

---

# Wahrnehmung von Augmented Reality Head-up Displays

---

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

angenommene  
DISSERTATION

von  
M. Sc. Daniel Wagner

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2022  
Hauptreferent: Professor Dr. rer. nat. Ulrich Lemmer  
Korreferent: Professor Dr. rer. nat. Alois Herkommmer



*Cum hoc ergo propter hoc.*



# **Danksagung**

Die vorliegende Dissertation wurde von April 2018 bis Dezember 2022 an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Kooperation mit der Mercedes-Benz AG angefertigt. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Unterstützerinnen und Unterstützern sowie Mitwirkenden der letzten Jahre bedanken.

Allen voran möchte ich Prof. Dr. Ulrich Lemmer für die Betreuung meiner Promotion als Doktorvater und Hauptreferent bedanken. Vor allem in der finalen Phase der Promotion hat mir Uli die nötigen Leitplanken gesetzt und war mir damit eine große Stütze. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. Alois Herkommmer für seine Rolle als Korreferent sowie Prof. Dr. Michael Heizmann für die Leitung des Prüfungsvorsitzes.

Ein großer Dank geht außerdem an meine Kollegen von Mercedes-Benz, die mich, während meiner Doktorandenzeit u. auch bei der anschließenden parallelen Fertigstellung der Dissertation nach dem Berufseinstieg, allzeit unterstützt haben. Danke an meine Vorgesetzten Elvira, Daniel, Volker, Achim und Gunter für euer Vertrauen und die freie Handhabe in der Gestaltung der Dissertation. Danke an meine Betreuer und (Mit-)Studenten Stefan, Hans, Kosta, Florian, Oliver und Matthias für die leidenschaftlichen technischen Diskussionen, euer Mitwirken, sowie die Nacht- und Wochenendschichten mit mir oder für mich. Danke an meine Kolleginnen und Kollegen Moni, Bernd, Manfred, Stathi, Jürgen, Johannes und Markus für euer offenes Ohr bei Fragen oder Zweifeln und vor allem den unzähligen Lebensweisheiten. Die Zusammenarbeit mit euch hat mir viel Freude bereitet. Eure Hilfsbereitschaft hat diese Arbeit erst möglich gemacht und wird für mich immer ein Teil dieser prägenden Zeit bleiben. Ich bin froh, dass ich nicht nur Kollegen, sondern auch Freunde finden konnte. Bitte verzeiht, dass diese Auflistung nicht vollständig ist bzw. überhaupt sein kann.

Abschließend danke ich meiner Familie und meinen Freunden. Insbesondere möchte ich mich bei meinen Eltern, Helga und Hans, bedanken – Ihr standet und steht mir mit eurer fortdauernder Unterstützung in allen Lebenslagen (und bei meinen unzähligen Umzügen) immer zur Seite und habt mir so viel ermöglicht. Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin Charlotte – ich danke dir für deine Geduld mit mir und deine motivierenden Ansprachen vor allem während der aufregenden Endphase dieser Promotion.



# Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Inhaltsverzeichnis	V
Zusammenfassung	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIX
<b>1. Hinführung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1. Problemstellung.....	3
1.2. Zielsetzung & Forschungsfragen .....	6
1.3. Aufgabenstellung .....	8
<b>2. Theoretische Grundlagen</b>	<b>11</b>
2.1. Die menschliche visuelle Wahrnehmung .....	11
2.1.1. Die Anatomie und Funktion des Auges.....	12
2.1.2. Akkommodation .....	13
2.1.3. Stereoskopisches Sehen und Tiefenwahrnehmung.....	14
2.2. Eigenschaften des Lichts .....	19
2.2.1. Licht als Strahl & Licht als Welle .....	19
2.2.2. Polarisation des Lichts.....	19
2.2.3. Reflektion und Brechung des Lichts .....	21
2.3. Das optische System Head-up Display .....	22
2.3.1. Windschutzscheibe .....	25
2.3.2. Projektor .....	30
2.3.3. HUD Prüfstand .....	31
2.4. Abbildungsfehler im virtuellen Bild eines AR HUD .....	36
2.4.1. Globale Abbildungsfehler.....	39
2.4.2. Lokale Abbildungsfehler .....	44
2.4.3. Stereoskopische Abbildungsfehler .....	48
2.4.4. Dynamische Abbildungsfehler .....	49
<b>3. Stand der Technik</b>	<b>57</b>
3.1. Allgemeine Diskussion zum Einsatz von Head-up Displays .....	58
3.2. Anforderungen an das User Interface eines Head-up Display .....	61
3.2.1. Anzeigeninhalte eines Head-up Displays .....	61
3.2.2. Anzeigekonzept eines Head-up Displays .....	63
3.3. Technische Betrachtung von Head-up Displays .....	67
3.3.1. Holografisches Head-up Display.....	68
3.3.2. P-polarisiertes Head-up Display .....	70
3.4. Abbildungsfehler eines Augmented Reality Head-up Displays.....	71
3.5. Zusammenfassung und offene Forschungsthemen .....	73

<b>4.</b>	<b>Einfluss der Windschutzscheibe auf die subjektive Wahrnehmung eines AR HUD</b>	<b>75</b>
4.1.	Vorgehensweise & Studienprämissen .....	77
4.2.	Studiendesign .....	80
4.2.1.	Versuchsträger .....	81
4.2.2.	Auswahl der Versuchsobjekte (Windschutzscheiben) und Aufstellen der Untersuchungshypothesen.....	96
4.2.3.	Auswahl der Versuchssubjekte (Proband:innen).....	105
4.2.4.	Erstellung der Testbilder und des Fragebogens.....	108
4.2.5.	Aufbau und Ablauf der Studien.....	117
4.3.	Ergebnisse .....	127
4.3.1.	Allgemeine Ergebnisse .....	127
4.3.2.	Analyse der Störfaktoren .....	139
4.3.3.	Analyse der subjektiven Bewertung unterschiedlicher Windschutzscheiben.....	147
4.3.4.	Korrelationsanalyse zwischen subjektiver Bewertung und Image Quality Numbers .....	163
4.4.	Analyse der Topographie von Testbildern .....	169
4.5.	Diskussion und Zusammenfassung der Studienergebnisse .....	181
<b>5.</b>	<b>Proof of Concept: P-polarisiertes Head-up Display</b>	<b>197</b>
5.1.	Technisches Konzept eines p-polarisierten HUD .....	201
5.1.1.	P-polarisierte Reflektion an der Windschutzscheibe .....	204
5.1.2.	Herausforderungen der Integration einer optisch reflektierenden Schicht in den Windschutzscheibenverbund .....	206
5.1.3.	Weitere Konzeptideen .....	210
5.2.	Analyse potentieller Doppelbildfehler eines p-polarisierten HUD Systems.....	213
5.2.1.	Änderung der linearen Lichtpolarisation durch den HUD Projektor ....	213
5.2.2.	Abweichung vom Brewster-Winkel für Licht an der Windschutzscheibe	216
5.2.3.	Ansätze zur Reduktion des Doppelbildfehlers .....	217
5.3.	Studie zum Leuchtdichteverhältnis des Doppelbildes im p-polarisierten Head-up Display .....	224
5.3.1.	Vorgehensweise und Studienprämissen .....	225
5.3.2.	Studiendesign.....	227
5.3.3.	Ergebnisse.....	238
5.3.4.	Minimal zulässiges Leuchtdichteverhältnis <i>LPLS</i> .....	258
5.4.	Diskussion und Zusammenfassung .....	261
<b>6.</b>	<b>Ausblick</b>	<b>267</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>XIV</b>
<b>Anhang</b>		<b>XXVI</b>
<b>Lebenslauf</b>		

## Zusammenfassung

Das Head-up Display (HUD) nimmt in Fahrzeugen eine steigend wichtige Rolle ein, da es als passives Fahrsicherheitssystem Fahrer:innen durch die Bereitstellung relevanter Informationen bei der primären Fahraufgabe eines PKW unterstützt. Dessen grundsätzlicher Mehrwert konnte bereits in einer Vielzahl von Studien nachgewiesen werden (siehe Abschnitt 3.1). Aus diesem Grund ist es essentiell Fahrer:innen das virtuelle Bild eines HUD leicht zugänglich zu machen. Kriterien hierfür sind eine gute Bildqualität ohne störende Abbildungsfehler sowie die generelle Sichtbarkeit in möglichst allen Fahrsituationen. Die vorliegende Dissertation untersucht zum einen die in einem Augmented Reality Head-up Display (AR HUD) entstehenden Abbildungsfehler in dessen virtuellem Bild sowie die subjektive Wahrnehmung dieser Abbildungsfehler durch Fahrer:innen. In einer zweiten Schwerpunktuntersuchung erfolgt die ausführliche Konzeptprüfung eines p-polarisierten HUD, um eine Verbesserung der Sichtbarkeit des virtuellen Bildes beim Tragen einer polarisierenden Sonnenbrille zu erreichen.

Das AR HUD zeichnet sich durch eine große Abdeckung des direkten Sichtbereichs der Fahrer:in aus ( $\text{FOV } 10^\circ \times 5^\circ$ ), wobei virtuelle Bildinhalte kontaktanalog in der Umwelt positioniert werden. Um Fahrer:innen einen Mehrwert zu bieten, dürfen die Abbildungsfehler des virtuellen Bildes, welche auf Abweichungen in den Geometrien der Windschutzscheibe (WSS) und des HUD Projektors zurückzuführen sind, gewisse Toleranzgrenzwerte nicht übersteigen. Dabei ist die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität eines HUD sehr individuell und nicht trivial anhand weniger Kriterien festzustellen. Daher ist es wichtig messbare Abbildungsfehler zu entwickeln, welche die subjektive Wahrnehmung des virtuellen Bildes wiedergeben (siehe Abschnitt 2.4). Eine Probandenstudie ( $N=54$ ) untersucht unter Verwendung seriennaher Komponenten den Einfluss der WSS auf die Entstehung von Abbildungsfehlern sowie deren subjektive Wahrnehmung durch die Proband:innen. Die Studie zeigt, dass Fahrer:innen vor allem ggü. stereoskopischen Abbildungsfehlern (Divergenzen) in vertikaler Richtung sensibel sind und diese als störend empfinden. Aufgrund der Bildgröße eines AR HUD ist es zudem nicht ausreichend ausschließlich gemittelte Divergenzen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund ist für das AR HUD zukünftig auf die Kontrolle und Einschränkung lokaler Divergenzen zu achten. Während den untersuchten WSS im Rahmen einer Expertenbewertung eindeutige Unterschiede bzgl. deren virtuellen Bildqualität zuzuordnen sind (siehe Abschnitt 4.2.2), ist dies für die Probandenstudie nicht der Fall (siehe

Abschnitt 4.3.3). In der Probandenstudie lassen sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der virtuellen Bildqualität für die verschiedenen WSS feststellen. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Studiendesigns für die Expertenbewertung (*Within-Subjects*) und die Probandenstudie (*Between-Subjects*).

Des Weiteren zeigt die Probandenstudie, dass signifikante Unterschiede für die Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität bei *statischer* und *dynamischer Betrachtung* vorliegen. Außerdem stellen die Proband:innen Qualitätsunterschiede innerhalb des virtuellen Bildes einer WSS fest (siehe Abschnitt 4.3.3). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Homogenität des virtuellen Bildes eines HUD ein Qualitätsmerkmal für Fahrer:innen darstellt, vor allem wenn analog der Realität kein Referenzbild zum Vergleich vorliegt. Schlussendlich zeigt die Probandenstudie, dass die Kombination verschiedener Abbildungsfehler die subjektive Wahrnehmung des virtuellen Bildes am besten wiedergibt (siehe Abschnitt 4.3.4).

Die Untersuchungen in Kapitel 5 zur Konzeptprüfung eines p-polarisierten HUD zeigen im Gegensatz zu den bisher in der Literatur beschrieben Annahmen, dass mit Sicherheit vom Auftreten eines Doppelbildfehlers im virtuellen Bild auszugehen ist (siehe Abschnitt 5.2). Neben der Entwicklung möglicher Maßnahmen zur Reduktion dieses Doppelbildfehlers (siehe Abschnitt 5.2.3), findet im Rahmen einer weiteren Probandenstudie die Ermittlung der Wahrnehmungs- und Störschwelle für den Doppelbildfehler im p-polarisierten HUD System statt (siehe Abschnitt 5.3). Hierfür erfolgt die Einführung des minimal zulässigen Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild eines p-polarisierten HUD Systems. Letztendlich liegt der Wert für das minimal zulässige Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  bei **90** (siehe Abschnitt 5.3.4). Zudem zeigt die Studie, dass sich *Wahrnehmungs-* und *Störschwelle* statistisch signifikant voneinander unterscheiden und auch die *Umgebungshelligkeit* einen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmungs- und Störschwelle nimmt (siehe Abschnitt 5.3.3.3).

## Abkürzungsverzeichnis

ACR.....	<i>Ambient Contrast Ratio</i>
AR .....	<i>Augmented Reality</i>
BR.....	<i>Baureihen</i>
DMD.....	<i>digital micromirror device</i>
DOE.....	<i>Design of Experiments</i>
FOV.....	<i>field of view</i>
HDD .....	<i>Head-down Display</i>
HMB.....	<i>Head-Motion-Box</i>
HSVL .....	<i>High Speed Video Link</i>
HUD .....	<i>Head-up Display</i>
IQN.....	<i>Image Quality Numbers</i>
LCD.....	<i>liquid crystal display</i>
LL.....	<i>Linkslenker</i>
MPC .....	<i>Multi-Purpose-Kamera</i>
MSA .....	<i>Messsystemanalyse</i>
OBD .....	<i>On Board Diagnosis</i>
OTA.....	<i>over the air</i>
PGU.....	<i>picture generating unit</i>
p-pol .....	<i>p-polarisiert</i>
PVB .....	<i>Polyvinylbutyral</i>
RBS .....	<i>Restbussimulation</i>
RL.....	<i>Rechtslenker</i>
RLS.....	<i>Regen-Licht-Sensor</i>
S-pol .....	<i>s- polarisiert</i>
VR .....	<i>Virtual Reality</i>
WSS.....	<i>Windschutzscheibe</i>



# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Virtuelles Bild der Mercedes-Benz E-Klasse (W213) in ca. zwei Metern Entfernung .....	1
Abb. 1.2: Augmented Reality Head-up Display der Mercedes-Benz S-Klasse (W223).....	2
Abb. 2.1: Horizontaler Schnitt durch das Auge [6].....	13
Abb. 2.2: Schematische Darstellung der (a) Fern- und (b) Nah-Akkommodation des Auges über die (a) Entspannung und (b) Kontraktion des Ziliarmuskels und daraus resultierender flacher und gewölbter Linse [6] .....	14
Abb. 2.3: Illustration des sich ändernden Konvergenzwinkels $\theta$ des linken und rechten Auges bei der Fixierung von Bildpunkten in unterschiedlichen Entfernungen [106].....	16
Abb. 2.4: Skizze eines Stereo-Displays, bei welchem dem linken und rechten Auge unterschiedliche Bilder zur Verfügung stehen, um mit Hilfe binokularer Disparität Tiefeninformationen zu vermitteln [106].....	17
Abb. 2.5: Polarisationstypen des Lichts in Abhängigkeit des elektrischen Feldvektors [89] ..	20
Abb. 2.6: Schematische Darstellung der Schwingungsrichtungen für s-, p- und $\theta$ -polarisierte Lichtwellen in Abhängigkeit der Einfallsebene [36] .....	21
Abb. 2.7: Transmission und Reflektion im Brewster-Winkel für p-polarisiertes (a) und s-polarisiertes (b) Licht [89].....	22
Abb. 2.8: Aufbau des HUD Systems.....	23
Abb. 2.9: Begrifflichkeiten des optischen HUD System .....	24
Abb. 2.10: Aufbau einer VSG-WSS .....	25
Abb. 2.11: Explosionszeichnung einer WSS .....	26
Abb. 2.12: Beispiel taktiler Messpunkte für eine AR HUD WSS zur Bestimmung ihrer Formgenauigkeit.....	27
Abb. 2.13: Rohbaumesspunkte zur Bestimmung von Lage und Verbaugenaugkeit der WSS	29
Abb. 2.14: Entwicklungsprüfstand für HUD WSS der Mercedes-Benz AG .....	32
Abb. 2.15: Testbild zur Bewertung der virtuellen Bildqualität eines HUD .....	33
Abb. 2.16: Gewarptes LL-Testbild für die Baureihe W223.....	33
Abb. 2.17: Kamerapositionen und Positionsbenennung für die Aufnahme virtueller Testbilder .....	35
Abb. 2.18: Prinzipdarstellung des vertikalen und horizontalen Ghost.....	40
Abb. 2.19: IQN 1.1 - Mittlere horizontale Bildverschiebung .....	42

Abb. 2.20: IQN 1.4 - Mittlere vertikale Verkippung .....	43
Abb. 2.21: IQN 1.5 - Mittlere horizontale Bildverzeichnung .....	44
Abb. 2.22: IQN 2.1 - Standardabweichung für den horizontalen Versatz von Messpunkten ..	46
Abb. 2.23: IQN 2.4 - Standardabweichung für die vertikale Verkippung von Messpunkten..	47
Abb. 2.24: IQN 2.5 und 2.6 – Maximale horizontale und vertikale Abweichung von Messpunkten.....	47
Abb. 2.25: IQN 3.1 und 3.2 - Mittlere horizontale und vertikale Divergenz .....	49
Abb. 2.26: IQN 4.1 (a) und 4.3 (b) – Maximaler horizontaler Gradient und Steigungsgradient innerhalb des virtuellen Bildes .....	51
Abb. 2.27: IQN 5.1 – Maximaler horizontaler Gradient innerhalb der Eyebox .....	53
Abb. 3.1: Auswahlmöglichkeiten zu Anzeigeninhalten im HUD einer Mercedes-Benz CLA- Klasse .....	64
Abb. 4.1: Schematische Darstellung der Reflektionsfläche auf der WSS für verschiedene HUD Generationen .....	78
Abb. 4.2: Versuchsträger als Teil der Rohkarosse (A- bis B-Säule) der Baureihe W223 .....	81
Abb. 4.3: Einmessung der Rohkarosse in das Fahrzeugkoordinatensystem inkl. Abweichungen in Millimetern.....	82
Abb. 4.4: Abweichungen der Rohkarosse im Bereich der Windschutzscheibenaufnahme in Millimetern.....	83
Abb. 4.5: Abweichungen der Rohkarosse nach Anwendung der Best-Fit Methode in Millimetern.....	84
Abb. 4.6: Abweichungen der Projektoraufnahmepunkte nach Anwendung der Best-Fit Methode in Millimetern.....	84
Abb. 4.7: Anschlagkonzept zur wiederholbaren Positionierung der WSS auf dem Versuchsträger.....	85
Abb. 4.8: Verzerrungsfreies (a) und vorverzerrtes (b) Testbild für das AR HUD der Baureihe W223 zur Kompensation der freiformflächigen Spiegel im HUD System.....	88
Abb. 4.9: Kameramesssystem im Versuchsträger.....	90
Abb. 4.10: Abweichungen des verbauten Kameraträgersystems im Versuchsträger in Millimetern.....	91
Abb. 4.11: Kamerasystem in Messposition (a); Testproband in Fahrerposition und Kamera in Studienposition (b) .....	92
Abb. 4.12: Messsystemanalyse Typ 1 für IQN 3.2 Mittlere vertikale Divergenz.....	94
Abb. 4.13: Finaler Aufbau des Versuchsträgers .....	96

Abb. 4.14: Virtuelles Testbild mit eingezeichneten Quadranten; aufgenommen am HUD Prüfstand.....	100
Abb. 4.15: Übersicht ausgewählter Versuchsobjekte (WSS) inklusive IQN und subjektiver Bewertung .....	104
Abb. 4.16: Fünfstufige Likert Skala zur Bewertung der Aussagen bzgl. der Qualität virtueller Testbilder.....	110
Abb. 4.17: Mercedes-Stern als Testbild (Input) und virtuelles Bild (Output) des Versuchsträgers .....	113
Abb. 4.18: Mercedes-Schriftzug in vier Quadranten als Testbild (Input) und virtuelles Bild (Output) des Versuchsträgers .....	113
Abb. 4.19: Leinwand mit Verkehrssituation vor dem Versuchsträger.....	118
Abb. 4.20: Navigationshilfe des AR HUD - Abbiegepfeil auf der Leinwand aus perspektivischer Sicht der Proband:in.....	118
Abb. 4.21: Skizze des Aufbauplans für die Studie.....	120
Abb. 4.22: Interviewer während der Befragung von Proband:innen im finalen Gesamtaufbau der Studie mit Versuchsträger und Leinwand .....	121
Abb. 4.23: Sicht der Proband:in aus dem Versuchsträger auf das virtuelle Testbild mit vier Rahmeneckpunkten zur Kontrolle der richtigen Sitzposition .....	123
Abb. 4.24: Ablesen der Augposition eines Probanden zum Abgleich mit Kamerapositionen am HUD Prüfstand.....	124
Abb. 4.25: Histogramm zur Verteilung aller Antworten bzgl. der virtuellen Bildqualität nach Punkten.....	128
Abb. 4.26: Balkendiagramm mit der mittleren Punktebewertung je WSS .....	129
Abb. 4.27: Balkendiagramme mit Mittelwerten nach Inhaltskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C .....	130
Abb. 4.28: Balkendiagramme mit Mittelwerten nach Bewertungskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C .....	132
Abb. 4.29: Balkendiagramme mit Mittelwerten nach Inhalts- und Bewertungskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C .....	133
Abb. 4.30: Mercedes-Schriftzug in vier Quadranten als Testbild (Input) und virtuelles Bild (Output) des Versuchsträgers .....	133
Abb. 4.31: Schematische Darstellung der Reflektionsbereiche Q1-Q4 und Z1-Z3 auf der WSS .....	134

