. L., & Polys, N. F. (2013). Exploring head-up augmented reality interfaces for crash warning systems. In J. Terken (Hrsg.), *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (S. 224–227). New York, NY: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2516540.2516566>

-
- Kim, S., & Dey, A. K. (2009). Simulated Augmented Reality Windshield Display as a Cognitive Mapping Aid for Elder Driver Navigation. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 133-142). New York, NY: ACM. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518724>
- Knoll, P. (2015). Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme. In H. Winner (Hrsg.), *ATZ/MTZ Fachbuch. Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (S. 659–673). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3_36
- Kunze, A., Summerskill, S. J., Marshall, R., & Filtness, A. J. (2018). Augmented reality displays for communicating uncertainty information in automated driving. In *Proceedings of the 10th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications, AutomotiveUI 2018*, ACM, Toronto, Canada (S. 164-175). <https://doi.org/10.1145/3239060.3239074>
- Liu, Y.-C., & Wen, M.-H. (2004). Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): Driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61(5), 679–697. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.06.002>
- Lutz, M. (im Erscheinen). *Kompensation der Fahrzeugaufbaubewegung für Augmented Reality Head-up-Displays* (eingereichte Dissertation), Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Max Planck Institute for Psycholinguistics. (2022). *ELAN* (5.5) [Software]. <https://archive.mpi.nl/tla/elan>
- Medenica, Z., Kun, A. L., Paek, T., & Palinko, O. (2011). Augmented reality vs. street views: a driving simulator study comparing two emerging navigation aids. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services* (S. 265-274). ACM. <https://doi.org/10.1145/2037373.2037414>
- Merenda, C., Kim, H., Tanous, K., Gabbard, J. L., Feichtl, B., Misu, T., & Suga, C. (2018). Augmented reality interface design approaches for goal-directed and stimulus driven driving tasks. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 24(11), 2875-2885.
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1994). Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Proceedings of SPIE: Vol. 2351. Telem manipulator and Telepresence Technologies* (Bd. 2351, S. 282-292).
- Milicic, N. (2010). *Sichere und ergonomische Nutzung von Head-Up Displays im Fahrzeug* (Dissertation). Technische Universität München.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63(2), 81.
- Mocker, D. (2015, 20. Oktober). *Autofahrer unterschätzen Distanzen massiv*. Spektrum.de. Abgerufen am 18. Januar 2022, von <https://www.spektrum.de/news/autofahrer-unterschaetzen-distanzen-massiv/1371957>

- Newman, R. L. (1995). *Head-up displays: Designing the way ahead*. Aldershot, England: Ashgate.
- Ng-Thow-Hing, V., Bark, K., Beckwith, L., Tran, C., Bhandari, R., & Sridhar, S. (2013). User-centered perspectives for automotive augmented reality. In *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (S. 13-22).
- Noll, M. (o. D.). *Augmented Reality (AR) für medizinische Interventionen*. Fraunhofer IGD. Abgerufen am 14. April 2022, von <https://www.igd.fraunhofer.de/projekte/augmented-reality-ar-fuer-medizinische-interventionen>
- Norman, D., & Bobrow, D. (1975). On data-limited and resource-limited processing. *Cognitive Psychology*, 7, 44-60.
- Pauzić, A. (2008). A method to assess the driver mental workload: The driving activity load index (DALI). *IET Intelligent Transport Systems*, 2(4), 315. <https://doi.org/10.1049/iet-its:20080023>
- Pauzie, A. (2015). Head Up Display in Automotive: A new reality for the driver. In A. Marcus (Hrsg.), *Design, User experience, and Usability: Interactive Experience Design. Lecture notes in Computer Science* (S. 505–516). Cham: Springer.
- Pfannmüller, L. (2017). *Anzeigekonzepte für ein kontaktnologes Head-up Display* (Dissertation), Technische Universität München.
- Pfannmüller, L., Kramer, M., Senner, B., & Bengler, K. (2015a). A comparison of display concepts for a navigation system in an automotive contact analog head up display. *Procedia Manufacturing*, 3, 2722-2729. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.678>
- Pfannmüller, L., Walter, M., & Bengler, K. (2015b). Lead me the right way?! The impact of position accuracy of augmented reality navigation arrows in a contact analog head-up display on driving performance, workload, and usability. In G. Lindgaard & D. Moore (Hrsg.), *Proceedings of the 19th Triennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA) 2015*. Abgerufen von www.iea2015.org
- Prinzel, L. J., & Risser, M. (2004). *Head-Up Displays and Attention Capture* (Report NASA/TM-2004-21300). Hampton, Virginia: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-13* (3), 257-266.
- Rasmussen, J. (1985). The role of hierarchical knowledge representation in decisionmaking and system management. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 15(2), 234-243.
- Rock, I., Linnett, C. M., Grant, P., & Mack, A. (1992). Perception without attention: Results of a new method. *Cognitive Psychology*, 24(4), 502–534. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90017-V](https://doi.org/10.1016/0010-0285(92)90017-V)
- Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 38, 193 - 200.