Abb. 4.32: Balkendiagramme mit Mittelwerten je Quadrant nach statischer, dynamisch horizontaler und dynamisch vertikaler Kopfposition für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C .....	136
Abb. 4.33: Balkendiagramm mit Mittelwerten je Zeile bei statischer Kopfposition für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C .....	137
Abb. 4.34: Fehlerbalkendiagramm für die Stufen des Störfaktors <i>Alter</i> .....	144
Abb. 4.35: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fischer für die Stufen des Störfaktors <i>Alter</i> .....	145
Abb. 4.36: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des simultanen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey für die Stufen des Störfaktors <i>Alter</i> .....	145
Abb. 4.37: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die Stufen WSS A, WSS B und WSS C der unabhängigen Variable von <i>H1</i> .....	150
Abb. 4.38: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die Stufen Q1, Q2, Q3 und Q4 der unabhängigen Variable von Hypothese <i>H3</i> .....	152
Abb. 4.39: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die Stufen Z1, Z2 und Z3 der unabhängigen Variable von H3.....	154
Abb. 4.40: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die Stufen Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal der unabhängigen Variable von H4.....	157
Abb. 4.41: Head-Motion-Box mit Kamerapositionen des HUD Prüfstands inkl. Abgleich zu den Augpositionen der Proband:innen .....	164
Abb. 4.42: Testbilddaufnahmen vom HUD Prüfstand (links) und Versuchsträger (rechts) von WSS C jeweils aus Kameraposition C3 .....	170
Abb. 4.43: Testbilddaufnahmen vom Versuchsträger aus Kameraposition C3 für WSS A (links), WSS B (mittig) und WSS C (rechts).....	170
Abb. 4.44: Visualisierung der gemessenen Soll- und Ist-Punkten für WSS C in Kameraposition C3 .....	172
Abb. 4.45: Testbilder <i>04_MB_Stern_4</i> und <i>08_MB_Schriftzug_3_vertikal</i> zur Bewertung verschiedener Bildbereiche .....	176
Abb. 5.1: Reflektivität <i>R</i> in Abhängigkeit der Einfallswinkels $\varepsilon$ für s- und p-polarisiertes Licht an der Grenzfläche zwischen Luft und Glas, sowie Markierungen für den Brewster-Winkel und Bereich von Einfallswinkeln für konventionelle HUD Systeme .....	199
Abb. 5.2: Wahrnehmung des virtuellen Bildes mit und ohne polarisierender Sonnenbrille für das s-polarisierte und das p-polarisierte HUD. (a) Konventionelles s-polarisiertes HUD ohne	

polarisierende Sonnenbrille; (b) konventionelles s-polarisiertes HUD mit polarisierender Sonnenbrille; (c) neuartiges p-polarisiertes HUD mit polarisierender Sonnenbrille .....	200
Abb. 5.3: Schematischer Aufbau eines p-polarisierten HUD Systems. Das vom HUD Projektor emittierte p-polarisierte Licht wird an einer speziell für diesen Anwendungsfall ausgelegten optischen Schicht im Windschutzscheibenverbund reflektiert. ....	204
Abb. 5.4: Schematischer Aufbau eines p-polarisierten HUD Systems mit in der WSS integriertem Polymer zur Reflektion p-polarisierten Lichts .....	205
Abb. 5.5: Mercedes-Benz S-Klasse (BR223) mit metallisch beschichteter WSS für vollflächige Heizfunktion.....	207
Abb. 5.6: Reflektion Ambienter Lichtleiter, beleuchteter Luftpüsen und des Zentraldisplays einer.....	208
Abb. 5.7: Welliges sekundäres Bild durch Reflektion an einem metallisch beschichteten Polymer im Windschutzscheibenverbund.....	209
Abb. 5.8: Schematischer Aufbau eines p-polarisierten HUD Systems mit in der WSS integriertem Retarder zur Drehung der Lichtpolarisation um 90° .....	212
Abb. 5.9: Draufsicht (Z-Richtung) eines HUD Gehäuses inkl. TFT, Faltspiegel und asphärischem Spiegel sowie Strahlverlauf.....	214
Abb. 5.10: Anpassung der Polarisationsrichtung von linear polarisiertem Licht über die Änderung der Ausbreitungsebene bei Reflektion an dielektrischen Materialien [41].....	214
Abb. 5.11: Bilder eines TFT LCD (a), Faltspiegels (b) und asphärischen Spiegels eines konventionellen s-polarisierten HUD Projektors zum Feststellung der Polarisationsänderung .....	216
Abb. 5.12: Schematische Darstellung der Polarisationsänderung innerhalb des Projektors (a), sowie Optimierung der p-polarisierten Lichemission durch Einsatz eines Retarder (b). ....	219
Abb. 5.13: Schematische Darstellung entstehender Doppelbilder ohne (oben) und mit (unten) keilwinkliger PVB Folie bei Reflektion an Beschichtung auf Fläche 4. ....	220
Abb. 5.14: Schematische Darstellung entstehender Doppelbilder ohne (oben) und mit (unten) keilwinkliger PVB Folie bei Reflektion an Polymer mittig im Windschutzscheibenverbund. ....	221
Abb. 5.15: Schematische Darstellung entstehender Doppelbilder ohne (oben) und mit (unten) keilwinkliger PVB Folie bei Einsatz eines Retarders mittig im Windschutzscheibenverbund. ....	222
Abb. 5.16: Aufnahme eines virtuellen Bildes mit manipuliertem Doppelbild.....	224

Abb. 5.17: Modifizierte Mercedes-Benz CLS-Klasse zur Anzeige individueller Testbilder unter Verwendung einer (a) Image Box und eines (b) HSVL Scaler.....	228
Abb. 5.18: Testbilder mit manipuliertem Doppelbildfehler - Helligkeiten des sekundären Bildes von .....	230
Abb. 5.19: Mercedes-Benz CLS Klassen (BR257) als Versuchsfahrzeuge vor Start der Studie in heller Umgebung .....	233
Abb. 5.20: Proband während der Studie in dunkler Umgebung mit Sicht auf das virtuelle Bild des HUD .....	234
Abb. 5.21: Aufbau und Erläuterung eines Boxplot Diagramms .....	239
Abb. 5.22: Boxplot der gesamtheitlichen Wahrnehmungs- und Störschwelle für den Doppelbildfehler in Abhängigkeit der Leuchtdichte des sekundären Bildes $L_s$ .....	240
Abb. 5.23: Boxplot der WS und StS getrennt nach dunkler und heller Umgebung.....	241
Abb. 5.24: Boxplot der WS und StS in dunkler Umgebung getrennt nach Iteration 1 und Iteration 2 .....	241
Abb. 5.25: Boxplot der Störschwelle in dunkler Umgebung für Iteration 1 und Iteration 2 .	244
Abb. 5.26: Drittes Quartil der Bewertungen durch die Proband:innen als Schwellenwert für eine subjektive Qualitätskennzahl.....	245
Abb. 5.27: Fehlerbalkendiagramm der Störschwelle für den Störfaktor <i>HUD Erfahrung</i> ...	248
Abb. 5.28: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fischer für die Störschwelle des Störfaktors <i>HUD Erfahrung</i> .....	249
Abb. 5.29: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey für die Störschwelle des Störfaktors <i>HUD Erfahrung</i> .....	249
Abb. 5.30: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die WS_Gesamt und StS_Gesamt der unabhängigen Variable von <i>H5</i> .....	251
Abb. 5.31: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die H_StS und D_StS der unabhängigen Variable von <i>H6</i> .....	253
Abb. 5.32: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die WS_1 und WS_2 der unabhängigen Variable von <i>H7</i> .....	256
Abb. 5.33: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die StS_1 und StS_2 der unabhängigen Variable von <i>H7</i> .....	256
Abb. 5.34: Messaufbau zur Bestimmung der Leuchtdichten für primäres und sekundäres Bild am HUD Prüfstand .....	259
Abb. 5.35: Manipuliertes Testbild mit einer Transparenz von 89 % für das sekundäre Bild. (a) Digitales Testbild und (b) gemessenes Testbild mit Leuchtdichtheitkamera .....	260

Abb. 5.36: Leuchtdichtheitkurven des gemessenen Testbilds mit einer Transparenz des sekundären Bildes von 89 % .....	261
--	-----



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter HUD verschiedener Hersteller (Stand Januar 2022) .....	67
Tabelle 2: Technische Systemdatenübersicht für AR HUD Generation 1 (W223) und HUD Generation 1 (W222).....	77
Tabelle 3: Bewertung der drei ausgewählten Versuchsobjekte (WSS) durch die Expert:innen anhand des erläuterten Bewertungsschemas .....	102
Tabelle 4: Anforderungen, Faktoren und Verteilungsquoten für das Probandenkollektiv ....	108
Tabelle 5: Darstellungs- und Bewertungskategorien für Testbilder und Fragen .....	111
Tabelle 6: Beispiele für Fragen an die Proband:innen, inklusive Kategorisierung der Darstellung und Bewertung, Aufzeigen der Fragetypen A und B, sowie Zuordnung der Fragen zu den IQN .....	113
Tabelle 7: Fragenkatalog – Inklusive Darstellungs- und Bewertungskategorien, Fragetypen A und B, IQN-Zuordnung .....	114
Tabelle 8: Mittelwerte nach Inhaltskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C .....	130
Tabelle 9: Mittelwerte nach Bewertungskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C .....	131
Tabelle 10: Mittelwerte nach Inhalts- und Bewertungskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C .....	132
Tabelle 11: Mittelwerte nach Inhalts- und Bewertungskategorien für die Quadranten und Zeilen aller WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C .....	135
Tabelle 12: Verteilung der Proband:innen nach den Stufen der Faktoren (Auswahlkriterien) der Versuchssubjekte.....	139
Tabelle 13: Mittelwerte nach Stufen der Faktoren für das Probandenkollektiv für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C .....	140
Tabelle 14: Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor <i>Alter</i> .....	144
Tabelle 15: Anzahl Proband:innen je WSS anhand der Faktorstufen für <i>Alter</i> und <i>Sehhilfe</i>	146
Tabelle 16: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H1 .....	149
Tabelle 17: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H3 anhand der Quadrantenbefragung .	151
Tabelle 18: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H3 anhand der Zeilenbefragung .....	153
Tabelle 19: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H4 .....	156

Tabelle 20: Mittelwerte der allgemeinen Fragen für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C .....	159
Tabelle 21: Anzahl der Bewertungen $\leq 3$ Punkte für WSS A, WSS B und WSS C .....	163
Tabelle 22: Prozentuale Abweichung zum Toleranzgrenzwert je IQN für WSS A, WSS B und WSS C .....	165
Tabelle 23: Anzahl der Rankings je WSS .....	166
Tabelle 24: Abweichung zwischen Soll- und Ist-Punkt in horizontaler, vertikaler und vektorieller Richtung für das Testbild von WSS C in Kameraposition C3 .....	171
Tabelle 25: Normalisierte horizontale Abweichung um den Mittelpunkt des virtuellen Bildes für WSS C in Kameraposition C3 .....	173
Tabelle 26: Vertikale Divergenz zwischen den Bildpunkten der virtuellen Bilder der Kamerapositionen L10 und R10 .....	174
Tabelle 27: Vertikale Divergenz zwischen den Bildpunkten der virtuellen Bilder der Kamerapositionen L10 und R10 mit Aufteilung in vier Bildbereiche anhand der Quadrantenbefragung .....	177
Tabelle 28: Vergleich zwischen Kennzahlen und Probandenbewertung für die Bildbereiche (Quadranten) von WSS C.....	178
Tabelle 29: Vertikale Divergenz zwischen den Bildpunkten der virtuellen Bilder der Kamerapositionen L10 und R10 mit Aufteilung in drei Bildbereiche anhand der Zeilenbefragung .....	179
Tabelle 30: Vergleich zwischen Kennzahlen und Probandenbewertung für die Bildbereiche (Zeilen) von WSS C .....	179
Tabelle 31: Ranking der WSS anhand der verschiedenen Untersuchungen .....	190
Tabelle 32: Verteilung der Proband:innen nach den Stufen der Faktoren der Versuchssubjekte .....	246
Tabelle 33: Mittelwerte der Transparenz des sekundären Bildes in % für die Wahrnehmungs- und Störschwelle für die Stufen je Faktor .....	246
Tabelle 34: F- und p-Werte der Störfaktorenanalyse für die Wahrnehmungs- und Störschwelle .....	247
Tabelle 35: Ergebnisse der ANOVA für die Störschwelle des Störfaktors <i>HUD Erfahrung</i>	248
Tabelle 36: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H5 .....	251
Tabelle 37: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H6 .....	253
Tabelle 38: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H7 anhand WS_1 und WS_2 .....	255
Tabelle 39: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H7 anhand StS_1 und StS_2 .....	255

Tabelle 40: Antwortvariablen als Mittelwert je Proband:in inkl. Zuordnung an die Stufe jedes Faktors .....	XLIV
Tabelle 41: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen der Stufen des Störfaktors <i>Alter</i> .....	XLVII
Tabelle 42: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen der Stufen des Störfaktors Alter .....	XLVII
Tabelle 43: Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor <i>Augposition</i> .....	XLIX
Tabelle 44: Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor <i>Geschlecht</i> .....	L
Tabelle 45: Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor <i>Sehhilfe</i> .....	LII
Tabelle 46: Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor <i>HUD Erfahrung</i> .....	LIII
Tabelle 47: Antwortvariablen als Mittelwert je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C .....	LV
Tabelle 48: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C .....	LVI
Tabelle 49: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C .....	LVI
Tabelle 50: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C.....	LVI
Tabelle 51: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C.....	LVII
Tabelle 52: Antwortvariablen als Mittelwert je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4 sowie der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3 .....	LVIII
Tabelle 53: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4 ..	LIX
Tabelle 54: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4.....	LIX
Tabelle 55: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4 .....	LX
Tabelle 56: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4 .....	LX
Tabelle 57: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3.....	LXII

Tabelle 58: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3 .....	LXII
Tabelle 59: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3 .....	LXIII
Tabelle 60: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3 .....	LXIV
Tabelle 61: Antwortvariablen als Mittelwert je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal .....	LXIV
Tabelle 62: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal.....	LXV
Tabelle 63: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal .....	LXVI
Tabelle 64: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal.....	LXVII
Tabelle 65: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal .....	LXVII
Tabelle 66: Antwortvariablen für die Wahrnehmungsschwelle je Proband:in inkl. Iteration 1 und Iteration 2 .....	LXIX
Tabelle 67: Antwortvariablen für die Störschwelle je Proband:in inkl. Iteration 1 und Iteration 2 .....	LXX
Tabelle 68: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Störschwelle der Stufen des Störfaktors <i>HUD Erfahrung</i> .....	LXXII
Tabelle 69: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Störschwelle der Stufen des Störfaktors <i>HUD Erfahrung</i> .....	LXXIII
Tabelle 70: Antwortvariablen je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable: <i>WS_Gesamt und StS_Gesamt</i> .....	LXXIV
Tabelle 71: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: <i>WS_Gesamt und StS_Gesamt</i> .....	LXXV
Tabelle 72: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: <i>WS_Gesamt und StS_Gesamt</i> .....	LXXV
Tabelle 73: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: <i>WS_Gesamt und StS_Gesamt</i> .....	LXXVI
Tabelle 74: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: <i>WS_Gesamt und StS_Gesamt</i> .....	LXXVII

Tabelle 75: Antwortvariablen je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable: <i>H_StS und D_StS</i> .....	LXXVII
Tabelle 76: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: <i>H_StS und D_StS</i> .....	LXXVIII
Tabelle 77: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: <i>H_StS und D_StS</i> .....	LXXIX
Tabelle 78: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: <i>H_StS und D_StS</i> .....	LXXIX
Tabelle 79: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: <i>H_StS und D_StS</i> .....	LXXX
Tabelle 80: Antwortvariablen je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable: <i>WS_1, WS_2, StS_1 und StS_2</i> .....	LXXX
Tabelle 81: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: <i>WS_1 und WS_2</i> .....	LXXXII
Tabelle 82: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: <i>WS_1 und WS_2</i> .....	LXXXII
Tabelle 83: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: <i>StS_1 und StS_2</i> .....	LXXXII
Tabelle 84: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: <i>StS_1 und StS_2</i> .....	LXXXII
Tabelle 85: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: <i>WS_1 und WS_2</i> .....	LXXXIII
Tabelle 86: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: <i>StS_1 und StS_2</i> .....	LXXXIV
Tabelle 87: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: <i>WS_1 und WS_2</i> .....	LXXXIV
Tabelle 88: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: <i>StS_1 und StS_2</i> .....	LXXXV



# 1. Hinführung und Motivation

Der immer komplexer werdende Straßenverkehr geht mit steigenden Anforderungen an die Fahrzeugführer:innen einher. Die Fahrzeugführer:in muss gleichzeitig eine Vielzahl an Informationen verarbeiten und korrekte Manövrierentscheidungen ableiten [12]. Zusätzlich beschäftigen sich Fahrzeugführer:innen immer häufiger mit Aufgaben, welche nicht der Primäraufgabe des Fahrens entsprechen. Dazu gehören bspw. das Bedienen des Infotainmentsystems oder der Komfortfunktionen. Aus diesem Grund benötigen Fahrer:innen zusätzliche Unterstützung bei der Erfüllung ihrer Primäraufgabe, dem Führen des Kraftfahrzeugs [43]. Daher nimmt eine Vielzahl an Fahrassistenzsystemen eine unterstützende Rolle ein, um die Fahrer:innen in komplexen Fahrsituationen zu entlasten [7].

Eines dieser Fahrassistenzsysteme ist das Head-up Display (HUD), welches inzwischen in allen Fahrzeugklassen verfügbar ist [61]. Über die Reflektion eines Bildschirms an der Windschutzscheibe kann ein virtuelles Bild Informationen in den Sichtbereich (auch *field of view – FOV*) der Fahrer:in bringen (Abb. 1.1).



Abb. 1.1: Virtuelles Bild der Mercedes-Benz E-Klasse (W213) in ca. zwei Metern Entfernung

Dies ermöglicht der Fahrer:in den Zugang zu fahrbezogenen Informationen bei gleichzeitiger Beobachtung des Verkehrs und reduziert damit die Beanspruchung der Fahrer:in durch Akkommodation und Bewegung der Augen [38,48,69,91,113]. Dadurch verringern sich Reaktionszeiten sowie die Zeit *eyes-off-the-road*, also die Zeit in welcher der Blick und die Aufmerksamkeit nicht auf das unmittelbare Verkehrsgeschehen gerichtet sind [48,69,91,111]. Entsprechend ist die Erhöhung der Fahrsicherheit durch die Verwendung eines HUD bereits in zahlreichen Studien nachgewiesen [35,39,43,52,57,65,91].

Aus diesem Grund vergrößern Autohersteller die Bildgröße sowie Projektionsdistanz kontinuierlich und treiben damit die Entwicklung des HUD voran. Der logische nächste Schritt

ist daher die virtuellen Inhalte direkt in die reale Welt zu integrieren, also eine *kontaktanaloge Darstellung* bzw. *Augmented Reality* (AR), umzusetzen. Bubb realisierte bereits 1976 eine kontaktanaloge Anzeige durch ein HUD, mit welcher der zu erwartende Bremsweg eines Kraftfahrzeuges direkt in der realen Welt markiert werden kann [11]. Mit der neuen Mercedes-Benz S-Klasse (Baureihenbezeichnung W223) erhält erstmals ein AR HUD, mit tatsächlichen kontaktanalogen Darstellungen, Einzug in die kommerzielle Serienproduktion von Pkw [62].