-
- Rusch, M. L., Schall, M. C., Gavin, P., Lee, J. D., Dawson, J. D., Vecera, S., & Rizzo, M. (2013). Directing driver attention with augmented reality cues. *Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 16, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2012.08.007>
- Sadovitch, V. (2020). *Fehlertolerante Anzeigengestaltung für Augmented Reality Head-up Displays: Bewertung und Kompensation von Registrierungsfehlern im automobilen Kontext* (Dissertation). Technische Universität Berlin.
- Sandbrink, J. (2019). *Gestaltungspotenziale für Infotainment-Darstellungen im Fahrzeug* (Dissertation). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Sawitzky, T., Wintersberger, P., Riener, A., & Gabbard, J. L. (2019). Increasing trust in fully automated driving: route indication on an augmented reality head-up display. In *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Pervasive Displays, PerDis 2019* (S. 1-7). <https://doi.org/10.1145/3321335.3324947>.
- Schart, D. & Tschanz, N. (2016, 1. September). *Mittendrin statt nur dabei: Das Potenzial von Augmented Reality im Journalismus*. Fachjournalist. Abgerufen am 8. April 2022, von <https://www.fachjournalist.de/mittendrin-statt-nur-dabei-das-potenzial-von-augmented-reality-im-journalismus/>
- Schmider, E., Ziegler, M., Danay, E., Beyer, L., & Bühner, M. (2010). Is It Really Robust? *Methodology*, 6(4), 147–151. doi:10.1027/1614-2241/a000016
- Schneid, M. (2009). *Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug* (Dissertation). Technische Universität München.
- Schneider, M., Bruder, A., Necker, M., Schluesener, T., Henze, N., & Wolff, C. (2019). A real-world driving experiment to collect expert knowledge for the design of AR HUD navigation that covers less. In *Proceedings of the Mensch und Computer 2019 Workshop on Automotive HMIs: UI Research in the Age of New Digital Realities*. <https://doi.org/10.18420/muc2019-ws-610>
- Schrepp, M., Hinderks, A., & Thomaschewski, J. (2017). Design and evaluation of a short version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 4(6), 103. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2017.09.001>
- Sedlmeier, P., & Renkewitz, F. (2008). *Forschungsmethoden und Statistik in der Psychologie*. München: Pearson Studium.
- Sheridan, T. B., & Stassen, H. G. (1979). Definitions, Models and Measures of Human Workload. In N. Moray (Hrsg.), *Mental Workload: Its theory and measurement* (8. Aufl., S. 219-233). Springer Science & Business Media New York
- Simons, D. J. (2007, 30. April). *Inattention blindness*. Scholarpedia. Abgerufen am 2. Februar 2022, von http://www.scholarpedia.org/article/Inattention_blindness
- The Butterfly Stereo Acuity Test with Lea Symbols®*. (2007). Vision Assessment Corporation. Abgerufen am 2. Februar 2022, von <https://www.ophtalmicdata.com/wp-content/uploads/2015/03/StereoButterflyManual.pdf>

- Theeuwes, J. (2001). The Effects of Road Design on Driving. In P.-E. Barjonet (Hrsg.), *Traffic Psychology Today* (S. 241-263). Boston, MA: Springer US.
- Tönnis, M. (2006). Time-critical supportive augmented reality-issues on cognitive capture and perceptual tunnelling. In *The Fifth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Santa Barbara, CA, USA*.
- Tönnis, M. (2008). *Towards Automotive Augmented Reality* (Dissertation). Technische Universität München.
- Tufano, D. R. (1997). Automotive HUDs: The Overlooked Safety Issues. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39(2), 303–311. <https://doi.org/10.1518/001872097778543840>
- Van der Laan, J. D., Heino, A., & De Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 5(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(96\)00025-3](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(96)00025-3)
- Vollrath, M., & Schießl, C. (2004). Belastung und Beanspruchung im Fahrzeug Anforderungen an Fahrerassistenz. In *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme VDI-Berichte*, 1864. VDI Verlag GmbH. ISBN 3-18-091864-0.
- Von der Luxusklasse ins Kompaktsegment: Das Augmented-Reality-Head-Up-Display.* (2020, 17. Dezember). Volkswagen Newsroom. Abgerufen am 18. Januar 2022, von <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/von-der-luxusklasse-ins-kompaktsegment-das-augmented-reality-head-up-display-6730>
- Wang, Y., Wu, Y., Chen, C., Wu, B., Ma, S., Wang, D., Li, H., & Yang, Z. (2021). Inattentive Blindness in Augmented Reality Head-Up Display-Assisted Driving. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 1-14.
- Weihrauch, M., Melony, G. G., & Goesch, T. C. (1989). *The first head up display introduced by General Motors* (SAE Technical Paper No. 890228). Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical issues in ergonomics science*, 3(2), 159-177.
- Wickens, C. D., Helleberg, J., Goh, J., Xu, X., & Horrey, W. J. (2001). Pilot task management: Testing an attentional expected value model of visual scanning. Technical Report No. ARL-01-14/NASA-01-7, Kalifornien USA.
- Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). Introduction to Engineering Psychology and Human Performance. In C. D. Wickens, & J. G. Hollands (Hrsg.), *Engineering Psychology and Human Performance* (3. Aufl., S. 1-16). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S., & Parasuraman, R. (2016). Introduction to Engineering Psychology and Human Performance. In C. D. Wickens, J. G. Hollands, S. Banbury, & R. Parasuraman (Hrsg.), *Engineering Psychology and Human Performance* (4. Aufl., S. 1-7). London & New York: Routledge.

Wickens, C.D., Pringle, H.L., & Merlo, J. (1999). *Integration of Information Sources of Varying Weights: The Effect of Display Features and Attention Cueing*. (Technical Report ARL-99-2/FEDLAB-99-1). Savoy, IL: University of Illinois, Aviation Research Laboratory.

Wie Daimler die S-Klasse zum digitalen Wohnzimmer macht. (2020, 9. Juli). Intellicar.de. Abgerufen am 4. Januar 2021, von <https://intellicar.de/markets/meet-the-s-class-digital/>

Woodworth, R. S. (1899). Accuracy of voluntary movement. *The Psychological Review: Monograph Supplements*, 3(3), 1–114.

Befinden Pre

Anhand der folgenden Fragen möchten wir Ihre persönliche Meinung zum **aktuellen Befinden** festhalten.

Die abgebildeten Skalen sind in zwei Stufen zu verstehen. Wählen Sie bitte bei jeder Frage zunächst eine der Hauptkategorien, (z.B. „sehr wenig“ ... „sehr stark“) und kreuzen Sie dann eine der drei dazugehörigen Unterkategorien (-, 0, +) an, wobei das „-“ zur links angrenzenden und das „+“ zur rechts angrenzenden Hauptkategorie tendiert. Kreuzen Sie bitte diejenige Unterkategorie an, die am ehesten beschreibt, wie Ihr aktuelles Befinden ist.

Für die Auswertung ist es sehr wichtig, dass Sie ehrlich antworten und keine Frage auslassen.