Ein AR HUD ermöglicht die Anzeige von Informationen, bspw. Navigationshinweisen oder Kollisionswarnungen (siehe Abb. 1.2), in das direkte Sichtfeld der Fahrer:in und erhöht dadurch die Fahrsicherheit [34,50,52]. Während in der letzten Dekade Autohersteller darum bemüht waren, Informationen möglichst nahe an das Sichtfeld der Fahrer:in zu bringen, liegt der Fokus nun darauf die Informationen in das direkte Sichtfeld der Fahrer:in zu positionieren und in Verbindung mit deren Umwelt zu setzen.



Abb. 1.2: Augmented Reality Head-up Display der Mercedes-Benz S-Klasse (W223)

Da der Fahrer:in immer mehr Informationen im HUD zur Verfügung stehen und insbesondere das AR HUD das Vertrauen in autonom fahrende Fahrzeuge der SAE Level 3 und 4 erhöhen kann [83,86,112], hat das HUD theoretisch das Potential das Kombiinstrument zukünftig vollständig zu substituieren.

Sowohl ein konventionelles HUD, als auch das neuartige AR HUD, erfüllen nur dann ihren hohen Kundennutzen, wenn deren Systemfunktionen einwandfrei erfüllt sind, welche verkürzt zusammengefasst die folgenden drei Punkte enthalten:

- Darstellung der richtigen und relevanten Informationen
- Virtuelles Bild in bester Qualität, inkl. korrekter Positionierung der Anzeigeninhalte
- Sichtbarkeit des virtuellen Bildes unter jeglichen Bedingungen

Insbesondere die beiden letzten Punkte betreffen die physikalische Zugänglichkeit zum virtuellen Bild und sind daher in allen Verkehrssituationen sicherzustellen. Die Zugänglichkeit eines HUD ist abhängig von dessen optischen Systemkomponenten – dem *Projektor* und der *Windschutzscheibe* (WSS). Beide Punkte, sowohl die Qualität als auch die Sichtbarkeit des virtuellen Bildes, werden durch diese Komponenten beeinflusst. Dabei sind vor allem die Formgebung, Formtreue, sowie die Lage der einzelnen optischen Komponenten zueinander, verantwortlich für die Qualität des virtuellen Bildes und können demnach die Ursache für unterschiedliche Abbildungsfehler sein (siehe Abschnitt 2.4).

Die benannten Abbildungsfehler beeinträchtigen den Kundennutzen nicht nur hinsichtlich des Kundenerlebnisses bzgl. einwandfreier Bildqualität, sondern auch hinsichtlich des Sicherheitsaspektes des HUD Systems. Sind die Anzeigen Inhalte nicht oder nur unter erhöhter Anstrengung wahrnehmbar, stellt das HUD keine Hilfe, sondern eine Behinderung für die Nutzer:innen dar [103]. Entsprechend tragen die Qualität und Sichtbarkeit des virtuellen Bildes einen entscheidenden Teil zur Erfüllung der HUD Systemfunktion bei.

Die Motivation vorliegender Dissertation ist es, die Befriedigung der Kundenansprüche an die Qualität und Sichtbarkeit des virtuellen Bildes eines AR HUD sicherzustellen. Im Fokus steht dabei die WSS als erster semitransparenter Spiegel im optischen HUD System. Im Rahmen dieser Arbeit werden alle relevanten optischen Abbildungsfehler des virtuellen Bildes untersucht, welche im optischen HUD System auf die WSS zurückzuführen sind. Die Untersuchung umfasst sowohl die Einflussanalyse der WSS auf die Abbildungsfehler, als auch die Analyse der subjektiven Wahrnehmung von Abbildungsfehlern im Verhältnis zu Qualitätskennzahlen. Zudem ist die Konzeptprüfung eines neuartigen p-polarisierten HUD zur Verbesserung der Sichtbarkeit des virtuellen Bildes im Umfang der Dissertation enthalten.

## 1.1. Problemstellung

Das HUD ist als passives Fahrassistentensystem kategorisiert, welches die Fahrer:in bei der sicheren Führung des Automobils unterstützt [53]. Grundvoraussetzung ist, dass die angezeigten Inhalte des virtuellen Bildes mangelfrei sind, also in bester Qualität zur Verfügung stehen sowie unter jeglichen Bedingungen sichtbar sind. Ist dies nicht der Fall, bleibt nicht nur das Kundenerlebnis unbefriedigt, sondern kann die Sicherheit der Fahrer:in, bspw. durch eine Fehlinterpretation der virtuellen Bildinhalte, gefährdet werden. Aus diesem Grund müssen die Abbildungsfehler im virtuellen Bild minimiert werden.

Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung des HUD Systems, vor allem durch die Vergrößerung des virtuellen Bildes und der Projektionsdistanz, steigen die Kundenansprüche an die Bildqualität und damit die Anforderungen an die optischen Komponenten des HUD Systems. Um diese Anforderungen definieren zu können, muss der OEM die Ansprüche der Kund:innen genau kennen, quantifizieren und objektiv bewertbar machen. Aufgrund der Erweiterung des HUD Systems um die Funktion der kontaktanalogen Darstellung, steigen die Kundenansprüche zusätzlich.

Die Qualität und Sichtbarkeit des virtuellen Bildes hängen von der generellen Auslegung des optischen HUD Systems, sowie von der Qualität seiner optischen Komponenten ab. Im HUD System sind diese Komponenten die WSS und der Projektor. Sie sind damit direkt für die Entstehung von Abbildungsfehlern im virtuellen Bild verantwortlich, welche die Zugänglichkeit der angezeigten Inhalte beeinträchtigen. Dabei hat die WSS als erster Spiegel im optischen HUD System einen erheblichen Einfluss auf die benannte Zugänglichkeit des virtuellen Bildes und kann Ursprung verschiedener Abbildungsfehler sein.

Bei der HUD Entwicklung muss definiert werden, welche Abbildungsfehler im virtuellen Bild auf die WSS zurückzuführen sind. Dafür ist zusätzlich die Entwicklung von Qualitätskennzahlen notwendig, welche die subjektive Wahrnehmung der Kund:innen hinsichtlich der Abbildungsfehler bestmöglich wiedergeben und gleichzeitig objektiv messbar sind. Ebenfalls müssen die zulässigen Toleranzgrenzwerte für die Abbildungsfehler des virtuellen Bildes festgelegt werden.

Für die benannten Abbildungsfehler im virtuellen Bild eines HUD bzw. AR HUD wurden bereits im Vorfeld der Dissertation Qualitätskennzahlen, auch als *Image Quality Numbers* (IQN) bezeichnet, entwickelt (siehe Abschnitt 2.4). Die IQN und ihre jeweiligen Grenzwerte wurden anhand einer Probandenstudie ermittelt, bei welcher die Bewertung verschiedener Abbildungsfehler an einem 3D-Monitor stattfand. Eine Verifizierung dieser Grenzwerte mit Hardware ist bisher nicht erfolgt. Da bei der Verwendung von tatsächlichen Komponenten von einer differenten subjektiven Wahrnehmung des virtuellen Bildes auszugehen ist, bleiben verschiedene Fragestellungen offen.

Da AR HUD Systeme neu auf dem Markt sind, darunter das MBUX Augmented Reality Head-Up-Display in der neuen Mercedes-Benz S-Klasse [61], fehlen weiterhin Daten und Erfahrungen hinsichtlich möglicher Abbildungsfehler eines AR HUD und wie diese durch die Kund:innen subjektiv wahrgenommen bzw. als störend empfunden werden.

Zum Entstehungszeitpunkt vorliegender Dissertation ist bekannt, dass die WSS als optisches Element des AR HUD für einen gewissen, aber bisher nicht exakt definierten, Teil der genannten Abbildungsfehler verantwortlich ist. Dieses Wissen ist im Entwicklungsprozess für AR HUD WSS aber zwingend nötig, um im Zielkonflikt von Qualität, Kosten und Zeit, keine Ressourcen zu verschwenden und gleichzeitig die hohen Kundenansprüche zu befriedigen. Die Untersuchungen beziehen sich vor allem auf WSS für ein AR HUD System.

Der erste Teil der vorliegenden Problemstellung, hinsichtlich Abbildungsfehlern in einem AR HUD System, setzt sich aus fehlenden Zusammenhängen und Erkenntnissen zusammen, welche sich auf drei Punkte reduzieren lassen.

1. Zum einen fehlen belastbare Erkenntnisse, ob die neu entwickelten Qualitätskennzahlen zur Quantifizierung der Abbildungsfehler, also die messbaren IQN, die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes passend wiedergeben.
2. Des Weiteren ist keine Bestätigung vorhanden, dass das Einhalten der gewählten zulässigen Grenzwerte der IQN dazu geeignet ist, die Kundenansprüche an die virtuelle Bildqualität zu befriedigen.
3. Außerdem sind die genauen Auswirkungen von Abweichungen der optischen Komponente Windschutzscheibe auf die virtuelle Bildqualität unbekannt.

Da das HUD generell eine immer wichtigere Rolle in der Kommunikation und Informationsbereitstellung zwischen Fahrer:in und Fahrzeug darstellt, ist es außerdem erforderlich das virtuelle Bild möglichst immer zugänglich umzusetzen. Im aktuellen Markt sind ausschließlich HUD Systeme mit s-polarisierter Lichtquelle verfügbar, welche auf den physikalischen Reflektionseigenschaften von Glas basieren. S-polarisierte HUD Systeme haben allerdings den Nachteil virtuelle Doppelbilder zu erzeugen, da sowohl an der Innen- und Außenfläche der WSS eine Reflektion stattfindet. Eine Korrektur dieses Doppelbildes ist zwar über eine keilwinkelige Polyvinylbutyral (PVB) Folie realisierbar, aber nicht für alle Kopfpositionen der Fahrer:in im gleichen Maße möglich. Der Kunde empfindet dieses Doppelbild als Unschärfe, welche ihm das Erkennen und damit das Wahrnehmen der virtuellen Bildinhalte erschwert. Überdies ist das virtuelle Bild eines HUD mit s-polarisierter Lichtquelle beim Tragen einer Sonnenbrille mit Polarisationsfilter nicht sichtbar. Hintergrund der schlechten Sichtbarkeit ist, dass das Funktionsprinzip aktueller HUD Systeme auf der Reflektion s-polarisierter Lichtstrahlen an der WSS basiert. Genau diese Lichtstrahlen

absorbieren polarisierende Sonnenbrillen. Da polarisierende Sonnenbrillen vermehrt Anwendung finden, ist es umso wichtiger eine Lösung für dieses Problem zu finden [58].

Es bestehen bereits erste Ansätze wie ein HUD System umzusetzen ist, welche die Sichtbarkeit des virtuellen Bildes trotz Verwendung einer polarisierenden Sonnenbrille sicherstellen und gleichzeitig den Entfall einer keilwinkligen PVB Folie ermöglichen sollen [20]. Aus theoretischer Sicht können durch die Orientierungsänderung der Polarisationsrichtung der Lichtwellen von *s-Polarisation* auf *p-Polarisation* diese Nachteile abgestellt werden. Voraussetzung dafür ist die Integration einer optischen Schicht in die WSS, welche p-polarisiertes Licht reflektiert. Allerdings sind noch keine ganzheitlichen Betrachtungen und Untersuchungen eines solchen HUD Systems vorhanden, welche dieses hinsichtlich neuartiger Abbildungsfehler oder möglicher Schwierigkeiten in der Industrialisierung überprüfen. Die Klärung dieser offenen Punkte ist daher Grundlage für die Realisierung eines entsprechenden HUD Systems und stellt den zweiten Teil der Problemstellung dar.

Auf Basis der Problemstellung wird im folgenden Abschnitt die Zielsetzung der Dissertation, inklusive der Forschungsfragen, formuliert.

## 1.2. Zielsetzung & Forschungsfragen

Die Befriedigung der Kundenansprüche an die Qualität und Zugänglichkeit des virtuellen Bildes eines AR HUD Systems ist die Handlungsmaxime vorliegender Dissertation und damit auch der Zielsetzung. Um Letztere ausformulieren zu können, lassen sich aus zuvor beschriebener Problemstellung folgende Forschungsfragen ableiten:

- (A) Welche Abbildungsfehler können im virtuellen Bild eines AR HUD entstehen?
- (B) Wie nehmen Kund:innen die virtuelle Bildqualität subjektiv wahr?
- (C) Welchen Einfluss hat die Windschutzscheibe auf Abbildungsfehler im virtuellen Bild sowie die subjektiv wahrgenommene virtuelle Bildqualität?
- (D) Ist die subjektive Wahrnehmung der Kund:innen auf die definierten IQN für Abbildungsfehler zurückzuführen oder müssen diese erweitert werden?
- (E) Wie könnte eine kostenneutrale Realisierung eines HUD Systems aussehen, welche die Sichtbarkeit des virtuellen Bildes mit polarisierender Sonnenbrille ermöglicht?
- (F) Welche potentiellen Abbildungsfehler und Industrialisierungsschwierigkeiten könnten bei der Realisierung eines HUD Systems auftreten, das mit polarisierender Sonnenbrille sichtbar ist?

*(G) Wie könnten Ansätze zur Quantifizierung sowie Lösung potentieller Abbildungsfehler und weiterer Schwierigkeiten aussehen?*

Ausgehend von diesen Forschungsfragen lässt sich die Dissertation in zwei Untersuchungsbereiche aufteilen.

Untersuchungsbereich 1 behandelt die Forschungsfragen (A), (B), (C) und (D). Ziel ist es die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität, in Abhängigkeit der Qualität der WSS, erstmals unter Verwendung von seriennahen Komponenten zu untersuchen. Außerdem ist festzustellen, ob die vorhandenen IQN für Abbildungsfehler und die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität konvergieren.

Untersuchungsbereich 2 behandelt Forschungsfragen (E), (F) und (G). Ziel ist mittels einer technischen Konzeptprüfung eines p-polarisierten HUD Systems die Sichtbarkeit des virtuellen Bildes trotz Verwendung einer polarisierenden Sonnenbrille zu ermöglichen. Zudem sind mögliche auftretende Abbildungsfehler zu quantifizieren und deren subjektive Wahrnehmung zu bewerten.

Mit Hilfe der beiden Untersuchungsbereiche soll ein wesentlicher Teil zur Befriedigung der Kundenansprüche an die virtuelle Bildqualität eines AR HUD beigetragen und damit die Sicherstellung der optischen Systemfunktion eines AR HUD gewährleistet werden.

Um die Forschungsfragen der vorliegenden Dissertation bearbeiten zu können, ist die Anwendung verschiedener Disziplinen nötig. Da es sich beim AR HUD um ein visuelles optisches System handelt, inkludiert diese Arbeit die Disziplinen der technischen Optik und der menschlichen visuellen Wahrnehmung. Letzteres umfasst die Anatomie und Physiologie des menschlichen Sehsystems. Um mit Hilfe von Probandenstudien mögliche Zusammenhänge zwischen objektiv messbaren und subjektiv wahrnehmbaren Abbildungsfehlern feststellen zu können, finden zudem die Bereiche der optischen Vermessungstechnik, inkl. Auswertungsalgorithmen, sowie der statistisch experimentellen Studiendurchführung Anwendung. Mit diesem interdisziplinären Ansatz erfolgt erstmalig die Untersuchung eines automobilen AR HUD Systems hinsichtlich seiner virtuellen Bildqualität in Abhängigkeit der WSS, sowie die Konzeptprüfung eines p-polarisierten HUD Systems.

Die Ausformulierung der Forschungsfragen und entsprechender Ziele der Dissertation ermöglicht die präzise Beschreibung der Aufgabenstellung im nachfolgenden Abschnitt.

### 1.3. Aufgabenstellung

Die Umsetzung eines AR HUD stellt neue und genauere Anforderungen an die WSS als bisher. Da sich die von Kund:innen wahrgenommene Qualität eines HUD ausschließlich auf die Qualität des virtuellen Bildes beschränkt, steht die Optimierung des virtuellen Bildes im Mittelpunkt der OEM-seitigen Windschutzscheibenentwicklung und damit dieser Arbeit. Entsprechend beschreiben die maßgeblichen Qualitätskennzahlen in der OEM-Entwicklung von AR HUD WSS die Qualität des virtuellen Bildes und nicht die geometrischen Kennzahlen der WSS. Das Definieren und Erreichen der notwendigen Formgenauigkeit, um die durch den OEM vorgegebene Qualität des virtuellen Bildes zu erreichen, ist Aufgabe der WSS-Lieferanten und liegt daher außerhalb des Umfangs dieser Dissertation. Der OEM nimmt in diesem Punkt nur eine unterstützende Rolle ein. Das Freiformflächendesign der optischen Komponenten, also der WSS und des Projektors, bei welchem vor allem die Radien und deren Verläufe bestimmt werden, ist zwar ebenfalls Aufgabe des OEM, aber nicht Teil dieser Arbeit.

Kernaufgabe für den OEM in der Neuentwicklung eines AR HUD Systems ist es, Qualitätskennzahlen für das virtuelle Bild zu definieren und die maximal zulässigen Toleranzgrenzwerte dieser Qualitätskennzahlen festzulegen. Diese Qualitätskennzahlen haben die Funktion die subjektive Wahrnehmung der Kund:innen objektiv und messbar wiederzugeben. Genau in diesem Punkt soll die vorliegende Arbeit einen wichtigen wissenschaftlichen Beitrag leisten und die Forschungslücke hinsichtlich der Beeinflussung der virtuellen Bildqualität durch die WSS schließen. Die gewonnenen Informationen sollen Grundlagen zur Spezifikation für AR HUD WSS liefern bzw. unmittelbar in die Spezifikation einfließen.

Die in der Zielsetzung definierten Untersuchungsbereiche ergeben zwei Aufgaben, diese sind folgend erläutert.

Die aus Untersuchungsbereich 1 abzuleitende Aufgabe, und damit Beantwortung der Forschungsfragen (A), (B) (C) und (D), ist die Durchführung einer Probandenstudie. Die Probandenstudie hat zwei Ziele. Erstens, ist die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität in Abhängigkeit der Qualität der WSS zu untersuchen. Zweitens, ist zu prüfen ob die vorhandenen IQN für Abbildungsfehler und die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität konvergieren. Um die Aussagefähigkeit dieser Untersuchung zu maximieren, ist das Studiendesign möglichst seriennah zu gestalten. Dazu gehört vor allem die Verwendung tatsächlicher seriennaher Komponenten in einem fahrzeugähnlichen Versuchsträger. Die

Verwendung von WSS unterschiedlicher Qualität ermöglicht die Einflussanalyse der WSS auf die wahrgenommene virtuelle Bildqualität und darüber hinaus die Konvergenzprüfung mit den IQN.

Die zweite Aufgabe, abgeleitet aus Untersuchungsbereich 2, ist die technische Konzeptprüfung eines *HUD mit p-polarisierter Lichtquelle* zur Optimierung der virtuellen Bildschärfe und zur Sichtbarkeit des virtuellen Bildes beim Tragen einer Sonnenbrille mit Polarisationsfilter. Sie dient der Beantwortung der Forschungsfragen (E), (F) und (G).

Die Umsetzung eines HUD mit p-polarisiertem Licht und entsprechender Integration einer reflektierenden Schicht für p-polarisiertes Licht in die WSS ist ein Novum. Demzufolge sind mögliche Abbildungsfehler oder andere Herausforderungen, welche durch die Integration einer zusätzlichen Reflektionsebene in die WSS entstehen, weitestgehend unbekannt und nicht spezifiziert. Im Rahmen dieser technischen Konzeptprüfung sollen sowohl alle neuen möglichen Abbildungsfehler des Head-up Displays, als auch weitere Herausforderungen bei der Implementierung eines p-pol HUD, erarbeitet und spezifiziert werden. Ziel ist es, Grundlagen für die Spezifikation und Umsetzung eines p-polarisierten HUD zu erarbeiten.

Anhand der detaillierten Erläuterung der Problemstellung (Abschnitt 1.1), Aufstellen der Zielsetzung und Forschungsfragen (Abschnitt 1.2), sowie Formulierung der Aufgaben (Abschnitt 1.3), wurde der Umfang für die Dissertation definiert und hinreichend abgegrenzt. Zum Abschluss dieses Kapitels erfolgt eine kurze Erläuterung zum Aufbau und Inhalt vorliegender Dissertation.

Im nachfolgenden Kapitel 2 sind die theoretischen Grundlagen der Dissertation zu finden, welche zum grundlegenden Verständnis der Dissertation beitragen. Diese umfassen die grundsätzliche menschliche visuelle Wahrnehmung (Abschnitt 2.1), die für das HUD und diese Arbeit relevanten Eigenschaften von Licht (Abschnitt 2.2), sowie die Funktionsweise des optischen HUD Systems (Abschnitt 2.3) und dessen Abbildungsfehler (Abschnitt 2.4).