1. Wie stark ist **im Moment** Ihre **Anspannung**, wie sind Sie z.B. angespannt, nervös, unsicher, gereizt, erregt, empfindlich, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Wie stark sind Sie **im Moment aktiv**, wie sind Sie z.B. unternehmungslustig, energisch, tatkräftig, frisch, wach, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

3. Wie stark ist **im Moment** Ihre **positive Stimmung**, wie sind Sie z.B. gut drauf, heiter, fröhlich, gut gelaunt, lustig, unbeschwert usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

4. Wie groß ist **im Moment** Ihre **Leistungsfähigkeit**, wie sind Sie z.B. konzentriert, effektiv, kraftvoll, aufmerksam, eifrig usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

5. Wie stark sind Sie **im Moment nach außen gerichtet**, wie sind Sie z.B. gesprächig, gesellig, kontaktfreudig, offen für andere, selbstsicher, wollen auf andere zugehen usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

(Abdruck des Fragebogens „Befinden Pre“ mit Genehmigung des Autors, Prof. Dr. M. Vollrath.)

Befragung zur Anzeige

[Jeweils für das AR Display und das HUD]

Es folgt nun die Bewertung der **Navigationsfahrt**.

Auf den nachfolgenden Seiten interessiert uns Ihre Meinung zu der **Fahrt im Allgemeinen, der Nebenaufgabe** und der **Anzeige**. Die Anzeige werden Sie hinsichtlich **Nutzen, Funktionalität** und **Gestaltung** bewerten. Zudem geht es um Ihre **persönliche Meinung** gegenüber der Anzeige.

Bewertung der Fahrt

Nun geht es um die **Bewertung der Fahraufgabe**, die sich aus der Navigationsaufgabe und der Nebenaufgabe zusammensetzt. Bitte beantworten Sie dafür die nachfolgenden Fragen.

1. Wie **anstrengend** empfanden Sie die **Fahraufgabe (Navigationsaufgabe + Nebenaufgabe) insgesamt**?

Sehr wenig anstrengend			Wenig anstrengend			Mittel			Stark anstrengend			Sehr stark anstrengend		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Wie **schwierig** empfanden Sie die **Fahraufgabe insgesamt**?

Sehr leicht			leicht			Mittel			schwierig			Sehr schwierig		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Bewertung der Nebenaufgabe

Nun geht es um die **Bewertung der Nebenaufgabe**. Bitte beantworten Sie dafür die nachfolgenden Fragen.

1. Wie **schwierig** empfanden Sie die **Nebenaufgabe in der Fahrt**?

Sehr leicht			Leicht			Mittel			Schwierig			Sehr schwierig		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Wie **anstrengend** empfanden Sie das Fahren mit der **Nebenaufgabe während der Fahrt**?

Sehr wenig anstrengend			Wenig anstrengend			Mittel			Stark anstrengend			Sehr stark anstrengend		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Bewertung der Anzeige

Nun geht es um die **Bewertung der Anzeige**. Dazu werden Ihnen auf den folgenden Seiten Fragen hinsichtlich des **Nutzens**, der **Funktionalität** sowie der **Gestaltung** gestellt. Zudem geht es um Ihre **persönliche Meinung** gegenüber der Anzeige.

1. Wie **gut** hat Ihnen die Anzeige während der Fahrten **allgemein gefallen**?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Was war **positiv**?

3. Was war **negativ**?

Bewertung des Nutzens

Nun geht es um die **Bewertung des Nutzens der Anzeige**. Bitte beantworten Sie dafür die nachfolgenden Fragen.

4. Wie **gut eignet** sich die Anzeige insgesamt, um die Navigationsaufgabe zu erfüllen?

Sehr schlecht geeignet			Schlecht geeignet			Mittel			Gut geeignet			Sehr gut geeignet		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

5. Was war **positiv**?

6. Was war **negativ**?

7. Wie **stark** hat Sie die Anzeige **abgelenkt**?

Sehr wenig abgelenkt			Wenig abgelenkt			Mittel			Stark abgelenkt			Sehr stark abgelenkt		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

8. Wenn ja, woran hat das gelegen?

9. Wie stark wurden Sie durch die Anzeige **entlastet**?

Sehr wenig entlastet			Wenig entlastet			Mittel			Stark entlastet			Sehr stark entlastet		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

10. Wie **nützlich** fanden Sie die Anzeige während der **Fahrt insgesamt**?

Sehr wenig nützlich			Wenig nützlich			Mittel			Nützlich			Sehr nützlich		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Funktionalität

Nun geht es um die **Funktionalität** der Anzeige.

Im Fragebogen für das AR Display: Funktionalität bedeutet, dass ein vorausschauendes Fahren möglich ist UND dass die dargestellten Informationen positionsgenau in der Umwelt verortet sind.

Im Fragebogen für das HUD: Funktionalität bedeutet, dass ein vorausschauendes Fahren möglich ist.

Bitte bewerten Sie wie gut diese Funktion umgesetzt wurde.

11. Wie **verständlich** war die Anzeige für Sie in der Navigationssituation?

Sehr wenig verständlich			Wenig verständlich			Mittel			Verständlich			Sehr verständlich		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

12. Empfinden Sie die Balkenanzeige als hilfreich? *[für das HUD]* Bzw.

Hätten Sie sich eine Art Balkenanzeige/Meterangabe gewünscht? *[für das AR Display]*

Bewertung der Gestaltung

Nun geht es um die **Gestaltung** der Anzeige. Bitte beantworten Sie dafür die nachfolgenden Fragen.

13. Wie **gut** hat Ihnen die **Gestaltung** der Anzeige **insgesamt** gefallen?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

14. Warum?

Persönliche Meinung

Nun geht es um Ihre persönliche Meinung zu der Anzeige. Bitte beantworten Sie dafür die nachfolgenden Fragen.

15. Wie **angenehm** ist es, mit der Anzeige zu fahren?

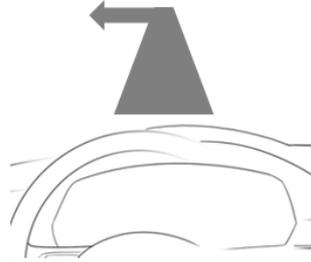
Sehr unangenehm			Unangenehm			Mittel			Angenehm			Sehr angenehm		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Abschlussbefragung

1. Welche Anzeige **wünschen** Sie sich in **Ihrem Auto**?



Klassisches Head-Up Display



Augmented Reality Head-Up Display

Keine

Befinden Post

Abschließend möchten wir Ihre persönliche Meinung zum **aktuellen Befinden** festhalten.