Kapitel 3 zeigt anschließend einen ganzheitlichen Stand der Technik zur Thematik HUD auf. Dieser beinhaltet die Diskussion zum Einsatz eines HUD (Abschnitt 3.1), die bekannten Anforderungen an (Abschnitt 3.2), sowie die technische Betrachtung des HUD (Abschnitt 3.3). Zuletzt erfolgt in Kapitel 3 die Betrachtung der Abbildungsfehler eines AR HUD, welche auf die WSS zurückzuführen sind und bereits in aktueller Literatur bekannt sind (Abschnitt 3.4). Diese Betrachtung bildet die Basis zum Aufzeigen der Forschungslücke (Abschnitt 3.5).

In Kapitel 4 ist die Dokumentation einer Probandenstudie zur Einflussanalyse der WSS auf die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität eines AR HUD zu finden. Dieses Kapitel behandelt die Forschungsfragen (A), (B), (C) und (D). Die konkreten Inhalte sind dabei die Beschreibung des Aufbaus sowie Durchführung und Ergebnisanalyse einer hierfür passenden Probandenstudie (Abschnitte 4.1, 4.2 und 4.3). Außerdem enthält dieses Kapitel die Analyse eines möglichen Zusammenhangs zwischen der subjektiven Wahrnehmung der Proband:innen eines AR HUD mit den IQN (Abschnitt 4.3.4), sowie die Erarbeitung weiterer Qualitätskennzahlen (Abschnitt 4.4).

Kapitel 5 beschreibt die Grundsatzuntersuchung eines p-polarisierten HUD Systems, welches es ermöglichen soll das virtuelle Bild auch mit polarisierender Sonnenbrille wahrnehmen zu können. Dieses Kapitel behandelt die Forschungsfragen (E), (F) und (G). Hierzu gehören die Untersuchungen des grundsätzlichen technischen Konzeptes eines p-polarisierten HUD unter Verwendung einer zusätzlich optisch aktiven Komponente in der WSS (Abschnitt 5.1). Aufgrund der Untersuchungsergebnisse erfolgen weitere Analysen zum Auftreten eines Doppelbildfehlers im p-polarisierten HUD (Abschnitt 5.2), sowie die Ermittlung der Störschwelle hinsichtlich des Doppelbildfehlers im virtuellen Bild im Rahmen einer zweiten Probandenstudie (Abschnitt 5.3).

Zuletzt ist in Kapitel 6 ein Ausblick zur weiteren Untersuchung von AR HUD gegeben. Diskussionen und Zusammenfassungen sind dem Ende eines jeweiligen Kapitels angefügt.

## 2. Theoretische Grundlagen

Um die vorliegende Arbeit durchdringen zu können, werden folgend die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit erläutert. Dazu gehört zum einen die *menschliche visuelle Wahrnehmung*, da der Kern der Dissertation darauf abzielt die visuelle subjektive Kundenwahrnehmung eines virtuellen Bildes zu verstehen, zu quantifizieren und schlussendlich zu verbessern. Entsprechend müssen die Grundlagen des menschlichen Sehens, also die visuelle Erfassung und Verarbeitung von Informationen bekannt sein, um im Weiteren die Auswirkung und Wahrnehmung von Abbildungsfehlern einschätzen zu können. Zum anderen sind Kenntnisse über die physikalischen Eigenschaften von Licht unabdingbar, um das optische HUD System und die Entstehung von Abbildungsfehlern zu verstehen sowie mögliche Lösungsansätze zu entwickeln. Auf dieser wissenschaftlichen Basis lassen sich schlussendlich sowohl das optische HUD System, sowie die möglichen wahrnehmbaren Abbildungsfehler eines HUD erklären. Die beschriebenen theoretischen Grundlagen bilden lediglich die Basis zum Verständnis vorliegender Arbeit. Weitere Informationen sind unter anderem in der gelisteten Literatur zu finden.

### 2.1. Die menschliche visuelle Wahrnehmung

Die menschliche visuelle Wahrnehmung ist ein komplexes System. Dabei ist es nicht ausschließlich für die reine Abbildung der Außenwelt zuständig, sondern beteiligt sich auch an biologischen Prozessen wie z.B. dem Schlaf-Wach-Zyklus aufgrund des täglichen Hell-Dunkel-Wechsels [5]. Das Auge und seine optischen Eigenschaften sind bereits tiefgreifend untersucht und verstanden. Allerdings wirft das Zusammenspiel der verschiedenen Hirnregionen zur Umsetzung der tatsächlichen Bildentstehung, Zusammensetzung der linken und rechten Gesichtshälften, sowie schlussendlicher Wahrnehmung und Interpretation des Gesehenen, welche nicht ausschließlich in der primären Sehrinde abläuft, noch Fragen auf [5]. Für vorliegende Arbeit sind im Folgenden ausschließlich die grundsätzlichen Funktionsweisen der visuellen Wahrnehmung von Interesse und entsprechend erläutert. Der Fokus liegt dabei auf der stereoskopischen Wahrnehmung der Umwelt mit beiden Augen sowie den daraus resultierenden möglichen Wahrnehmungsschwierigkeiten stereoskopischer optischer Systeme. Da das stereoskopische Sehen in enger Verbindung mit der Tiefenwahrnehmung steht, erfolgt ebenfalls die kurze Einführung in die Prinzipien der menschlichen Tiefenwahrnehmung.

### 2.1.1. Die Anatomie und Funktion des Auges

Das menschliche visuelle System besteht aus den Augen, dem Sehnerv sowie den im Gehirn befindlichen Verarbeitungs- und Wahrnehmungszentren. Das menschliche Auge bildet die Basis des Sehens und bestimmt anhand seiner Anatomie das menschliche Sehvermögen. Der vordere Teil des Auges bildet die Optik des visuellen Systems und ist dafür zuständig ein scharfes Bild auf der Netzhaut (Retina) darzustellen. An der hinteren Wand des Auges befindet sich die Retina, welche mit einer Vielzahl an Photorezeptoren besetzt ist. Diese Rezeptoren wandeln die Energie der elektromagnetischen Lichtwellen in neuronale Signale um. Über den Sehnerv werden diese Signale in verschiedene Regionen des Gehirns weitergeleitet wo die Verarbeitung und Auswertung der Bildinformationen für unterschiedliche Funktionen stattfindet [6,32].

In Abb. 2.1 ist die grundsätzliche Anatomie des menschlichen Auges zu sehen. Durch die Hornhaut (Cornea) und anschließend die Pupille gelangt das Licht ins Auge. Über die Größe der Pupille erfolgt die Regulierung der einfallenden Lichtmenge. Die Pupillenregulierung wird von der Iris durchgeführt [6]. Hinter der Iris befindet sich die Linse. Über die Anpassung der Linse erfolgt die Akkommodation, also das Fokussieren verschiedener Bildabstände der Umwelt auf der Retina [32,106]. Die Linsenanpassung findet mit Hilfe der Ziliarmuskeln statt, welche über die Zonulafasern direkt mit der Linse verbunden sind. Die Linse teilt das Auge räumlich in zwei Kompartimente. Zwischen Cornea und Linse befindet sich das Kammerwasser. Zwischen Linse und Retina befindet sich der Glaskörper. Die Retina befindet sich an der inneren Hinterwand des Auges. Die Retina besteht aus Photorezeptoren, den Stäbchen und Zapfen. Diese nehmen die Energie der elektromagnetischen Lichtwellen auf und leiten die erhaltenen Informationen an die Bipolar- und schließlich Ganglienzellen weiter. Die Ganglienzellen erzeugen schließlich neuronale Impulse, welche über den Sehnerv in verschiedene Hirnregionen gelangen [6]. Im Zentrum der Retina befindet sich die Fovea, welche ausschließlich Zapfen enthält und für das scharfe, farbige Sehen bei heller Umgebung Verwendung findet [6,32]. Gemeinsam wirken die verschiedenen Bestandteile des Auges als ein optisch abbildendes System, wobei das Auge Lichtstrahlen sammelt „die von Objekten in der Umgebung ausgestrahlt oder reflektiert werden, und fokussiert sie auf der Netzhaut, um Bilder zu erzeugen“ [6]. Das Auge sitzt in der Augenhöhle (Orbita). Am äußeren Augapfel setzen für linkes und rechtes Auge jeweils die drei äußeren Augmuskelpaare an, welche die Augen aufeinander abgestimmt bewegen und damit das stereoskopische Sehen ermöglichen [32].

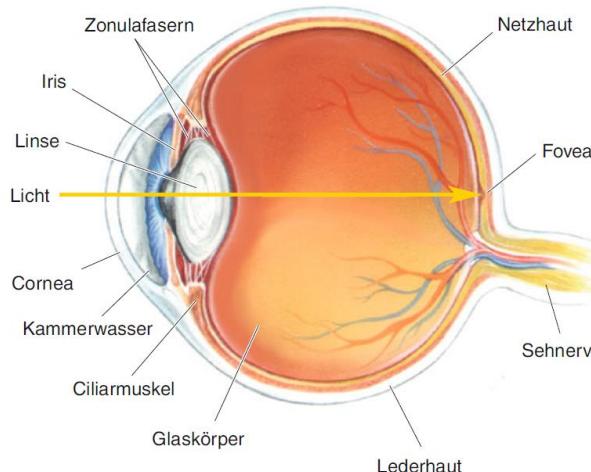
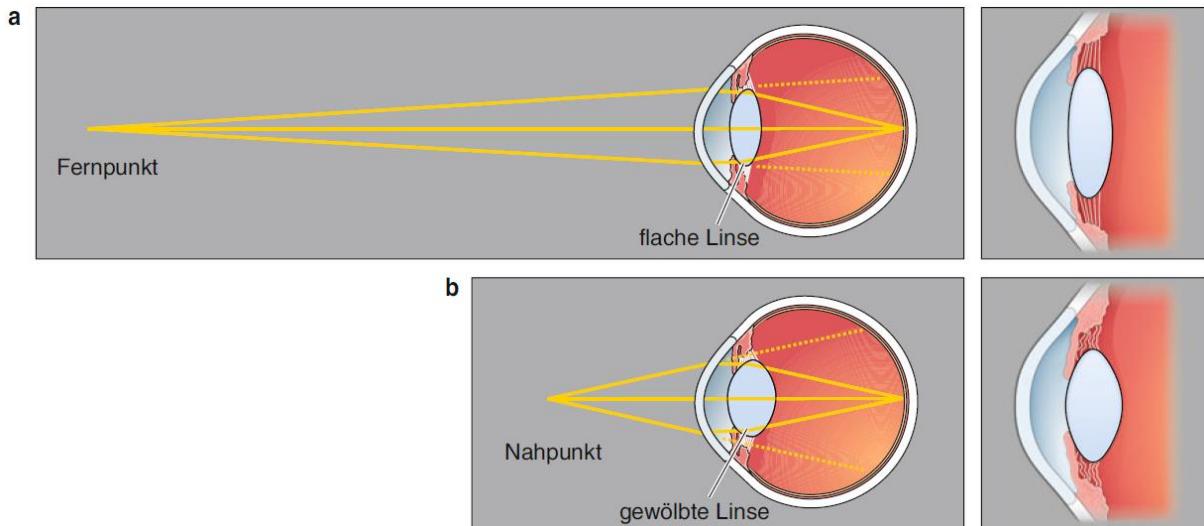


Abb. 2.1: Horizontaler Schnitt durch das Auge [6]

### 2.1.2. Akkommodation

Die *Akkommodation* ist die Anpassung der Brechkraft der Augenlinse zur Scharfstellung entfernter oder naher Betrachtungsobjekte. Den größten Anteil der Brechkraft besitzt dabei die Cornea, welche bereits einen großen Anteil der Fokussierung der Umwelt auf der Retina umsetzt. Aufgrund ihrer asphärischen Form minimiert die Cornea zusätzlich die Abbildungsfehler der sphärischen Aberration und der Koma [6,32]. Die Akkommodation erlaubt es verschiedene Fokusebenen auf der Netzhaut abzubilden. Die Brechkraft wird über die an der Augenlinse befindlichen Zonulafasern und einem muskulären Ring, dem Ziliarmuskel, gesteuert. Die Linse hat eine bikonvexe Form, wobei ihre Vorderseite weniger gekrümmmt ist als ihre Rückseite [32]. Sind die Zonulafasern gespannt, üben diese einen Zug auf die Linse aus, welcher die Linse abflacht und zu einer geringeren Brechkraft der Linse führt. Dieser Zustand ist gegeben, wenn die Ziliarmuskeln nicht kontrahieren, also gelockert sind. Auf diese Weise erfahren die aus größerer Entfernung parallel einfallenden Lichtstrahlen weniger Brechung zur Abbildung auf der Retina. Dies ist die Fern-Akkommodation, bei welcher Gegenstände in der Ferne scharf auf der Retina dargestellt sind. Wird der Ziliarmuskel kontrahiert, lockern sich die Zonulafasern und die Dicke sowie konvexe Wölbung der elastischen Augenlinse vergrößern sich. Auf diese Weise erhöht sich die Brechkraft der Linse. Folglich erfahren parallel einfallende Strahlen eine stärkere Brechung zur Abbildung auf der Retina und nahe Gegenstände können scharf wahrgenommen werden [6,32]. Dies ist die Nah-Akkommodation, welche最早ens bei Abständen, zwischen Betrachter:in und Betrachtungsobjekt, kleiner neun Metern einsetzt [6]. In Abb. 2.2 sind die Prinzipien der (a) Fern- und (b) Nah-Akkommodation anhand der Steuerung der Linse schematisch dargestellt. Im Ruhestand befindet sich der Ziliarmuskel in einer Zwischenstellung, die Fokusebene

befindet sich dann in etwa einem Meter Entfernung. Mit dem Alter nimmt die Akkommodationsfähigkeit ab, da die Augenlinse starrer und damit ihre Fähigkeit zur Wölbung geringer wird. Dies hat zur Folge, dass sich die Fähigkeit des Scharfstellens naher Gegenstände verringert [5]. Dieser Prozess setzt bei Personen ab einem Alter von ca. 40 Jahren ein und wird als Presbyopie (Altersweitsichtigkeit) bezeichnet [32].



**Abb. 2.2:** Schematische Darstellung der (a) Fern- und (b) Nah-Akkommodation des Auges über die (a) Entspannung und (b) Kontraktion des Ziliarmuskels und daraus resultierender flacher und gewölbter Linse [6]

### 2.1.3. Stereoskopisches Sehen und Tiefenwahrnehmung

In diesem Abschnitt soll eine Beschreibung der Grundprinzipien des stereoskopischen (binokularen) Sehens, der Tiefenwahrnehmung sowie den damit verbundenen Wahrnehmungsschwierigkeiten des menschlichen visuellen Systems stattfinden.

Die Basis für das stereoskopische Sehen des Menschen bilden die zwei horizontal angeordneten Augen. Die drei Augmuskelpaare je Auge ermöglichen die koordinierte Ausrichtung der Augen auf Objekte der Umwelt. Dabei ist sowohl die konvergierende als auch divergierend Ausrichtung der Augen zueinander möglich [17].

Das räumliche Sehen und entsprechende Tiefenwahrnehmung basiert allerdings nicht ausschließlich auf binokularen Tiefeninformationen, sondern auch einer Vielzahl von monokularen Tiefeninformationen, welche folgend beschrieben sind.

#### Monokulare Tiefenwahrnehmung

Die *Akkommodation* ist eine der monokularen Tiefeninformationen. Wie im vorausgehenden Abschnitt 2.1.2 beschrieben, ist es möglich über die Anpassung der Augenlinse

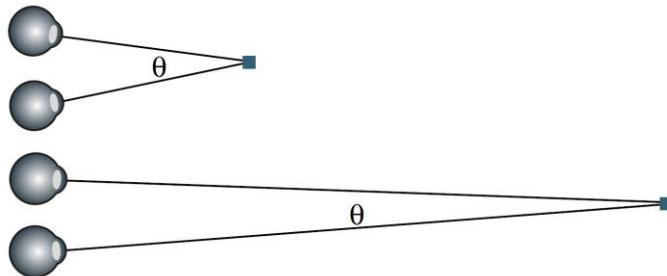
unterschiedliche Entfernungen auf der Retina zu fokussieren. Dadurch erscheinen Objekte der gewählten Fokusebene scharf und Objekte außerhalb der gewählten Fokusebene, also davor und dahinter, unscharf. Die Schärfe und Unschärfe unterschiedlich entfernter Objekte ist eine der Tiefeninformation für die Tiefenwahrnehmung. Da die Fokusgenauigkeit des menschlichen Auges nur etwa 0,5 Dioptrien aufweist, liefert die Akkommodation nur verlässliche Tiefeninformationen in Entfernungen kleiner zwei Meter [45].

Des Weiteren kann das menschliche visuelle System auf Basis gesammelter Erfahrungen verschiedene monokulare Informationen zur Beurteilung der Tiefenwahrnehmung heranziehen. Dazu gehört zum einen die *Linearperspektive*, nach welcher parallele Linien bei zunehmender Entfernung in die Richtung eines Punktes konvergieren. Eine sehr effektive Tiefeninformation sind zudem *relative Größen* und *Höhen* von Objekten zueinander. Objekte in größerer Entfernung erscheinen kleiner. Dies liegt daran, dass entfernte Objekte einen kleineren Teil der Retina abdecken. Vor allem bekannte Objekte, bspw. ein Mensch oder Baum, helfen bei der Einordnung von Größen und damit auch Entfernungen anderer Objekte sowie der Objekte zueinander. Eine weitere Tiefeninformation liefert die *Verdeckung* verschiedener Objekte. Wenn bspw. ein Objekt A ein anderes Objekt B verdeckt, erscheint Objekt A der Betrachter:in näher. Des Weiteren können anhand von *Schattierungen* und *Texturen* Tiefeninformation vermittelt werden. Mit Hilfe des Zusammenspiels von Licht und Schatten sowie der Textur, ein Beispiel hierfür ist die Anwendung in topographischen Karten, kann Tiefe suggeriert werden. Zuletzt liefert die *Bewegungsparallaxe* Tiefeninformationen. Befindet sich eine Person in Bewegung, bspw. in einem fahrenden Pkw und schaut dabei seitlich aus dem Fenster, scheinen sich näher liegende Objekte deutlich schneller zu bewegen als Objekte in weiter Entfernung [106]. Unter Anwendung der erläuterten Möglichkeiten zur Vermittlung von Tiefeninformationen, mit Ausnahme der Akkommodation, können dreidimensionale Darstellungen auch ohne unterschiedliche Fokusebenen suggeriert werden. In tatsächlichen dreidimensionalen optischen Systemen, bspw. 3D Displays, verbessert die korrekte Anwendung der monokularen Tiefeninformationen die Tiefenwahrnehmung erheblich [106].

## **Binokulare Tiefenwahrnehmung**

Die Fähigkeit des menschlichen visuellen Systems zur binokularen Tiefenwahrnehmung basiert auf der Tatsache horizontal zueinander angeordneter Augen. Die horizontale Anordnung des Augpaares führt zu einem horizontalen Abstand der wahrgenommenen monokularen Bilder je Auge [71].

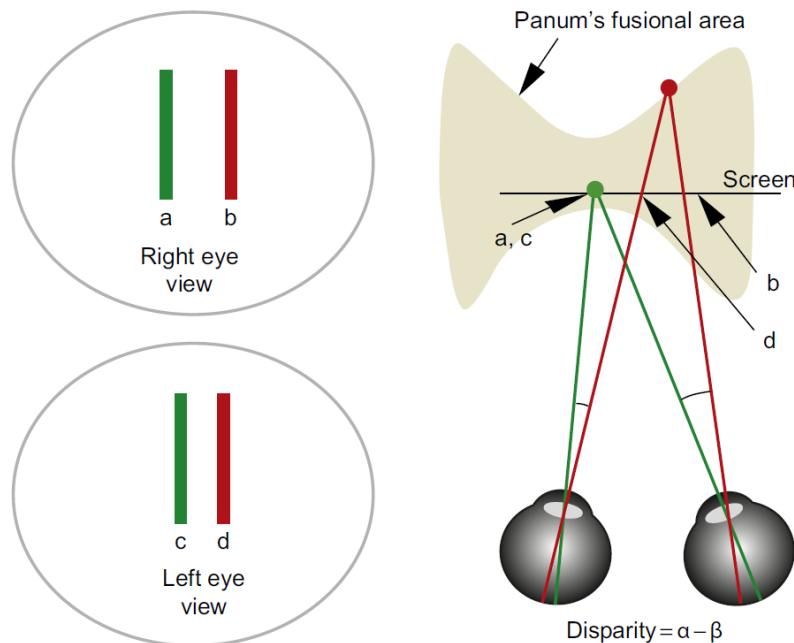
Dies führt zu zwei Phänomenen, welche eine binokulare Tiefeninformationen liefern und damit die binokulare Tiefenwahrnehmung ermöglichen. Eine davon ist die Ausrichtung des Augpaars, die *Konvergenz*. Bei Fixierung eines gewissen Punktes in der Umwelt konvergieren die Sichtstrahlen des linken und rechten Auges in Abhängigkeit zur Entfernung des gewählten Punktes. Abb. 2.3 gibt die geometrischen Abhängigkeiten zwischen der Entfernung des fixierten Bildpunktes und dem Konvergenzwinkel  $\theta$  wieder. Konvergieren die Augen stärker wird der Konvergenzwinkel  $\theta$  größer und ein Objekt erscheint der Betrachter:in näher. Konvergieren die Augen weniger wird der Konvergenzwinkel  $\theta$  kleiner und ein Objekt erscheint der Betrachter:in weiter entfernt.



**Abb. 2.3: Illustration des sich ändernden Konvergenzwinkels  $\theta$  des linken und rechten Auges bei der Fixierung von Bildpunkten in unterschiedlichen Entfernungen [106]**

Die zweite binokulare Tiefeninformation liefert die *binokulare Disparität*. Sie stellt Tiefeninformationen anhand des Auftreffens der Bildinformationen an unterschiedlichen Stellen der Retina von linkem und rechtem Auge dar. Das linke und rechte Auge nehmen aufgrund ihrer horizontalen Anordnung unterschiedliche Bilder aus zwei Perspektiven wahr, welche im visuellen System zusammengefügt werden und auch auf diese Weise relative Tiefeninformationen liefern [106]. In Abb. 2.4 ist das Prinzip der binokularen Disparität am Beispiel eines Stereo-Displays dargestellt, welches linkem und rechten Auge jeweils ein anderes Bild zeigt. Mit Hilfe verschiedener Abstände u. Positionen der Bildinformationen auf den Netzhäuten für linkes und rechtes Auge kann dem menschlichen visuellen System eine Tiefeninformation vermittelt werden. In diesem Beispiel fixieren die Augen die gleiche grüne vertikale Linie, wobei das rechte Auge die grüne Linie *a* an einer anderen Stelle der Netzhaut abbildet, als das linke Auge die grüne Linie *c*. Das linke und rechte Auge nehmen jeweils eine zweite rote Linie wahr, die sich für die beiden Augen aber jeweils in unterschiedlichen Abständen und damit Positionen auf den Netzhäuten der Augen im Vergleich zur grünen Linie befindet. Das visuelle System verarbeitet diese unterschiedlichen Abstände der Linien, also die Disparität, und nimmt die beiden Linien in unterschiedlichen Entfernungen wahr. Bis zu einer gewissen Ausprägung der binokularen Disparität kann ein Display auf diese Weise

unterschiedliche Tiefeninformationen und damit Entferungen vermitteln. Ist die Disparität zu hoch kommt es zu *Diplopie*. Die Diplopie führt zur Wahrnehmung eines Doppelbildes, da die Bildinformationen von linkem und rechten Auge vom visuellen System nicht mehr zusammengeführt werden können [106].



**Abb. 2.4:** Skizze eines Stereo-Displays, bei welchem dem linken und rechten Auge unterschiedliche Bilder zur Verfügung stehen, um mit Hilfe binokularer Disparität Tiefeninformationen zu vermitteln [106]

Die Beschreibung der unterschiedlichen Tiefeninformationen zeigt, dass die Tiefenwahrnehmung des menschlichen visuellen Systems auf verschiedene Tiefeninformationen zurückgreift. Die Tiefenwahrnehmung stützt sich dabei nicht ausschließlich auf binokulare Tiefeninformationen, sondern ist ein komplexer Prozess der die gleichzeitige Wahrnehmung, Verarbeitung und Interpretation der Tiefeninformationen durch die Betrachter:in voraussetzt [71]. Die tatsächlich wahrgenommene Entfernung von Objekten und auch virtuellen Bildinhalten basiert entsprechend auf der Kombination der monokularen und binokularen Tiefeninformationen [106].

## Wahrnehmungsschwierigkeiten des stereoskopischen Sehens

Unterschiedliche Tiefeninformationen sind vor allem dann störend, wenn die stereoskopischen Mechanismen der binokularen Disparität oder Konvergenz im Widerspruch zu anderen Tiefeninformationen stehen. Folglich muss die stereoskopische Tiefe des visuellen Systems nicht zwingend der tatsächlich wahrgenommenen Tiefe und damit Entfernung entsprechen. Die

monokularen Tiefeninformationen können die binokularen überwiegen, da die monokularen Tiefeninformationen das visuelle System im hohen Maße stimulieren [105].

In stereoskopischen Abbildungssystemen, bspw. stereoskopischen 3D Displays mit geringer Entfernung zur Betrachter:in, liefern Akkommodation, Konvergenz und binokulare Disparität unterschiedliche Tiefeninformationen [63]. Dieses Phänomen wird auch als *Akkommodations-Konvergenz-Konflikt* bezeichnet und ist in der Literatur weitgehend untersucht und beschrieben. Diese drei physisch basierten Tiefeninformationen beeinflussen sich gegenseitig. Bspw. wird in Abhängigkeit der Disparität und Konvergenz zwischen den Augen eine bestimmte Akkommodation erwartet. Dieses Prinzip wirkt ebenso in die andere Richtung, dass in Abhängigkeit der Akkommodation eine bestimmte Disparität und Konvergenz zu erwarten ist [71]. Wenn sich die unterschiedlichen Tiefeninformationen allerdings in zu großem Maße widersprechen, kann die visuelle Wahrnehmung eines 3D Displays sehr störend wirken und zu Unwohlsein oder Kopfschmerzen führen. Dies beruht vor allem darauf, dass stereoskopische optische Systeme mit 3D Funktion in der Regel keine unterschiedlichen Fokusebenen darstellen können und damit keine Akkommodation der Augenlinse nötig ist [54]. In der realen Welt besitzen Objekte in unterschiedlichen Entfernungen auch unterschiedliche Fokusebenen. Entsprechend erscheinen nicht fokussierte Objekte in der realen Welt unscharf. Da dem visuellen System das Zusammenführen unscharfer Bildinformationen leichter fällt, wird die Diplopie als weniger stark ausgeprägt und störend wahrgenommen als dieses in 3D Displays mit nur einem tatsächlichen Bildabstand und damit einer Fokusebene der Fall ist [44]. Aus diesem Grund lehnen manche Benutzer:innen grundsätzlich die Verwendung von 3D Displays ab [106].

Eine zu hohe Ausprägung der binokularen Disparität, vor allem bei gleichzeitigem Widerspruch zur Konvergenz der Augen, wird als *binokulare Rivalität* bezeichnet [8,9]. Die binokulare Rivalität tritt dann auf, wenn rechtes und linkes Auge unterschiedliche Stimuli empfangen, bspw. durch das Sehen zweier unterschiedlicher Bilder. Dies ist der Fall, wenn die Bilder eines Objektes für linkes und rechtes Auge horizontal und bzw. oder vertikal nicht zueinander passend auf der jeweiligen Retina abgebildet werden. Das visuelle System versucht diese konkurrierenden Stimuli zu vereinen, also zu einem Gesamtbild zusammenzuführen [8]. In diesem Fall entsteht ein Konflikt zwischen der Wahrnehmung des rechten und linken Auges. Die konkurrierenden Stimuli führen zu einer wechselnden Wahrnehmung zwischen dem rechten und linken Auge. Dieser binokulare Abbildungsfehler des menschlichen visuellen Systems erscheint der Betrachter:in als Doppelbild und wird auch als *Diplopie* bezeichnet.

Gründe können Verzerrungen oder falsche Ausrichtung der Komponenten eines optischen Systems sein, sowie die Fehlausrichtung von linkem und rechten Auge, wenn diese nicht auf dasselbe Objekt gerichtet sind [38].

Das HUD ist ebenfalls ein stereoskopisches optisches System, wie in Abschnitt 2.3 erläutert ist. Entsprechend können auch im HUD stereoskopische Abbildungsfehler entstehen. Ansätze zur Feststellung der Ausprägung solcher stereoskopischen Abbildungsfehler sind in Abschnitt 2.4.3 zu finden.

## 2.2. Eigenschaften des Lichts

In diesem Abschnitt sollen in Kürze die für diese Arbeit wichtigen physikalischen Eigenschaft des Lichts beschrieben werden. Dazu gehören zum einen diejenigen Eigenschaften, welche für das Verständnis des menschlichen visuellen Systems und damit der menschlichen visuellen Wahrnehmung von Bedeutung sind. Zum zweiten erfolgt die Beschreibung der Lichteigenschaften, welche zum Verständnis des optischen HUD Systems essentiell sind.

### 2.2.1. Licht als Strahl & Licht als Welle

Das Licht kann sowohl als Strahl als auch als elektromagnetische Welle angenommen werden. Während in der technischen Optik zur Auslegung optischer Systeme das Licht in den meisten Fällen als geradliniger Strahl betrachtet wird, lassen sich manche physikalischen Eigenschaften des Lichts nur bei dessen Annahme als elektromagnetische Welle erklären. Je nach Anwendung sind entsprechend Lichtstrahlen oder Lichtwellen als Bezeichnung zu wählen. Das für den Menschen sichtbare Licht hat eine Wellenlänge von ca. 400 bis 750 nm [89]. Jede Wellenlänge im sichtbaren Bereich entspricht einer Farbe. Die Intensität des Lichts ist abhängig von der Amplitude der elektromagnetischen Wellen.

### 2.2.2. Polarisation des Lichts

Um das physikalische Prinzip der Lichtpolarisation zu verstehen muss das Licht als elektromagnetische Welle angenommen werden. Dabei definiert die Schwingungsrichtung der elektromagnetischen Transversalwelle, also der elektrische Feldvektor, die Lichtpolarisation. Natürliche Lichtquellen emittieren unpolarisiertes Licht. Dies bedeutet, dass die elektromagnetischen Lichtwellen der natürlichen Lichtwelle alle möglichen Polarisationstypen

enthalten [89]. In Abb. 2.5 sind die vier möglichen Polarisationstypen elektromagnetischer Lichtwellen in einem kartesischen Koordinatensystem anhand der Schwingungsrichtung des elektrischen Feldvektors zu sehen:

- a) *Linear polarisiertes Licht*
- b) *Zirkular polarisiertes Licht*
- c) *Elliptisch polarisiertes Licht*
- d) *Unpolarisiertes Licht*

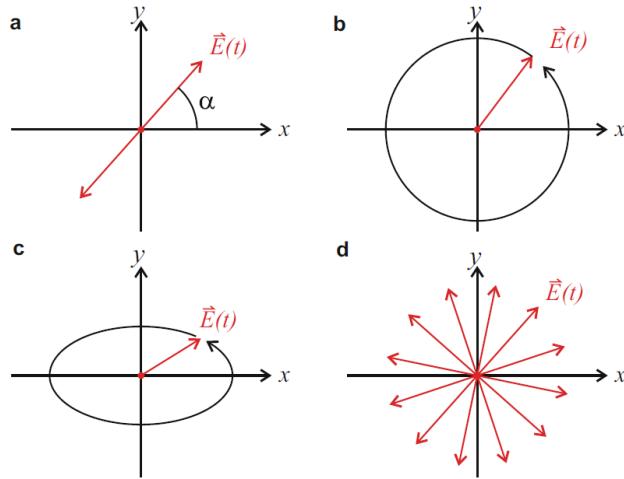


Abb. 2.5: Polarisationstypen des Lichts in Abhängigkeit des elektrischen Feldvektors [89]

Für die vorliegende Arbeit ist primär die lineare Lichtpolarisation in Abb. 2.5 a) von Bedeutung. Die Schwingungsrichtung von linear polarisierten Lichtwellen ist unidirektional und liegt entsprechend in einer zweidimensionalen Ebene. Linear polarisiertes Licht kann wiederum in drei lineare Polarisationstypen unterteilt werden. Diese linearen Polarisationstypen des Lichts sind das *s-polarisierte*, das *p-polarisierte* und das  *$\theta$ -polarisierte* Licht. Die drei linearen Polarisationstypen sind in Abb. 2.6 zu sehen. Dabei ist die Schwingungsrichtung s-polarisierter Lichtwellen vertikal bzw. orthogonal und die Schwingungsrichtung p-polarisierter Lichtwellen horizontal bzw. parallel zur Einfallsebene der sich propagierenden Lichtwellen. Entsprechend sind s- und p-polarisierte Lichtwellen um  $90^\circ$  zueinander verdreht und damit orthogonal zueinander.  $\theta$ -polarisierte Lichtwellen sind alle übrigen linear polarisierten Lichtwellen, deren Schwingungsrichtung nicht exakt vertikal oder horizontal zur Einfallsebene der Lichtwellen propagiert [36].

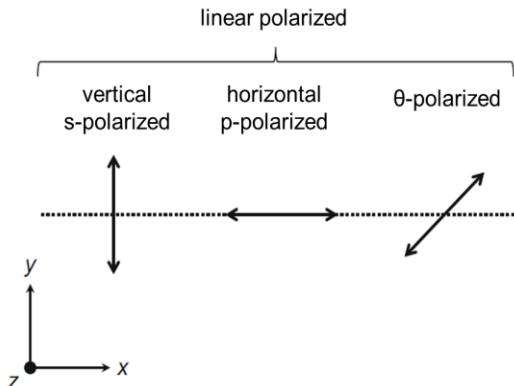


Abb. 2.6: Schematische Darstellung der Schwingungsrichtungen für s-, p- und  $\theta$ -polarisierte Lichtwellen in Abhängigkeit der Einfallsebene [36]

### 2.2.3. Reflektion und Brechung des Lichts

Die Reflektion von Lichtstrahlen ist das Zurückwerfen des Lichts von einer Oberfläche. Dabei gilt, dass der Einfallswinkel gleich dem Ausfallwinkel des Lichtstrahls ist. Wenn Licht auf den Übergang zweier transparenter Medien, *Medium 1* und *Medium 2*, mit unterschiedlichen Brechkräften auftritt, wird es in Teilen zurück in das Ausgangsmedium 1 reflektiert und in Teilen in das Medium 2 gebrochen. Der Winkel zwischen dem einfallenden Lichtstrahl aus Medium 1 und dem sich weiterführenden Lichtstrahl in Medium 2 ist abhängig von den Materialdichten der beiden Medien. Die Materialdichten bestimmen die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Lichtwellen im jeweiligen Medium.

Das Verhältnis von reflektierten zu transmittierten Lichtanteilen ist abhängig von den Materialien, dem Einfallswinkel sowie der Lichtpolarisation. Einen Spezialfall von Reflektion und Transmission zwischen zwei transparenten Medien, *Medium 1* und *Medium 2*, stellt der *Brewster-Winkel*  $\alpha_B$  dar. Der Brewster-Winkel beschreibt einen Einfallswinkel, bei welchem eine bestimmte lineare Polarisationsrichtung an der Grenzfläche zwischen Medium 1 und Medium 2 nicht reflektiert wird, sondern vollständig in das Medium 2 transmittiert. Die Berechnung des Brewster-Winkels ist in Abhängigkeit der Brechkräfte der jeweiligen Medien unter Verwendung des Snellius'schen Brechungsgesetzes möglich. Der Brewster-Winkel für die beiden Medien *Luft* ( $n_L \approx 1$ ) und *Glas* ( $n_G \approx 1,5$ ) beträgt  $\alpha_B \approx 56^\circ$ . Trifft p-polarisiertes Licht in diesem Winkel auf die Grenzfläche zwischen Luft und Glas, transmittiert das Licht vollständig in das Glas und es tritt keine Reflektion auf. Der physikalische Hintergrund dieses Phänomens ist in Abb. 2.7 zu sehen. Das p-polarisierte Licht erzeugt aufgrund der Schwingungsrichtung seiner elektromagnetischen Wellen einen anregenden Stimulus auf atomarer Ebene, welcher in einem Hertz'schen Dipol resultiert. Der Hertz'sche Dipol

interferiert destruktiv mit der eigentlich reflektierten elektromagnetischen Lichtwelle und löscht diese aus, wodurch keine Reflektion entsteht. S-polarisierte Lichtwellen erzeugen dagegen keinen Hertz'schen Dipol. Entsprechend ergibt sich auch für im Brewster-Winkel einfallendes s-polarisiertes Licht eine Reflektion [89].

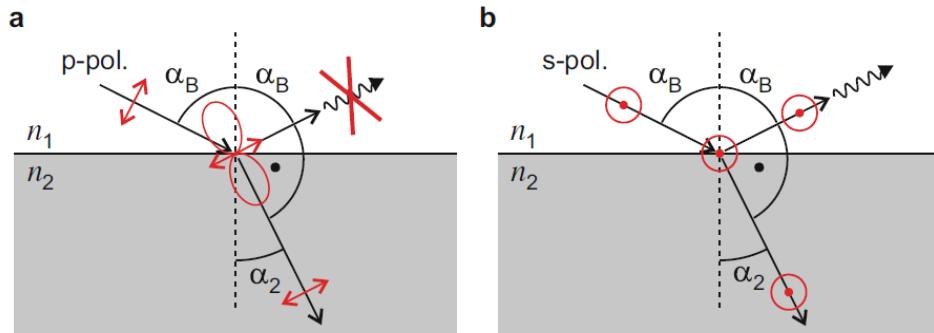


Abb. 2.7: Transmission und Reflektion im Brewster-Winkel für p-polarisiertes (a) und s-polarisiertes (b) Licht [89]

## 2.3. Das optische System Head-up Display

Das optische HUD System besteht aus den beiden Komponenten WSS und Projektor. Das optische System generiert ein virtuelles Bild, welches die Fahrer:in nach aktuellem Stand der Technik in einem Abstand von zwei bis zehn Metern zu seiner eigenen Kopfposition wahrnehmen kann. Die virtuelle Bildebene liegt entsprechend außerhalb der Fahrgastzelle und vermittelt den Eindruck über der Fahrbahn zu schweben, oder im Falle eines AR HUD, in der Umwelt positioniert zu sein bzw. Objekte zu markieren. Das virtuelle Bild entsteht auf Basis der Reflektionsoptik. Dabei treffen die vom Projektor kommenden Lichtstrahlen in einen definierten Reflektionsbereich der WSS. Ein bestimmter Anteil dieser Lichtstrahlen reflektiert von der WSS in die Richtung der Fahrer:in. Abb. 2.8 zeigt den schematischen Aufbau eines HUD Systems, inklusive eines angedeuteten Strahlengangs. Dieser hat seinen Ursprung in der Bildquelle. Die Lichtstrahlen werden jeweils an Umlenkspiegel und asphärischem Spiegel reflektiert und in die Richtung der WSS gelenkt. Ausgehend vom Sichtstrahl der Fahrer:in, ist die WSS der erste optische Spiegel im HUD System. Über das gesamte Spiegelsystem beobachtet die Fahrer:in entsprechend die Bildquelle.

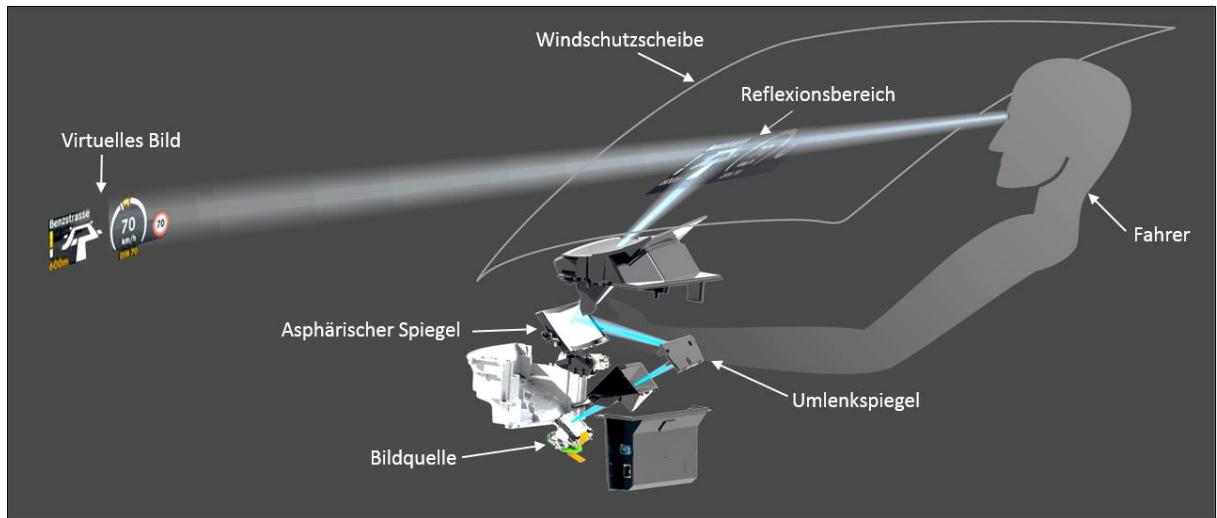


Abb. 2.8: Aufbau des HUD Systems

Abb. 2.9 illustriert die Sicht einer Fahrer:in durch eine WSS auf ein virtuelles Bild, welches durch einen HUD Projektor erzeugt wird. Anhand der schematischen Abbildung können vier maßgebliche Parameter des optischen HUD Systems erläutert werden. Beginnend auf der linken Seite in Abb. 2.9 ist der vertikale *Field of View* (FOV)  $\alpha_V$  eingezeichnet. Dieser hat seinen Ursprung in der Pupillenposition, also dem Fahrerauge, und schließt über seinen Öffnungswinkel die maximale vertikale Größe des virtuellen Bildes ein. Analog schließt der horizontale FOV  $\alpha_H$  die maximale horizontale Größe des virtuellen Bildes ein.