1. Wie stark ist **im Moment** Ihre **Anspannung**, wie sind Sie z.B. angespannt, nervös, unsicher, gereizt, erregt, empfindlich, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Wie stark sind Sie **im Moment aktiv**, wie sind Sie z.B. unternehmungslustig, energisch, tatkräftig, frisch, wach, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

3. Wie stark ist **im Moment** Ihre **positive Stimmung**, wie sind Sie z.B. gut drauf, heiter, fröhlich, gut gelaunt, lustig, unbeschwert usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

4. Wie groß ist im Moment Ihre **Leistungsfähigkeit**, wie sind Sie z.B. konzentriert, effektiv, kraftvoll, aufmerksam, eifrig usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

5. Wie stark sind Sie **im Moment nach außen gerichtet**, wie sind Sie z.B. gesprächig, gesellig, kontaktfreudig, offen für andere, selbstsicher, wollen auf andere zugehen usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

(Abdruck des Fragebogens „Befinden Post“ mit Genehmigung des Autors, Prof. Dr. M. Vollrath.)

Befinden Pre

Anhand der folgenden Fragen möchten wir Ihre persönliche Meinung zum **aktuellen Befinden** festhalten.

Die abgebildeten Skalen sind in zwei Stufen zu verstehen. Wählen Sie bitte bei jeder Frage zunächst eine der Hauptkategorien, (z.B. „sehr wenig“ ... „sehr stark“) und kreuzen Sie dann eine der drei dazugehörigen Unterkategorien (-, 0, +) an, wobei das „-“ zur links angrenzenden und das „+“ zur rechts angrenzenden Hauptkategorie tendiert. Kreuzen Sie bitte diejenige Unterkategorie an, die am ehesten beschreibt, wie Ihr aktuelles Befinden ist.

Für die Auswertung ist es sehr wichtig, dass Sie ehrlich antworten und keine Frage auslassen.

1. Wie stark ist **im Moment** Ihre **Anspannung**, wie sind Sie z.B. angespannt, nervös, unsicher, gereizt, erregt, empfindlich, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Wie stark sind Sie **im Moment aktiv**, wie sind Sie z.B. unternehmungslustig, energisch, tatkräftig, frisch, wach, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

3. Wie stark ist **im Moment** Ihre **positive Stimmung**, wie sind Sie z.B. gut drauf, heiter, fröhlich, gut gelaunt, lustig, unbeschwert usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

4. Wie groß ist im Moment Ihre **Leistungsfähigkeit**, wie sind Sie z.B. konzentriert, effektiv, kraftvoll, aufmerksam, eifrig usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

5. Wie stark sind Sie **im Moment nach außen gerichtet**, wie sind Sie z.B. gesprächig, gesellig, kontaktfreudig, offen für andere, selbstsicher, wollen auf andere zugehen usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

(Abdruck des Fragebogens „Befinden Pre“ mit Genehmigung des Autors, Prof. Dr. M. Vollrath.)

Befragung zur Anzeige

[Jeweils für das AR Display und das HUD – nach den jeweiligen Fahrten in der niedrigen und der hohen Verkehrskomplexität]

Es folgt nun die Bewertung der **letzten beiden Fahrten ohne die beiden letzten Abbiegesituationen**.

Auf den nachfolgenden Seiten interessiert uns Ihre Meinung zu der **Fahrt im Allgemeinen**, der **Nebenaufgabe** und der **Anzeige**. Die Anzeige werden Sie hinsichtlich **Nutzen, Funktionalität** und **Gestaltung** bewerten.

Bewertung der Fahrt

1. Wie **schwierig** empfanden Sie die Fahraufgabe (Navigationsaufgabe + Nebenaufgabe) in **beiden Fahrten** insgesamt mit der Anzeige?

Sehr leicht			Leicht			Mittel			Schwer			Sehr schwer		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Wie **angenehm** ist es, mit der Anzeige zu fahren?

Sehr unangenehm			Unangenehm			Mittel			Angenehm			Sehr angenehm		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Die letzten beiden Fahrten unterschieden sich in der Verkehrskomplexität (Anzahl fahrende und parkende Fahrzeuge)

3. Empfanden Sie die **Verkehrskomplexität** in den beiden letzten Fahrten als **unterschiedlich stark**?

Ja Nein

4. Welche Fahrt hatte die stärkere Verkehrskomplexität?

1 2

Bewertung der Nebenaufgabe

5. Wie **anstrengend** empfanden Sie das Fahren mit der **Nebenaufgabe während der Fahrt**?

Sehr wenig anstrengend			Wenig anstrengend			Mittel			Stark anstrengend			Sehr stark anstrengend		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Bewertung der Anzeige

6. Wie **gut** hat Ihnen die Anzeige während der Fahrten **allgemein gefallen**?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

7. Was war positiv?

8. Was war negativ?

Bewertung des Nutzens

9. Wie **gut eignet** sich die Anzeige insgesamt, um die Navigationsaufgabe zu erfüllen?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

10. Wie **stark** hat Sie die Anzeige **vom Straßengeschehen abgelenkt**?

Sehr wenig abgelenkt			Wenig abgelenkt			Mittel			Stark abgelenkt			Sehr stark abgelenkt		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

11. Wenn ja, woran hat das gelegen?

12. Wie stark wurden Sie durch die Anzeige im Vergleich zu einem Navigationsgerät (z.B. TomTom) **entlastet**?

Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

13. Wie **nützlich** fanden Sie die Anzeige während der **zwei Fahrten insgesamt**?

Sehr wenig nützlich			wenig nützlich			Mittel			Nützlich			Sehr nützlich		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Funktionalität

Nun geht es um die **Funktionalität** der Anzeige.

Im Fragebogen für das AR Display: Funktionalität bedeutet, dass ein vorausschauendes Fahren möglich ist UND dass die dargestellten Informationen im direkten Bezug zur Umwelt eingebettet werden.

Im Fragebogen für das HUD: Funktionalität bedeutet, dass ein vorausschauendes Fahren möglich ist.

Bitte bewerten Sie wie gut diese Funktion umgesetzt wurde.