Die *Eyebox* ist der horizontale und vertikale Bereich möglicher Pupillenpositionen, in welchem das virtuelle Bild klar sichtbar ist, ohne dass Bildbeschnitt oder starker Kontrastverlust auftritt [38]. Die Eyebox befindet sich in der Y-Z-Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems. Das virtuelle Bild ist entsprechend nur dann sichtbar, solange sich die Augen der Fahrer:in innerhalb des begrenzten Strahlenganges des HUD befinden [11]. Die Fahrer:in hat allerdings die Möglichkeit die Position der Eyebox in vertikaler Richtung innerhalb der sogenannten *Head-Motion-Box* (HMB) einzustellen. Die Verschiebung der Eyebox innerhalb der HMB findet über die Bewegung des Umlenkspiegels oder des asphärischen Spiegels statt. In einem AR HUD System steht der Fahrer:in diese Möglichkeit in der Regel nicht, bzw. nur als digitale Positionsänderung auf der PGU, zur Verfügung. Ein AR HUD hat die Eigenschaft, dass sein virtuelles Bild, in Relation zur betrachteten Umwelt der Fahrer:in, unbewegt bleibt. Dies ist auch der Fall, wenn die Fahrer:in ihren Kopf vor und zurück, auf und ab oder links und rechts bewegt [11]. Ein manuelles Einstellen der vertikalen Bildposition durch die Fahrer:in über einen der Spiegel würde die vom AR HUD System definierte Verordnung des virtuellen Bildes in der Umwelt verändern und daher die kontaktanaloge Darstellung verschlechtern.

Die *Bildentfernung*  $l_B$  ist der Abstand zwischen Mitte der Eyebox und Mitte des virtuellen Bildes. Die absolute Höhe und Breite des virtuellen Bildes  $h_{VB}$  und  $b_{VB}$  lassen sich mit Hilfe der Bildentfernung  $l_B$ , sowie des vertikalen und horizontalen FOV  $\alpha_V$  respektive  $\alpha_H$  bestimmen:

$$h_{VB} = 2 \times l_B \times \tan \frac{\alpha_V}{2} \quad (1)$$

$$b_{VB} = 2 \times l_B \times \tan \frac{\alpha_H}{2} \quad (2)$$

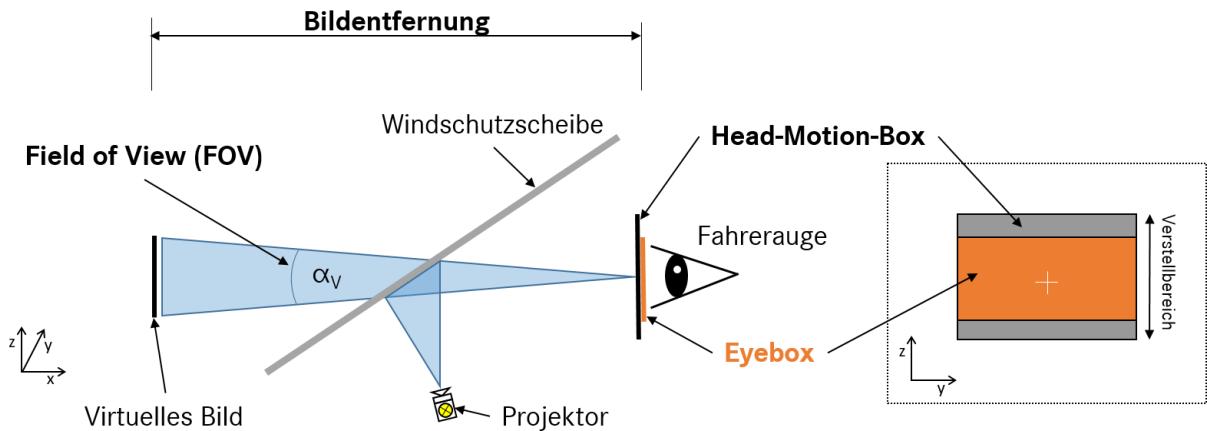


Abb. 2.9: Begrifflichkeiten des optischen HUD System

Sowohl die vier beschriebenen Parameter, als auch die sich daraus ergebende Bildgröße, werden durch die optische Auslegung des HUD Systems fest bestimmt und sind unveränderlich. Sie sind abhängig von Form, Größe, Position und Abstand der optischen Komponenten des Systems. Diese sind die Bildquelle, die beiden Spiegel des Projektors sowie die WSS.

An dieser Stelle soll keine detaillierte Beschreibung des AR HUD Systems stattfinden, da sich das grundsätzliche optische System nicht in relevantem Maße zu einem herkömmlichen HUD unterscheidet. Die Besonderheiten eines AR HUD gegenüber herkömmlichen HUD werden an entsprechend relevanten Stellen der Arbeit aufgezeigt. Die Begrifflichkeit *Augmented Reality* ist in bestehender Literatur bereits ausreichend beschrieben. Die vorliegende Arbeit orientiert sich dabei an der Definition nach Azuma [4], wonach die reale Umwelt mit virtuellen Objekten in Echtzeit erweitert wird und die virtuellen Objekte im dreidimensionalen Raum eindeutig positioniert sind. Weitere Erklärungen zu AR und der Abgrenzung zu *Virtual Reality* (VR) sind bspw. durch Dörner et al. [24] beschrieben.

### 2.3.1. Windschutzscheibe

Eine WSS im automobilen Bereich besteht immer aus Verbund-Sicherheitsglas (VSG). In der Regel setzt sie sich aus einem dreilagigen Schichtverbund zusammen, der aus zwei Scheiben und einer PVB Folie besteht (siehe Abb. 2.10). Dieser Schichtverbund hält die WSS im Crash-Fall zusammen und verhindert damit das Zerbrechen in scharfe Glasstücke. Abb. 2.10 zeigt den strukturellen Aufbau einer WSS anhand eines Zeichnungsausschnittes. Die Flächen F1 – F4 sind jeweils die Oberflächen des Außen- und Innenglases, beginnend mit der Außenfläche der WSS F1, welche frei zur Umwelt ist, endend mit der Innenfläche der WSS F4, welche frei zur inneren Fahrgastzelle ist. In der Regel haben das Innen- und Außenglas Dicken von 1,6 mm bis 2,1 mm. Dabei hat das Außenglas in den meisten Fällen eine Dicke von 1,8 mm bis 2,1 mm um bspw. Steinschlägen im Fahrbetrieb besser standzuhalten. Die von Innen- und Außenglas eingeschlossene PVB Folie hat eine Dicke von ca. 0,8 mm. Die Gesamtdicke von WSS beträgt in den meisten Fällen 4,5 mm bis 5 mm. Das Innenglas kann zur Gewichtsreduktion auch deutlich dünner, etwa mit einer Dicke von 0,6 mm, ausgeführt werden. Da solche Ausführungen in Leichtbauweise deutlich teurer sind, werden diese bisher nur in Kleinserien eingesetzt, bspw. im Mercedes-Benz AMG GT Black Series [1].

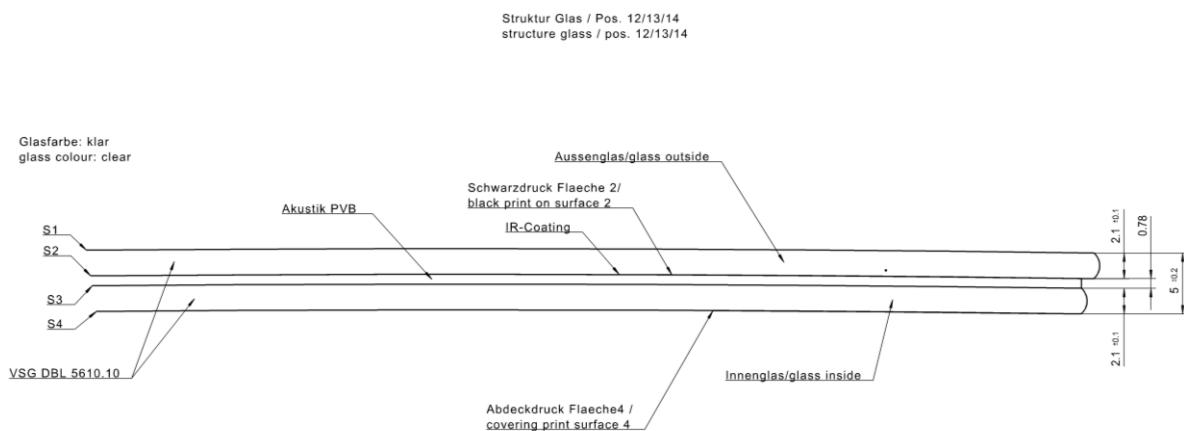


Abb. 2.10: Aufbau einer VSG-WSS

Abb. 2.11 zeigt die Explosionszeichnung einer WSS. Darin sind die verschiedenen Schichten und Einzelteile der WSS zu sehen, sowie eingezeichnete Sichtkegel und Sichtfelder. Im Gegensatz zum HUD Projektor ist die WSS nicht nur Teil des optischen HUD Systems. In das Bauteil WSS ist eine Vielzahl unterschiedlichster Funktionen integriert. Diese können in ihren Anforderungen zum Teil konträr sein. Zu den Funktionen der WSS gehören bspw. Wärmeschutz, Akustikschutz, Wischbarkeit, Form und Design, Heizbarkeit, Transmissionsoptik sowie mechanische Eigenschaften hinsichtlich Steifigkeit oder Bruchzähigkeit.

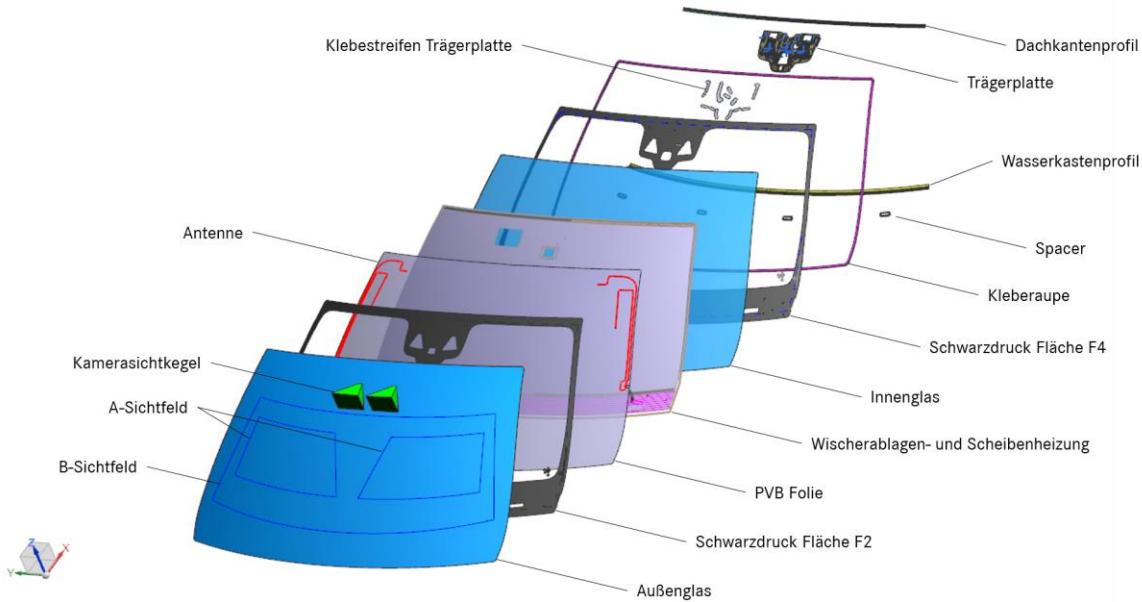


Abb. 2.11: Explosionszeichnung einer WSS

In diesem Zielkonflikt muss die WSS dennoch geometrischen Ansprüchen eines optischen HUD Systems genügen. Die Ansprüche setzen sich aus *Formgenauigkeit* und *Verbaugenaugkeit* der WSS im optischen System zusammen.

Die Formgenauigkeit der WSS wird über die Abweichung der Freiformfläche der WSS zu ihrer CAD-0-Geometrie bestimmt. Die CAD-0-Geometrie beschreibt die WSS in 3D-Daten, welche für das optische HUD System ausgelegt ist und gleichzeitig den weiteren Funktionsansprüchen der WSS genügt. Im Vergleich zu klassischen optischen Elementen, bspw. den Linsen eines Kamerasystems oder den Umlenkspiegeln eines Projektionssystems, bei welchen die zulässigen Geometrieabweichungen Nano- bis Mikrometer betragen [51], liegen die Abweichungen von WSS im einstelligen Millimeterbereich. Diese großen Abweichungen sind auf den Herstellungsprozess der WSS zurückzuführen. Die Messung der Formgenauigkeit ist über das taktile Abtasten der HUD Reflektionsfläche der WSS bzw. über die kontaktlose Deflektometrie der gesamten WSS Fläche möglich. Letztere lässt auch eine Analyse der Windschutzscheibenradien zu. Hinsichtlich HUD Anforderungen ist vor allem die Innenfläche der WSS von Bedeutung, da an dieser das Primärbild entsteht.

Abb. 2.12 zeigt mögliche taktile Messpunkte im Reflektionsbereich einer AR HUD WSS. Insbesondere Unregelmäßigkeiten der Krümmungsverläufe innerhalb des Reflektionsbereichs haben einen negativen Einfluss auf die virtuelle Bildqualität, da diese die Ausfallswinkel der einfallenden Lichtstrahlen verändern und somit Fehler im optischen System darstellen. Daher ist weniger die Lage eines einzelnen Messpunktes, sondern dessen Lage im Verhältnis zu den umgebenden Messpunkten von Bedeutung. In Abb. 2.12 ist beispielhaft die Lage des

Messpunktes F8 in Verhältnis zu seinen direkt benachbarten acht Messpunkten dargestellt. Das Messergebnis für den Messpunkt F8 ist der *Oberflächenneigungsfehler* bzw. *Slope*. Um den Slope festzustellen wird die Lage des Messpunktes F8 als CAD-0-Referenz gesetzt und die Lage der umliegenden Messpunkte der angepassten CAD-0-Lage hinsichtlich Abweichungen überprüft. Auf diese Weise kann die Feststellung der Abweichung zwischen benachbarter Messpunkte erfolgen. Die taktile Abtastung der Messpunkte ist orthogonal zur WSS-Fläche umgesetzt. Idealerweise findet die Angabe der Abweichung in Milliradian statt, da auf diese Weise eine Unabhängigkeit zum gewählten Abstand zwischen den Messpunkten gegeben ist und der Slope so eine bessere Vergleichbarkeit ermöglicht. Über den Slope zwischen benachbarten Messpunkten im Reflektionsbereich kann eine grundsätzliche Einschätzung der Formgenauigkeit erfolgen.

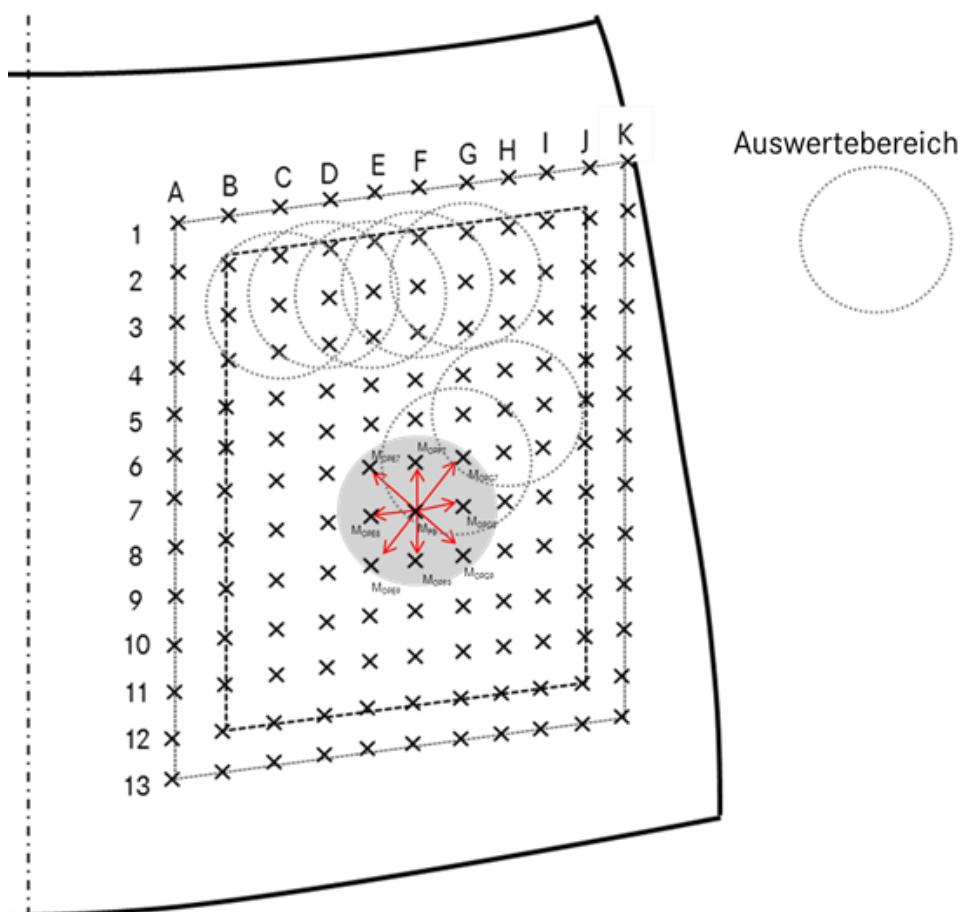


Abb. 2.12: Beispiel taktiler Messpunkte für eine AR HUD WSS zur Bestimmung ihrer Formgenauigkeit

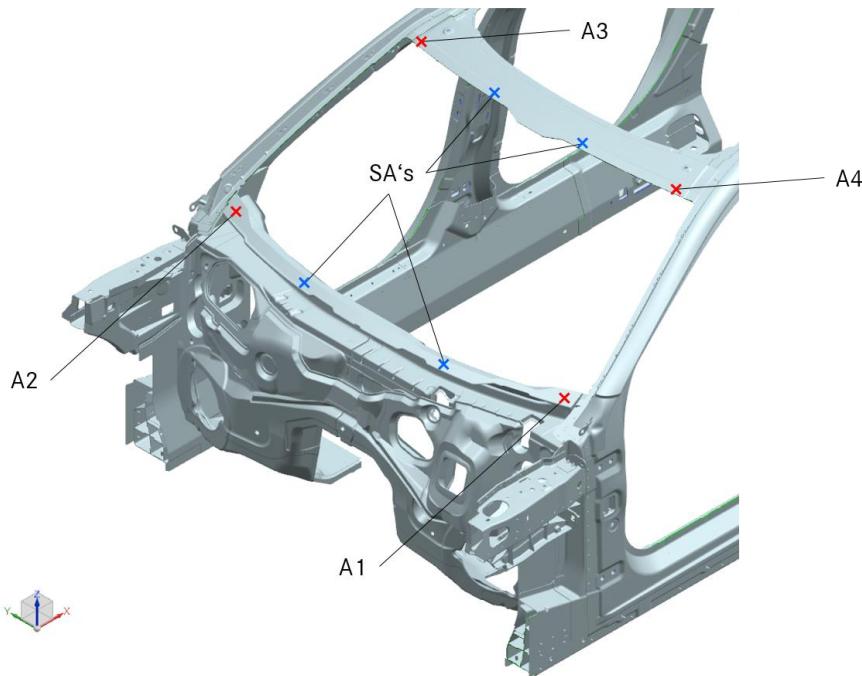
Die Produktion einer WSS enthält verkürzt die folgenden Prozessschritte:

- Zuschneiden des Flachglases
- Aufbringen von Schwarzdruck

- Erhitzen des Glases auf Biegetemperatur
- Biegen des Glases
- Abkühlen des Glases
- Laminieren von Innen- und Außenglas mit einer PVB Folie
- Komplettieren der laminierten Scheibe mit Trägerplatte und Profilen

Die letztendliche Formgenauigkeit der WSS ist abhängig von einer Vielzahl unterschiedlicher Parameter des Herstellungsprozesses. Darunter fallen z.B. die Aufheizung des Glases (abhängig von Ofen, Schwarzdruck, Glasbeschichtung, etc.), Biegewerkzeug (Geometrie, Anpressdruck, Anpressgeschwindigkeit, Anpresszeit), Abkühlphase (direkte Kühlung über Gebläse oder indirekte Kühlung), Ausgestaltung der Transportrollen für flaches und gebogenes Glas, Autoklave zur Lamination (Verlauf von Druck und Temperatur über die Zeit) sowie weiteren Einflussparametern. Verantwortung und Know-how zur Erreichung der Formgenauigkeit liegt bei den Windschutzscheibenlieferanten.

Die Bestimmung der Verbaugenaugkeit erfolgt über den Vergleich der WSS-Soll-Position nach CAD-0 zur WSS-Ist-Position im verbauten Zustand im Fahrzeug. Neben den Anforderungen für Design und Akustik hinsichtlich Spaltmaß und Übergang zum Dach, sind zur Erfüllung der HUD Anforderungen vor allem die translatorischen und rotatorischen Abweichungen der HUD Reflektionsfläche von Bedeutung. Diese translatorischen und rotatorischen Abweichungen der HUD Reflektionsfläche verändern den optischen Strahlengang des HUD Systems und können so zu Abbildungsfehlern führen. Die Messung dieser Abweichungen findet an definierten Punkten im Auflagebereich der WSS statt. Zum einen ist hierdurch eine Referenz zur Scheibenauflage der Rohkarosse gegeben und zum anderen besitzt die WSS in diesem Bereich Schwarzdruck, wodurch neben einer taktilen Messung auch eine Messung mittels Laserscanning möglich ist. Abb. 2.13 bildet die relevanten Messpunkte der Scheibenauflage der Rohkarosse ab. Die gewählten Messpunkte befinden sich immer an den Spacerposition. Die äußeren roten Messpunkte A1 – A4 sind die Basis zur Bestimmung der WSS-Rotation. Die vier Messpunkte in blau sind die weiteren Positionen für die Spaceraufnahmen (SA) und in Richtung Y0 gerückt.



**Abb. 2.13: Rohbaumesspunkte zur Bestimmung von Lage und Verbaugenaugkeit der WSS**

Für die Messung der Verbaugenaugigkeit müssen zusätzlich Informationen zu Lage und Form der Rohkarosse des Fahrzeuges, insbesondere der Scheibenaufnahme, bekannt sein. Entsprechend muss sich das Messsystem im ersten Schritt in das Fahrzeugkoordinatensystem einmessen. Die Einmessung erfolgt über definierte Messpunkte der Rohkarosse. Die Bestimmung der je Fahrzeug individuellen WSS-Soll-Lage erfolgt mit Hilfe von messtechnischen *Best-Fit* Methoden [77]. Dies ermöglicht die Berücksichtigung von Abweichungen der Rohkarosse und entsprechend eine bessere Bestimmung der Lageabweichung von WSS zu Projektor. In Abhängigkeit der geforderten Verbaugenaugigkeit und entsprechender Toleranzen, können WSS sowohl von Hand, als auch automatisiert mit Robotern verbaut werden. Die WSS wird in beiden Fällen mit der Rohkarosse verklebt. Der Handverbau kann mit Hilfe einfacher Saugheber erfolgen. Sind die Toleranzanforderungen höher, kann ein individueller Fügerahmen verwendet werden, welcher ein gleichmäßiges Eindrücken der WSS ermöglicht und damit einen präziseren, spannungsfreien Handverbau der WSS zulässt. Geringste Toleranzen lassen sich mit einem automatisierten Verbau erreichen. Vor dem Einkleben der WSS kann sich das System durch Laserscanning in das Fahrzeugkoordinatensystem der Rohkarosse einmessen und so unter Anwendung der Best-Fit Methode Toleranzen der Scheibenaufnahme korrigieren. Im Idealfall erfolgt der automatisierte Verbau unter Verwendung eines weg- und kraftgesteuerten Industrieroboters.

Durch die Funktion der WSS als Spiegel im optischen HUD System, verschärfen sich schlussfolgernd die Toleranzanforderungen sowohl an deren Geometrietreue, als auch an deren Verbau im Fahrzeug.

### 2.3.2. Projektor

Der HUD Projektor enthält neben der bildgebenden Einheit zwei Spiegel. Die bildgebende Einheit wird ebenfalls als *picture generating unit* (PGU) bezeichnet und enthält bei allen Baureihen der Mercedes-Benz AG ein *liquid crystal display* (LCD) oder *digital micromirror device* (DMD) als Anzeigeelement. Die Spiegel dienen dem Erstellen der optischen *Bildtiefe*, der *Vergrößerung* des virtuellen Bildes, sowie der *verzerrfreien Darstellung* der Anzeigeninhalte. Da jede Baureihe eine individuelle WSS mit individueller Geometrie und entsprechender Freiformfläche besitzt, müssen auch die Spiegel des Projektors für jede Baureihe auf die Geometrie der WSS ausgelegt werden. Zusätzlich ist eine Auslegung der Spiegel für beide Lenkungsvarianten, also Linkslenker (LL) und Rechtslenker (RL), nötig. Über die beiden Spiegel des HUD Projektors wird der Weg, welchen die Lichtstrahlen zurücklegen müssen, verlängert. Dadurch erscheint der Fahrer:in das virtuelle Bild weiter entfernt. Ein asphärischer Spiegel hat zwei weitere Funktionen. Zum einen vergrößert er das virtuelle Bild durch seinen optischen Vergrößerungsfaktor. Zum anderen bildet er das passende optische Gegenstück zur Freiformfläche der WSS und sorgt damit für möglichst verzerrfreie Anzeigeninhalte im virtuellen Bild. Dies ist nur über den Einsatz eines asphärischen Spiegels möglich.

Bereits kleinste Fehler in den Spiegeln führen zu starken lokalen oder globalen Abbildungsfehlern. Daher werden extrem hohe Anforderungen an die Fertigungspräzision gestellt. Zulässige Abweichungen liegen in der Regel unter fünf Mikrometern [51], bei Projektoren für AR HUD sogar im dreistelligen Nanometerbereich. Wie der Name schon zu verstehen gibt, ist die Ausführungsform des asphärischen Spiegels eine Asphäre. Der Umlenkspiegel dagegen kann sowohl als flacher als auch asphärischer Spiegel ausgeführt werden. Um die strengen Toleranzanforderungen in der Spiegelproduktion zu erreichen, kommt ein Spritz-Prägeverfahren mit komplexen Werkzeugen zum Einsatz (Heizkreisläufe und Sensorik zur Kontrolle der Kunststoffschrumpfung). Diese Spiegelrohlinge aus Kunststoff (z.B. Cyclo-Olefin-Copolymer) werden anschließend beschichtet, um so eine reflektierende Spiegeloberfläche herzustellen [87].

Während der große asphärische Spiegel in der Regel als normaler Reflektor mit einer Aluminiumbeschichtung operiert, kommt der kleinere Umlenkspiegel auch als Kaltspiegel zum Einsatz. Ein Kaltspiegel reduziert den Hitzeeintrag durch Sonneneinstrahlung, da dieser die Wellenlängen des sichtbaren Lichts reflektiert, aber Wellenlängen im Infrarotbereich transmittiert. Auf diese Weise schützt er die PGU vor Hitzeschäden. Die Produktion und der Zusammenbau der optomechanischen Komponenten erfolgt teilautomatisiert in einer staubarmen Umgebung. Wie die Produktion, muss auch der Zusammenbau der optischen Elemente präzise erfolgen. Abweichungen führen auch in diesem Fall zu Abbildungsfehlern.

Analog zur WSS, ist die Verbaugenaugkeit des Projektors ebenfalls entscheidend um schlussendlich ein kundentaugliches virtuelles Bild zu erhalten. Erneut sind translatorische und rotatorische Abweichungen der Einbaulage des Projektors verantwortlich für Abbildungsfehler, da die Strahlengänge im optischen HUD System verändert werden. Der Projektor ist im Cockpitquerträger verschraubt. Dieser wird in der Rohkarosse des Fahrzeuges angebracht. Entsprechend addieren sich hier sowohl die Bauteil- als auch Verbautoleranzen von Rohkarosse, Fahrzeugquerträger und Projektor. Da der Projektor vormontiert im Querträger ist und samt der Instrumententafel in das Fahrzeug eingebaut wird, kann keine einfache Messung der Verbaugenaugigkeit stattfinden. Grund dafür ist, dass die Messung der Verbaugenaugigkeit des Projektors ausschließlich über das taktile Abtasten seiner Schraubpunkte erfolgt. Daher ist eine strenge Festlegung und Kontrolle der Toleranzkette für die optischen Komponenten eines HUD nötig.

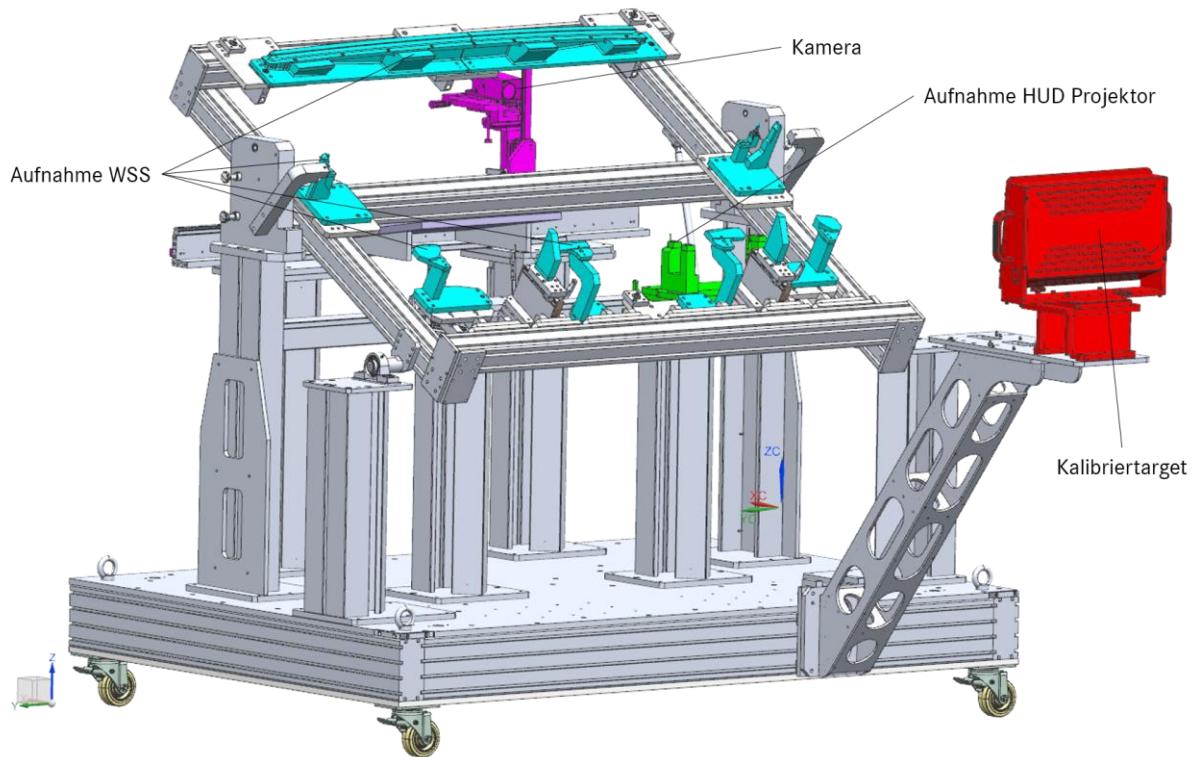
Die abschließende Gesamtprüfung des HUD Systems erfolgt *end-of-line*, also am fertiggestellten Gesamtfahrzeug. Dabei analysiert die Prüfung das virtuelle Bild hinsichtlich Abbildungsfehlern und deren Ausprägung. Aufgrund der engen Toleranzkette für die Positionierung der optischen Komponenten kommt für Untersuchungen in der Entwicklung ein HUD Prüfstand zum Einsatz, welcher eine genaue Positionierung erlaubt und im folgenden Abschnitt detailliert beschrieben ist.

### 2.3.3. HUD Prüfstand

Der HUD Prüfstand (Abb. 2.14) dient der Kontrolle der virtuellen Bildqualität eines HUD Systems. Abb. 2.14 zeigt den HUD Prüfstand der Mercedes-Benz AG, welcher für die Untersuchungen in vorliegender Arbeit verwendet wird. Mit Hilfe des Prüfstands lässt sich insbesondere die Qualität von HUD WSS bewerten. Der Prüfstand findet sowohl für

Untersuchungen in der Serienentwicklung, als auch weiteführenden Untersuchungen neuartiger HUD Konzepte und grundlegender Forschung Verwendung.

Die Aufnahmen für WSS und Projektor ermöglichen die Montage der optischen Komponenten in CAD-0-Lage, also ohne Verbautoleranzen. Die zulässigen Toleranzen der verschiedenen Aufnahmepunkte des Prüfstands für WSS und Projektor betragen  $\pm 0,2$  mm in X-Y-Z-Richtung des Fahrzeugkoordinatensystems. Die in Abb. 2.14 gekennzeichneten Aufnahmen für WSS (türkis) und HUD Projektor (grün) sind flexibel austauschbar. Daher ist es möglich mit diesem einzigen Prüfstand, sowie entsprechenden Wechselteilen für die Aufnahme von WSS und Projektor, alle Baureihen mit HUD der Mercedes-Benz AG zu untersuchen.



**Abb. 2.14: Entwicklungsprüfstand für HUD WSS der Mercedes-Benz AG**

Nach Anbringung der beiden Komponenten WSS und Projektor am Prüfstand, können durch die Ansteuerung des Projektors beliebige Testbilder angezeigt werden. Abb. 2.15 zeigt das Testbild zur Bewertung der virtuellen Bildqualität. Die Anordnung der Zeilen und Spalten für die darin enthaltenen Messpunkte ist äquidistant. Jedes in Abb. 2.15 zu sehende Quadrat entspricht einem Messpunkt.

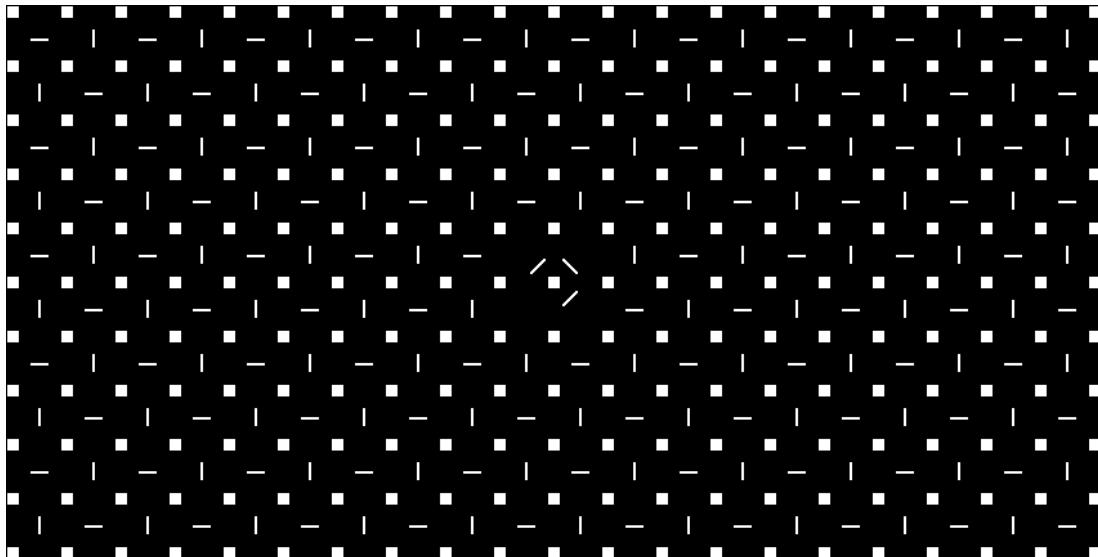


Abb. 2.15: Testbild zur Bewertung der virtuellen Bildqualität eines HUD

Da die Spiegel des optischen HUD Systems nicht ausschließlich flach, sondern als Freiformflächen ausgeführt sind, erscheint das virtuelle Testbild verzerrt. Um ein verzerrungsfreies virtuelles Bild zu erhalten muss daher das Eingabe-Testbild vorverzerrt werden (Abb. 2.16). Diese Verzerrung vorab wird als *Warping* bezeichnet. In einem HUD System ohne Form- und Positionsabweichungen der Spiegel könnte durch Eingabe eines *gewarpten* Testbilds ein verzerrungsfreies virtuelles Bild dargestellt werden. Da jede Baureihe eine individuelle WSS mit individueller Geometrie und entsprechender Freiformfläche besitzt, müssen auch die Spiegel des Projektors für jede Baureihe und jeweilige Lenkungsvariante auf die Geometrie der WSS ausgelegt werden. Folglich ist auch das Warping des Testbildes, bzw. im realen Fahrbetrieb das Warping aller Bildinhalte, spezifisch auf jede Baureihe auszulegen. In Abb. 2.16 ist beispielhaft das gewarpte LL-Testbild der Baureihe W223 (Mercedes-Benz S-Klasse 2020) dargestellt.

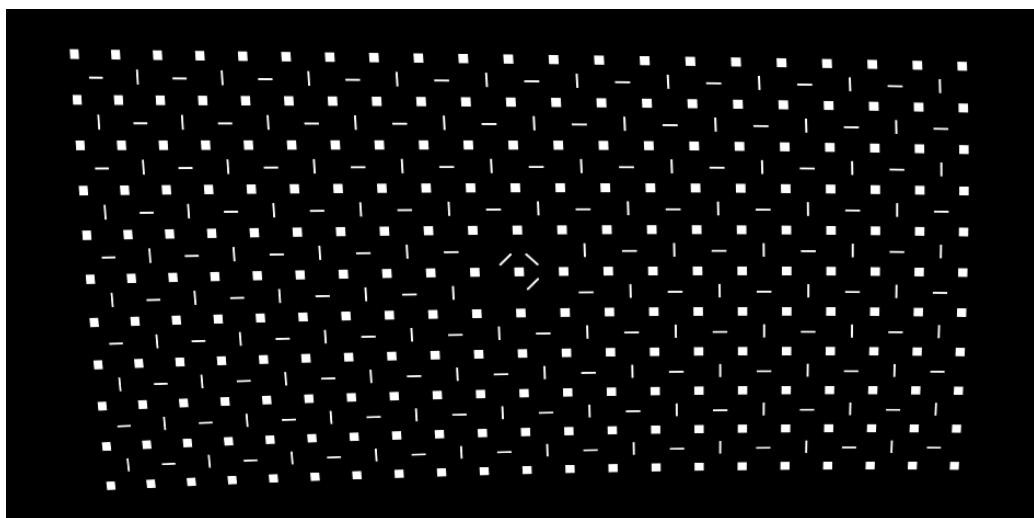


Abb. 2.16: Gewarptes LL-Testbild für die Baureihe W223

Die Messpunkte des Testbilds sind in insgesamt 21 Spalten und elf Zeilen angeordnet. Anhand ihrer orthogonalen Anordnung lassen sich globale und lokale Unregelmäßigkeiten im virtuellen Bild erkennen. Die horizontalen und vertikalen Marken des Testbildes ermöglichen zudem die Beurteilung des Doppelbildes (Ghost). Damit ist das virtuelle Testbild die Basis zur Bestimmung von Abbildungsfehlern im virtuellen Bild (siehe Abschnitt 2.4.).

Die Ansteuerung des Projektors am Prüfstand erfolgt mittels einer Restbussimulation (RBS) in der Software Vector® CANoe. Die RBS simuliert alle relevanten Fahrzeugsignale, welche für die Ansteuerung des Projektors notwendig sind und im Fahrzeug, bspw. über das Kombi-Instrument, an den Projektor gesendet werden. Entsprechend lassen sich mithilfe der RBS auch Befehle für Zustände des Projektors, wie z.B. Helligkeit oder Spiegelposition, übermitteln. Die Diagnose und Signalübertragung findet mittels CAN statt. Neben der Übertragung von Fahrzeugsignalen, erfolgt auch die Authentifizierung des signalgebenden Steuergerätes via CAN. Die Authentifizierung ggü. dem Projektor ist auch am Prüfstand notwendig und wird ebenfalls über die RBS durchgeführt. Die Übertragung des Videosignals ist am HUD Prüfstand über eine *Image Box* der TZ Electronic Systems GmbH umgesetzt und findet via *High Speed Video Link* (HSVLink) statt. Die Image Box übernimmt dabei auch das Warping des Testbilds, sodass ausschließlich durch die Komponenten verursachte Abweichungen bewertet werden können.