14. Wie **verständlich** wird die Zielabbiegung durch die Anzeige **angezeigt**?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Bewertung der Gestaltung

15. Wie **gut** hat Ihnen die **Gestaltung** der Anzeige **insgesamt** gefallen?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

16. Wie **gut** hat Ihnen die **Sichtbarkeit** der Anzeige gefallen?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

17. Wie **gut** hat Ihnen die **Positionierung** der Anzeige im Blickfeld gefallen?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

18. Anmerkung Positionierung:

19. Wie **gut** hat Ihnen die **Größe** der Anzeige gefallen?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

20. Anmerkung Größe:

21. Wie **gut** hat Ihnen die **Transparenz** der Anzeige gefallen?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

22. Anmerkung Transparenz:

23. Haben Sie noch weitere Anmerkungen zur Anzeige? / Eine Abschlussbewertung /
Abschlussstatement?

Bewertung der letzten Abbiegesituation

[Nach jeder Fahrt:

AR Display & niedrige Verkehrskomplexität,

AR Display & hohe Verkehrskomplexität,

HUD & niedrige Verkehrskomplexität,

HUD & hohe Verkehrskomplexität]

Es folgt nun die Bewertung der **letzten Abbiegesituation**.

Auf den nachfolgenden Seiten interessiert uns Ihre Meinung zu der letzten Abbiegesituation im **Allgemeinen**, zum **Nutzen** der Anzeige sowie zur **Funktionalität** der Anzeige.

1. Wie **schwierig** empfanden Sie die **letzte Abbiegesituation** mit Verkehr und der Anzeige?

Sehr leicht			Leicht			Mittel			Schwer			Sehr schwer		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Bitte erläutern Sie Ihre Bewertung.

3. Wie **stark** haben Sie den **Gegenverkehr** in der letzten Kreuzung **beachtet**?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
-1	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

4. Wie **leicht** ist Ihnen diese **Entscheidung** (vor/hinter dem dunklen Fahrzeug abzubiegen) gefallen?

Sehr leicht			Leicht			Mittel			Schwer			Sehr schwer		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

5. Bitte erläutern.

6. Wie stark hat Sie die **Nebenaufgabe** beim Suchen der letzten Abbiegung **beansprucht**?

Sehr wenig beansprucht			Wenig beansprucht			Mittel			Stark beansprucht			Sehr stark beansprucht		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Bewertung der Anzeige in der letzten Abbiegesituation

Bewertung des Nutzens

7. Wie **hilfreich** war die Anzeige in der letzten Abbiegesituation?

Sehr wenig hilfreich			Wenig hilfreich			Mittel			hilfreich			Sehr hilfreich		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

8. Wie stark hat Sie die Anzeige **vom Straßengeschehen abgelenkt**?

Sehr wenig abgelenkt			Wenig abgelenkt			Mittel			Stark abgelenkt			Sehr stark abgelenkt		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

9. Bitte erläutern.

10. Wie stark hat Sie die **Überlagerung** der AR-Anzeige über andere Verkehrsteilnehmer **gestört**?

[ausschließlich für das AR Display]

Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

11. Wie stark wurden Sie durch die Anzeige in der letzten Abbiegesituation **entlastet**?

Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

12. Wie **nützlich** fanden Sie die Anzeige in der letzten Abbiegesituation **insgesamt**?

Sehr wenig nützlich			wenig nützlich			Mittel			Nützlich			Sehr nützlich		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Funktionalität

Nun geht es um die **Funktionalität** der Anzeige.

Im Fragebogen für das AR Display: Funktionalität bedeutet, dass ein vorausschauendes Fahren möglich ist UND dass die dargestellten Informationen im direkten Bezug zur Umwelt eingebettet werden.

Im Fragebogen für das HUD: Funktionalität bedeutet, dass ein vorausschauendes Fahren möglich ist.

Bitte bewerten Sie wie gut diese Funktion umgesetzt wurde.

13. Wie **verständlich** wird die Zielabbiegung durch die Anzeige **angezeigt**?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

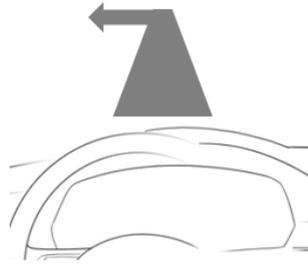
14. Bitte erläutern.

Abschlussbefragung

1. Welche Anzeige **wünschen** Sie sich in **Ihrem Auto**?



1. Klassisches Head-Up Display



2. Augmented Reality Head-Up Display

3. Keine

Befinden Post

Abschließend möchten wir Ihre persönliche Meinung zum **aktuellen Befinden** festhalten.

1. Wie stark ist **im Moment** Ihre **Anspannung**, wie sind Sie z.B. angespannt, nervös, unsicher, gereizt, erregt, empfindlich, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Wie stark sind Sie **im Moment aktiv**, wie sind Sie z.B. unternehmungslustig, energisch, tatkräftig, frisch, wach, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

3. Wie stark ist **im Moment** Ihre **positive Stimmung**, wie sind Sie z.B. gut drauf, heiter, fröhlich, gut gelaunt, lustig, unbeschwert usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

4. Wie groß ist im Moment Ihre **Leistungsfähigkeit**, wie sind Sie z.B. konzentriert, effektiv, kraftvoll, aufmerksam, eifrig usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

5. Wie stark sind Sie **im Moment nach außen gerichtet**, wie sind Sie z.B. gesprächig, gesellig, kontaktfreudig, offen für andere, selbstsicher, wollen auf andere zugehen usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

(Abdruck des Fragebogens „Befinden Post“ mit Genehmigung des Autors, Prof. Dr. M. Vollrath.)

Befinden Pre

Anhand der folgenden Fragen möchten wir Ihre persönliche Meinung zum **aktuellen Befinden** festhalten.

Die abgebildeten Skalen sind in zwei Stufen zu verstehen. Wählen Sie bitte bei jeder Frage zunächst eine der Hauptkategorien, (z.B. „sehr wenig“ ... „sehr stark“) und kreuzen Sie dann eine der drei dazugehörigen Unterkategorien (-, 0, +) an, wobei das „-“ zur links angrenzenden und das „+“ zur rechts angrenzenden Hauptkategorie tendiert. Kreuzen Sie bitte diejenige Unterkategorie an, die am ehesten beschreibt, wie Ihr aktuelles Befinden ist.

Für die Auswertung ist es sehr wichtig, dass Sie ehrlich antworten und keine Frage auslassen.

1. Wie stark ist **im Moment** Ihre **Anspannung**, wie sind Sie z.B. angespannt, nervös, unsicher, gereizt, erregt, empfindlich, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Wie stark sind Sie **im Moment aktiv**, wie sind Sie z.B. unternehmungslustig, energisch, tatkräftig, frisch, wach, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

3. Wie stark ist **im Moment** Ihre **positive Stimmung**, wie sind Sie z.B. gut drauf, heiter, fröhlich, gut gelaunt, lustig, unbeschwert usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

4. Wie groß ist im Moment Ihre **Leistungsfähigkeit**, wie sind Sie z.B. konzentriert, effektiv, kraftvoll, aufmerksam, eifrig usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

5. Wie stark sind Sie **im Moment nach außen gerichtet**, wie sind Sie z.B. gesprächig, gesellig, kontaktfreudig, offen für andere, selbstsicher, wollen auf andere zugehen usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

(Abdruck des Fragebogens „Befinden Pre“ mit Genehmigung des Autors, Prof. Dr. M. Vollrath.)

Befragung zur Anzeige

[Jeweils für das AR Display und das HUD]

Es folgt nun die Bewertung der **Navigationsfahrt**.

Auf den nachfolgenden Seiten interessiert uns Ihre Meinung zu der **Fahrt im Allgemeinen**, der **Nebenaufgabe** und der **Anzeige**. Die Anzeige werden Sie hinsichtlich **Nutzen, Funktionalität** und **Gestaltung** bewerten. Zudem geht es um Ihre **Einstellung** gegenüber der Anzeige.

Bewertung der Fahrt

1. Wie **schwierig** empfanden Sie die **Fahraufgabe (Navigationsaufgabe + Nebenaufgabe) insgesamt** mit der Anzeige?

Sehr schwer			Schwer			Mittel			Leicht			Sehr Leicht		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Wie **angenehm** ist es, mit der Anzeige zu fahren?

Sehr unangenehm			Unangenehm			Mittel			Angenehm			Sehr angenehm		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

3. Wie **leicht** empfanden Sie das Handling des Golf R? [für das AR Display]
Wie **leicht** empfanden Sie das Handling des Touaregs? [für das HUD]

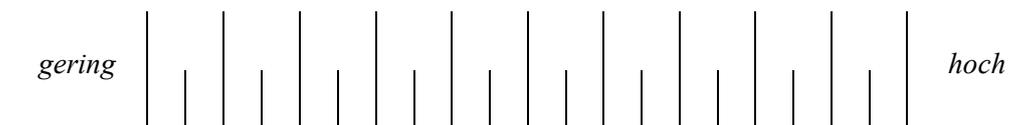
Sehr schwer			Schwer			Mittel			Leicht			Sehr leicht		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Beanspruchung der Fahrt

Im Folgenden sehen Sie eine Reihe von aufgabenbezogenen Faktoren. Bitte markieren Sie auf der Linie, wie stark Sie das Navigieren bei gleichzeitiger Bearbeitung der Nebenaufgabe beansprucht hat.

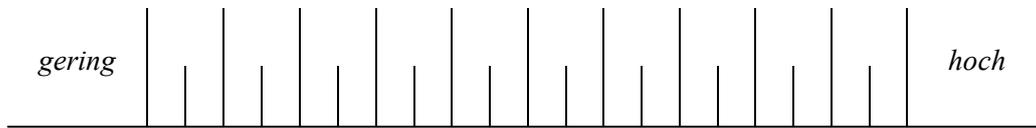
Anforderung an die gesamte Aufmerksamkeit:

Aufmerksamkeit, die während der Fahrt nötig war, um das Navigieren bei gleichzeitiger Bearbeitung der Nebenaufgabe auszuführen (z.B. nachdenken, entscheiden, auswählen, hinsehen...)

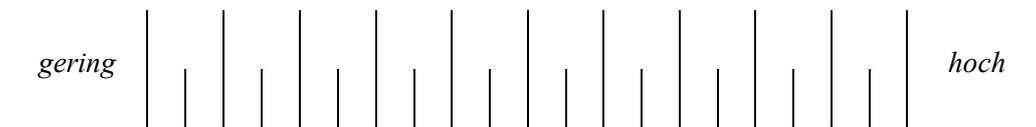


Anforderungen an die visuelle Aufmerksamkeit:

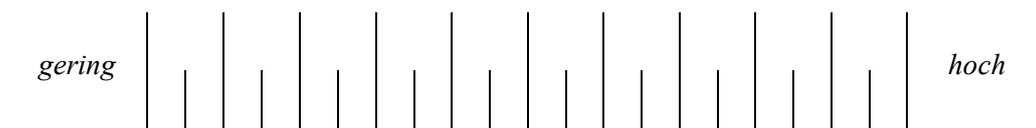
Visuelle Anforderung, die während der Fahrt nötig war, um das Navigieren bei gleichzeitiger Bearbeitung der Nebenaufgabe auszuführen.

**Auditive Anforderung:**

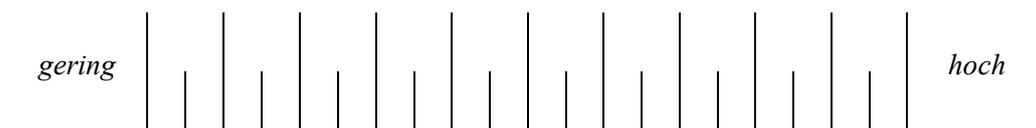
Auditive Anforderung, die während der Fahrt nötig war, um das Navigieren bei gleichzeitiger Bearbeitung der Nebenaufgabe auszuführen.

**Zeitliche Anforderung:**

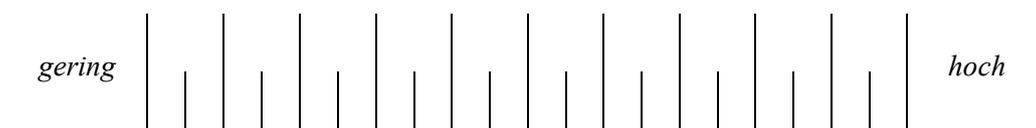
Zeitlicher Druck, der während der Fahrt vorlag, um das Navigieren bei gleichzeitiger Bearbeitung der Nebenaufgabe auszuführen.

**Beeinträchtigung der Fahraufgabe:**

Störung bei der Navigation und deren Auswirkungen auf die Navigationsleistung aufgrund der Nebenaufgabe.

**Stress:**

Stressempfinden während der Fahrt und des Navigierens bei gleichzeitiger Bearbeitung der Nebenaufgabe (z.B. Müdigkeit, Unsicherheit, Irritation, Entmutigung).



(Eigene Übersetzung des Fragebogens „Driver Activity Load Index (DALI)“ nach Pauzié, 2008)

Bewertung der Nebenaufgabe

Nun geht es um die **Bewertung der Nebenaufgabe**. Bitte beantworten Sie dafür die nachfolgenden Fragen.

1. Wie **anstrengend** empfanden Sie das Fahren mit der **Nebenaufgabe während der Fahrt**?

Sehr wenig anstrengend			Wenig anstrengend			Mittel			Stark anstrengend			Sehr stark anstrengend		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Wie **stark** hat Sie die **Nebenaufgabe** beim Fahren **abgelenkt**?

Sehr wenig abgelenkt			Wenig abgelenkt			Mittel			Stark abgelenkt			Sehr stark abgelenkt		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

3. Wie **stark** hat Sie die **Nebenaufgabe** bei der Navigation beansprucht (z.B. bei Abbiegungen)?

Sehr wenig beansprucht			Wenig beansprucht			Mittel			Stark beansprucht			Sehr stark beansprucht		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Bewertung der Anzeige

Nun geht es um die **Bewertung der Anzeige**. Dazu werden Ihnen auf den folgenden Seiten Fragen hinsichtlich des **Nutzens**, der **Funktionalität** sowie der **Gestaltung** gestellt. Zudem geht es um Ihre Einstellungen gegenüber der Anzeige.

1. Wie **gut** hat Ihnen die Anzeige während der Fahrten **allgemein gefallen**?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Was war positiv?

3. Was war negativ?

4. Wie **stark** hat die Anzeige Ihre **Aufmerksamkeit** auf sich **gezogen**?

Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

5. Mögliche Erläuterung:

6. Wie **schwierig** empfanden Sie die **Navigation** insgesamt mit der Anzeige?

Sehr schwer			Schwer			Mittel			Leicht			Sehr leicht		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

7. Mögliche Erläuterung:

8. Wie **leicht** war es, die Abbiegung mit der Anzeige zu finden?

Sehr schwer			Schwer			Mittel			Leicht			Sehr leicht		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Bewertung des Nutzens

Nun geht es um die **Bewertung des Nutzens der Anzeige**. Bitte beantworten Sie dafür die nachfolgenden Fragen.

9. Wie **gut eignet** sich die Anzeige insgesamt, um die Navigationsaufgabe zu erfüllen?

Sehr schlecht geeignet			Schlecht geeignet			Mittel			Gut geeignet			Sehr gut geeignet		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

10. Wie **stark** hat Sie die Anzeige **vom Straßengeschehen abgelenkt**?

Sehr wenig abgelenkt			Wenig abgelenkt			Mittel			Stark abgelenkt			Sehr stark abgelenkt		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

11. Wenn ja, woran hat das gelegen?

12. Wie stark hat Sie die **Überlagerung** der Anzeige über andere Verkehrsteilnehmer **gestört**?
[ausschließlich für das AR Display]

Sehr wenig gestört			Wenig gestört			Mittel			Stark gestört			Sehr stark gestört		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

13. Wie stark wurden Sie durch die Anzeige im Vergleich zu einem Navigationsgerät (z.B. TomTom) **entlastet**?

Sehr wenig entlastet			Wenig entlastet			Mittel			Stark entlastet			Sehr stark entlastet		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

14. Wie **nützlich** fanden Sie die Anzeige während der **Fahrt insgesamt**?

Sehr wenig nützlich			Wenig nützlich			Mittel			Nützlich			Sehr nützlich		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Funktionalität

Nun geht es um die **Funktionalität** der Anzeige.

Im Fragebogen für das AR Display: Funktionalität bedeutet, dass ein vorausschauendes Fahren möglich ist UND dass die dargestellten Informationen im direkten Bezug zur Umwelt eingebettet werden.

Im Fragebogen für das HUD: Funktionalität bedeutet, dass ein vorausschauendes Fahren möglich ist.

Bitte bewerten Sie wie gut diese Funktion umgesetzt wurde.

15. Wie **verständlich** wurde die Abbiegung durch die Anzeige **angezeigt**?

Sehr schlecht verständlich			Schlecht verständlich			Mittel			Gut verständlich			Sehr gut verständlich		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

16. Mögliche Erläuterung:

Bewertung der Gestaltung

Nun geht es um die **Gestaltung** der Anzeige. Bitte beantworten Sie dafür die nachfolgenden Fragen.

17. Wie **gut** hat Ihnen die **Gestaltung** der Anzeige **insgesamt** gefallen?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

18. Wie **gut** hat Ihnen die **Positionierung** der Anzeige im Blickfeld gefallen?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Mögliche Erläuterung:

19. Wie **gut** hat Ihnen die **Größe** der Anzeige gefallen?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

20. Mögliche Erläuterung:

21. Wie **gut** hat Ihnen die **Transparenz** der Anzeige gefallen?

Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

22. Mögliche Erläuterung:

Einstellungen

Nun geht es um Ihre **Einstellungen** gegenüber der erlebten Anzeige.

Lesen Sie jedes Wortpaar und kennzeichnen Sie jeweils mit einem Kreuz pro Zeile, welchem Wort Sie eher zustimmen.

behindernd	<input type="checkbox"/>	unterstützend
kompliziert	<input type="checkbox"/>	einfach
ineffizient	<input type="checkbox"/>	effizient
verwirrend	<input type="checkbox"/>	übersichtlich
langweilig	<input type="checkbox"/>	spannend
uninteressant	<input type="checkbox"/>	interessant
konventionell	<input type="checkbox"/>	originell
herkömmlich	<input type="checkbox"/>	neuartig

(Abdruck der deutschen Version des Fragebogens „User Experience Questionnaire short version (UEQ-S)“ von Schrepp et al. (2017), mit Genehmigung der Autoren 2022.)

nützlich	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nutzlos
angenehm	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	unangenehm
schlecht	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	gut
nett	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nervig
effizient	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	unnötig
ärgerlich	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	erfreulich
hilfreich	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	wertlos
nicht wünschenswert	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	wünschenswert
aktivierend	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	einschläfernd

(Abdruck der deutschen Version des Fragebogens zur Akzeptanzbewertung von Van der Laan et al. (1997), mit Genehmigung der Autoren 2022.)

23. Haben Sie noch weitere Anmerkungen zur Anzeige? / Eine Abschlussbewertung /
Abschlussstatement?

Abschlussbefragung

1. Welche Anzeige **wünschen** Sie sich in **Ihrem Auto**?



(Flehmer, 2020, mit Genehmigung der Autorin)



(Flehmer, 2020, mit Genehmigung der Autorin)

A. Klassisches Head-Up Display

B. Augmented Reality Head-Up Display

C. Keine

2. Mit welchen Veränderungen? Was wünschen Sie sich z.B. zusätzlich/weniger an Informationen?

3. Wie **eindeutig** empfanden Sie die folgenden Situationen, unabhängig von der Anzeige:

Situation A:



(Flehmer, 2020, mit Genehmigung der Autorin)

Sehr wenig eindeutig			Wenig eindeutig			Mittel			Stark eindeutig			Sehr stark eindeutig		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Situation B:

(Flehmer, 2020, mit Genehmigung der Autorin)

Sehr wenig eindeutig			Wenig eindeutig			Mittel			Stark eindeutig			Sehr stark eindeutig		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Befinden Post

Abschließend möchten wir Ihre persönliche Meinung zum **aktuellen Befinden** festhalten.

1. Wie stark ist **im Moment** Ihre **Anspannung**, wie sind Sie z.B. angespannt, nervös, unsicher, gereizt, erregt, empfindlich, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

2. Wie stark sind Sie **im Moment aktiv**, wie sind Sie z.B. unternehmungslustig, energisch, tatkräftig, frisch, wach, usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

3. Wie stark ist **im Moment** Ihre **positive Stimmung**, wie sind Sie z.B. gut drauf, heiter, fröhlich, gut gelaunt, lustig, unbeschwert usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

4. Wie groß ist im Moment Ihre **Leistungsfähigkeit**, wie sind Sie z.B. konzentriert, effektiv, kraftvoll, aufmerksam, eifrig usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

5. Wie stark sind Sie **im Moment nach außen gerichtet**, wie sind Sie z.B. gesprächig, gesellig, kontaktfreudig, offen für andere, selbstsicher, wollen auf andere zugehen usw.?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

(Abdruck des Fragebogens „Befinden Post“ mit Genehmigung des Autors, Prof. Dr. M. Vollrath; Abdruck des Fragebogens der 3. Studie mit Genehmigung der Co-Autorin des Fragebogens, F. Flehmer.)

Farbtest

Bitte nennen Sie die Zahlen in den jeweiligen Feldern.

Abbildungen aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

Lebenslauf

Der Lebenslauf wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.

Veröffentlichungsliste

Bauerfeind, K., Stephan, A., Hartwich, F., Othersen, I., Hinzmann, S., & Bendewald, L. (2018). Analysis of potentials of an HMI-concept concerning conditional automated driving for system-inexperienced vs. system-experienced users. In D. de Waard, F. Di Nocera, D. Coelho, J. Edworthy, K. Brookhuis, F. Ferlazzo, T. Franke, and A. Toffetti (Eds.) (2018). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2017 Annual Conference* (S. 67-77). ISSN 2333-4959 (online). Abgerufen von <https://www.hfes-europe.org/wp-content/uploads/2017/10/Bauerfeind2017.pdf>

Bauerfeind, K., Drüke, J., Bendewald, L., & Baumann, M. (2019). When does the driver benefit from AR-information in a navigation task compared to a Head-Up Display? Results of a driving simulator study. In D. de Waard, K. Brookhuis, D. Coelho, S. Fairclough, D. Manzey, A. Naumann, L. Onnasch, S. Röttger, A. Toffetti, and R. Wiczorek (Eds.) (2019). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2018 Annual Conference* (S. 219-230). ISSN 2333-4959 (online). Online-Vorveröffentlichung. Abgerufen von <https://www.hfes-europe.org/wp-content/uploads/2018/10/Bauerfeind2018.pdf>

Lassmann, P., Othersen, I., Fischer, M. S., Reichelt, F., Jenke, M., Tüzün, G.-J., **Bauerfeind, K.,** Mührmann, L., & Maier, T. (2020). Driver's Experience and Mode Awareness in between and during Transitions of different Levels of Car Automation. In D. de Waard, A. Toffetti, L. Pietrantonio, T. Franke, J-F. Petiot, C. Dumas, A. Botzer, L. Onnasch, I. Milleville, and F. Mars (2020). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2019 Annual Conference* (S. 121-133). ISSN 2333-4959 (online). Abgerufen von <https://www.hfes-europe.org/wp-content/uploads/2019/10/Lassmann2019.pdf>

Bauerfeind, K., Drüke, J., Schneider, J., Haar, A., Bendewald, L., & Baumann, M. (2021). Navigating with Augmented Reality – How does it affect drivers' mental load?. *Applied Ergonomics*, 94, 103398. Online-Vorveröffentlichung. Abgerufen von <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103398>

Bauerfeind, K., Drüke, J., Bendewald, L., & Baumann, M. (2022). How does navigating with Augmented Reality information affect drivers' glance behaviour in terms of attention allocation? *Front. Virtual Real.* 3:930117. doi: 10.3389/frvir.2022.930117. Online-Vorveröffentlichung. Abgerufen von <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frvir.2022.930117/full>