Die beschriebenen Maßnahmen ermöglichen am Prüfstand sowohl Bewertungen mittels Messsystem, als auch subjektive Bewertungen. Das Messsystem besteht aus Kamera und Auswertesoftware. Die Kamera kann innerhalb der HMB an definierten Positionen fixiert werden und jeweils Fotos vom virtuellen Testbild aufnehmen. Abb. 2.17 zeigt eine mögliche Anordnung der Kamerapositionen zur Bewertung eines AR HUD, inklusive der Positionsbezeichnungen. Jede Kameraposition entspricht einer möglichen Augposition. Der Vergleich von virtuellen Testbildern aus zwei Kamerapositionen ermöglicht die Bewertung stereoskopischer Abbildungsfehler und repräsentiert damit die stereoskopische, menschliche visuelle Wahrnehmung (siehe Abschnitt 2.4.3).

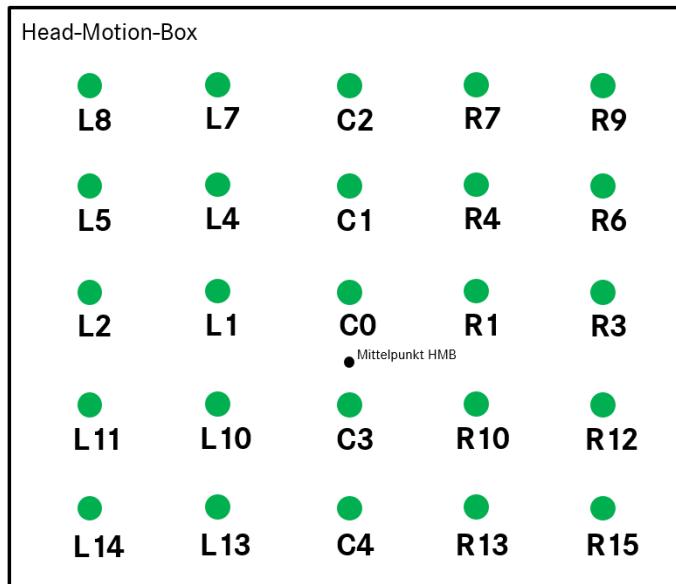


Abb. 2.17: Kamerapositionen und Positionsbenennung für die Aufnahme virtueller Testbilder

Die Bestimmung der Abbildungsfehler findet in der Auswertesoftware der Firma Gefasoft® statt. Die Software enthält ein Bildverarbeitungstool, welches die Positionen der Punkte des virtuellen Bildes erkennt und exakt in Fahrzeugkoordinaten wiedergibt. Das Messsystem ermöglicht zudem die Bestimmung von Abweichungen der tatsächlichen Punktpositionen über einen Soll-Ist-Vergleich. Die Bestimmung dieser Abweichungen ist dank einer Kalibrierung des Messsystems möglich. Diese umfasst die intrinsische und extrinsische Kalibrierung der Kamera. Die intrinsische Kalibrierung der Kamera ist notwendig um Verzeichnungsfehler der Kameraoptik, inkl. Positionierungs- und Umrechnungsfehler des CCD-Chips, zu korrigieren. Auf diese Weise können den zweidimensional angeordneten Pixeln des CCD-Chips Punkte in einem dreidimensionalen Raum zugeordnet werden. Die intrinsische Kalibrierung sollte im besten Fall direkt in der korrekten Fokusebene, also äquivalent zur Projektionsdistanz, stattfinden. Die extrinsische Kalibrierung der Kamera dient ihrer Verordnung im Fahrzeugkoordinatensystem, also ihrer Position und Orientierung. Zur Durchführung der extrinsischen Kalibrierung am HUD Prüfstand müssen die exakten Positionen der Kamera und der verwendeten Kalibrierplatte im Fahrzeugkoordinatensystem bekannt sein. Die Kalibrierplatte besteht aus einem hochpräzise gefertigtem Blech und ist hinterleuchtet. Unter Verwendung einer HALCON®-Prozedur kann die genaue räumliche Verordnung der Kamera im Fahrzeugkoordinatensystem erfolgen.

Mit Hilfe dieser Maßnahmen kann letztendlich die Zuordnung eines jeden Pixels des zweidimensionalen CCD-Chips zu Punkten im dreidimensionalen Fahrzeugkoordinatensystem

stattfinden. Die Kalibrierung ermöglicht entsprechend die Umrechnung der Kamerapixel in SI-Einheiten.

Liegen dem Messsystem die Kalibrierergebnisse vor, kann die Aufnahme von virtuellen Testbildern erfolgen. Durch das Bereitstellen der Sollkoordinaten der Messpunkte des virtuellen Testbilds und einem Soll-Ist-Vergleich kann schließlich die Berechnung von Abbildungsfehlern im virtuellen Bild durchgeführt werden. Die Berechnung findet innerhalb der Messsoftware statt. Die benötigten Algorithmen werden in einer *dynamic link library* (DLL) zur Verfügung gestellt. Die Berechnung der Abbildungsfehler ist im folgenden Abschnitt 2.4 beschrieben.

Die korrekte Aufnahme von Projektor und WSS, das Warping der Bildinhalte und die Kalibrierung des Messsystems ermöglichen gemeinsam die korrekte Bestimmung der Abbildungsfehler, welche schlussendlich auf Formabweichungen der WSS oder der Projektorspiegel zurückzuführen sind.

## 2.4. Abbildungsfehler im virtuellen Bild eines AR HUD

In diesem Abschnitt werden die Abbildungsfehler des virtuellen Bildes eines AR HUD beschrieben, welche auf die Komponenten des optischen Systems zurückzuführen sind. Der Fokus liegt dabei auf Abbildungsfehlern, welche durch die WSS hervorgerufen werden. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt hauptsächlich die Untersuchung monochromatischer Aberrationen, der Fokus liegt auf Verzeichnungen.

Abbildungsfehler im virtuellen Bild können von Fahrer:innen als störend empfunden werden und entsprechend den Kundennutzen eines HUD einschränken. Eine schlechte Bildqualität des HUD beeinträchtigt nicht nur das Kundenerlebnis, bspw. durch empfundene Verzerrung oder Unschärfe, sondern kann zu einer Erhöhung der kognitiven Belastung der Fahrer:in führen und damit vom eigentlichen Fahrgeschehen ablenken oder Fehlinterpretationen auslösen.

Um die entstehenden Abbildungsfehler eines AR HUD beschreiben zu können ist zunächst eine kurze Einordnung der Fehlerursachen im Augmentierungsprozess vorzunehmen und anschließend die Definition der Fehlerarten für Abbildungsfehler in dieser Arbeit festzulegen. Nach Dörner et al. [24], welche sich auf *Video See-Through Systeme* beziehen, finden folgende Schritte im Augmentierungsprozess statt:

1. Videoaufnahme der realen Umwelt

2. Tracking der Umweltobjekte und Pupillenposition
3. Registrierung der virtuellen Inhalte in der realen Umwelt
4. Darstellung der virtuellen Inhalte auf Basis gesammelter Informationen
5. Ausgabe der augmentierten Bildinhalte mit Hilfe eines Ausgabegerätes

In allen genannten Schritten können Abbildungsfehler entstehen. Ein Beispiel für Abbildungsfehler eines AR HUD ist der Registrierungsfehler. Dieser tritt ein, wenn die Nutzer:in die virtuellen Inhalte nicht an der korrekten Position wahrnimmt. Holloway [46,47] hat am Beispiel einer Eingriffsplanung in der kraniofaszialen (Gesichtsschädel) Chirurgie Registrierungsfehler von AR Systemen beschrieben und eine Kategorisierung der Fehlerursachen vorgenommen. Die Kategorisierung nach Holloway [47] lautet wie folgt:

1. Acquisition/Alignment Error: Fehler bei der Datenerfassung (Umwelt) und anschließender Positionierung der virtuellen Bildinhalte
2. Headtracking Error: Fehler bei der Lageerfassung des HMD (entspricht Lageerfassung des HUD Systems, also Fahrzeuglage, in Referenz zur Umwelt)
3. Display Error: Fehler bei der technischen Ausgabe des Bildes
4. Viewing Error: Fehler bei der Lageerfassung der Anwender:in (Pupillenpositionen)

Die in diesem Abschnitt erläuterten Abbildungsfehler des virtuellen Bildes im AR System, welche auf die optischen Komponenten der Bildausgabe bezogen sind, befinden sich nach Dörner et al. [24] im fünften Augmentierungsprozessschritt der *Ausgabe* und können nach Holloway [47] als *Display Error* kategorisiert werden.

Azuma [3] unternimmt außerdem eine Einteilung in *statische* und *dynamische* Abbildungsfehler. Demnach sind *statische* Abbildungsfehler solche, welche auftreten, wenn die Anwender:in sich nicht bewegt. *Dynamische* Abbildungsfehler sind entsprechend diejenigen, welche auftreten, wenn sich die Anwender:in bewegt und deren Augposition sich ändert.

Im *Modell zur Taxonomie von Registrierungsfehlern* nach Sadovich [81] findet eine ganzheitliche Kategorisierung von Registrierungsfehlern im AR HUD statt, welche den einzelnen Schritten im Augmentierungsprozess zugeordnet werden. Dieses Modell orientiert sich an Dörner et al. [24] und ist um den Prozessschritt *Wahrnehmung und Verarbeitung* ergänzt. Das Modell kann auch auf weitere Abbildungsfehler übertragen werden. Damit kann

eine Zuordnung der optischen Abbildungsfehler eines AR HUD zur Bildausgabe erfolgen, also dem HUD Projektor (PGU und Spiegel) und der WSS.

In der Literatur sind unterschiedliche Einordnungen und Kategorisierungen für die Abbildungsfehler in AR Systemen zu finden. In dieser Arbeit werden die Abbildungsfehler in drei Fehlerarten eingeteilt und lassen sich diesen jeweils zuordnen:

- *Globale und lokale Abbildungsfehler*
- *Monoskopische und stereoskopische Abbildungsfehler*
- *Statische und dynamische Abbildungsfehler*

**Globale** und **lokale** Abbildungsfehler sind immer *monoskopisch* und *statisch*, wobei globale Abbildungsfehler den durchschnittlichen Fehler des gesamten virtuellen Bildes betrachten und lokale Abbildungsfehler die Standardabweichung oder Maximalabweichung innerhalb des gesamten Bildes untersuchen.

**Monoskopische** und **stereoskopische** Abbildungsfehler beschreiben monokulare und binokulare optische Artefakte. Übertragen auf das HUD sind diese entsprechend die Betrachtung des virtuellen Bildes mit einem Auge bzw. mit beiden Augen. Die Betrachtung stereoskopischer Abbildungsfehler im HUD ist in der Literatur bisher nicht vertreten, spielt aber für immer größer werdende virtuelle Bilder mit entsprechend größeren Reflektionsbereichen auf der WSS, eine wichtige Rolle. Hintergrund ist, dass linkes und rechtes Auge aufgrund ihres horizontalen Abstands von ca. 65 mm zwei unterschiedliche virtuelle Bilder sehen, und daher der jeweilige Reflektionsbereich auf der WSS horizontal verschoben ist. Die beiden Reflektionsbereiche können aufgrund der freiformflächigen Gestaltung der WSS für linkes und rechtes Auge unterschiedlich im Raum liegen und unterschiedliche Krümmungsradien besitzen. Zu den Aufgaben der asphärischen Spiegel im Projektor gehört daher auch die Kompensation dieser unterschiedlichen Reflektionsbereiche für linkes und rechtes Auge, mit dem Ziel beiden Augen ein möglichst gleich geformtes Bild in gleicher Position zur Verfügung zu stellen. Die Berechnung monoskopischer Abbildungsfehler erfolgt dementsprechend auf Basis *einer* Aufnahme des virtuellen Bildes aus *einer* Kameraposition, wohingegen stereoskopische Bildfehler auf *zwei* Aufnahmen des virtuellen Bildes aus *zwei* Kamerapositionen basieren.

Die Definition **statischer** und **dynamischer** Abbildungsfehler ist an Azuma [3] angelehnt und wird zusätzlich ergänzt um den Fall dynamischer Anzeigeninhalte. Statische Abbildungsfehler

treten auf, wenn weder die Anzeigeninhalte noch die Betrachter:in in Bewegung sind. Beispielhaft wäre die Darstellung einer Symbolik im virtuellen Bild, etwa eines Verkehrszeichens, welches die Fahrer:in ohne Bewegung betrachtet. Dynamische Abbildungsfehler dagegen treten auf wenn die Anzeigeninhalte, die Fahrer:in oder beide zuvor genannten in Bewegung sind. Ein dynamischer Anzeigeninhalt im AR HUD ist bspw. ein sich bewegender Navigationshinweis (siehe Abb. 1.2), da der Anzeigeninhalt sich innerhalb des virtuellen Bildes, und damit im Reflektionsbereich der WSS, bewegt. Bei einer Kopfbewegung der Fahrer:in und damit ihrer Augposition, können ebenfalls dynamische Abbildungsfehler auftreten, da sich der betrachtete Reflektionsbereich auf der WSS verändert. Sowohl statische als auch dynamische Abbildungsfehler können bei monoskopischer und stereoskopischer Betrachtung auftreten. Die detaillierte Beschreibung der in dieser Arbeit untersuchten Abbildungsfehler für ein HUD, sowie weitere Beispiele für die verschiedenen Fehlerarten und worauf diese zurückzuführen sind, befinden sich in den folgenden Abschnitten 2.4.1 bis 2.4.4. Die exakten Algorithmen sind aus Gründen der Geheimhaltung nicht aufgeführt.

Die Analyse der Abbildungsfehler findet wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben am HUD Prüfstand statt. Das Messsystem ermöglicht die exakte Lagebestimmung eines jeden Punktes des virtuellen Bildes in Fahrzeugkoordinaten. Unter Anwendung eines Soll-Ist-Vergleichs für das virtuelle Bild ist die Berechnung der Abbildungsfehler möglich. Die Messgrößen der in dieser Arbeit verwendeten Abbildungsfehler sind unabhängig von der Projektionsdistanz. Daher werden die Größen hauptsächlich in Grad [°], Milliradian [mrad] oder als arithmetisches Verhältnis angegeben. Die Wahl dieser Messgrößen ermöglicht das Aufstellen der Verbindung zwischen der Wahrnehmung und Auflösung des menschlichen visuellen Systems mit den gemessenen Abbildungsfehlern durch das Messsystem. Zur Beschreibung der mathematischen Bestimmung der Abbildungsfehler wird folgend wieder der Begriff IQN eingesetzt. Da sich die Fehlerarten der unterschiedlichen Abbildungsfehler überschneiden, werden diese derjenigen Fehlerart zugeordnet, welche ihrer Ausprägung und der subjektiven Wahrnehmung am besten entspricht.

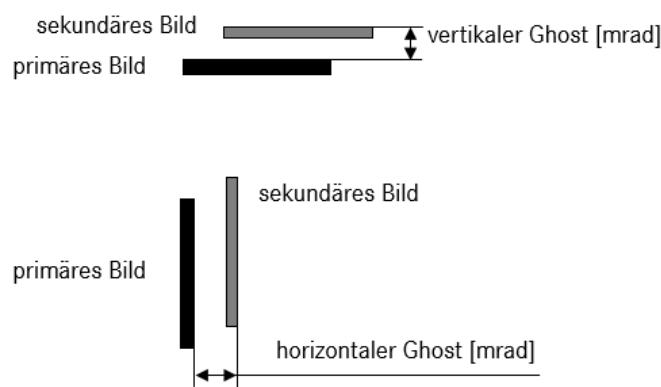
#### 2.4.1. Globale Abbildungsfehler

Die globalen Abbildungsfehler beschreiben durchschnittliche Verzeichnungsfehler des gesamten virtuellen Bildes. Die entsprechenden IQN sind als arithmetisches Mittel der Abweichungen aller Punkte des virtuellen Testbildes angegeben. Die IQN für globale Abbildungsfehler bewerten jeweils die Aufnahme des virtuellen Testbildes aus einer

Kameraposition (siehe Abb. 2.17) und entsprechen der Zuordnung nach Fehlerarten globalen, monoskopischen und statischen Abbildungsfehlern. Darunter fallen für ein AR HUD Doppelbildfehler, Steigungsfehler, Bildgrößenfehler und Registrierungsfehler. Die verschiedenen Abbildungsfehler, sowie deren Berechnungsgrundlage für die IQN, sind folgend beschrieben.

## Globale Doppelbildfehler

Das Auftreten eines Doppelbildfehlers in einem automobilen HUD kann nicht verhindert werden. Grund für das Auftreten des Doppelbildes ist die Reflektion der Lichtstrahlen an Innen- und Außenseite der WSS, also beim Eintreten der Lichtstrahlen an Fläche F4 und beim Austreten an Fläche F1. Dabei ist das an der Innenfläche F4 entstehende virtuelle Bild heller und wird als primäres Bild bezeichnet. Das, an der Außenfläche F1, entstehende virtuelle Bild wird als sekundäres Bild bzw. Ghost bezeichnet. Die Fahrer:in nimmt den Ghost in der Regel als unscharfe Darstellung wahr. Es findet eine Unterscheidung zwischen horizontalem und vertikalem Ghost statt. Die Bestimmung des Doppelbildfehlers findet über die horizontalen und vertikalen Marken im Testbild statt (Abb. 2.15). In Abb. 2.18 ist die Nomenklatur für vertikalen und horizontalen Ghost zu sehen. Der Messwert bildet sich aus dem Durchschnitt des Ghost über alle Marken und die Angabe des Doppelbildfehlers erfolgt in Milliradian [mrad]. Der horizontale Ghost ist in der Regel sehr klein, da der horizontale Einfallswinkel der Lichtstrahlen auf die WSS bei nahezu  $90^\circ$  liegt. Daher entsteht nur eine geringe Ablenkung des Lichtstrahls. Entsprechend sind keine zusätzlichen Maßnahmen für das Minimieren des horizontalen Ghost notwendig.



**Abb. 2.18: Prinzipdarstellung des vertikalen und horizontalen Ghost**

Die Kompensation des vertikalen Ghost erfolgt über den Einsatz einer keilwinkeligen PVB-Folie, der Keilwinkelfolie. Der Keilwinkel ist in vertikaler Richtung eingesetzt und öffnet sich damit von Windschutzscheibenunterkante zur Windschutzscheibenoberkante. Folglich ist die

Keilwinkelfolie, und damit auch der gesamte Windschutzscheibenverbund, an der Windschutzscheibenunterkante dünner als an der Windschutzscheibenoberkante. Dazwischen nimmt die Dicke der Keilwinkelfolie entsprechend kontinuierlich zu. Auf diese Weise entsteht eine dem Keilwinkel entsprechende Verkippung von Außenglas zu Innenglas und damit eine Verkippung der Reflektionsflächen F4 und F1. Dadurch verändert sich der Strahlengang für das sekundäre Bild und damit seiner vertikalen Position. Bei richtiger Wahl des Keilwinkels führt die vertikale Verschiebung des sekundären Bildes zu einer Überlagerung mit dem primären Bild und der Ghost ist für die Fahrer:in nicht sichtbar. Die Auslegung und Bestimmung des Keilwinkels ist abhängig von virtueller Bildentfernung, Einbauwinkel der WSS, Lage des Projektors und der vertikalen Augposition. Mit Ausnahme der vertikalen Augposition, welche von Größe und Sitzposition der Fahrer:in abhängig ist, sind alle Parameter unveränderlich. Da der Keilwinkel ebenfalls unveränderlich ist, muss dieser auf eine definierte Augposition ausgelegt werden. Weicht die Augposition der Fahrer:in davon ab, kann trotz korrekter Keilwinkelauslegung ein Ghost zu sehen sein. Die Größe des Keilwinkels beträgt in Abhängigkeit der benannten Parameter ca. 0,2 mrad bis 0,8 mrad. Grundsätzlich sinkt die Keilwinkelgröße mit zunehmender Bildentfernung. Der Einsatz einer Keilwinkelfolie für HUD-WSS ist Stand der Technik und damit ein bewährtes Mittel zur Reduktion des Ghost sowie der durch die Fahrer:in wahrgenommene Unschärfe des virtuellen Bildes. Da dieser Abbildungsfehler sowie dessen Bestimmung und Reduktion bereits weitläufig bekannt sind, fällt der Doppelbildfehler nicht unter die Kategorie der IQN für ein AR HUD.

## Globale Registrierungsfehler

Registrierungsfehler treten auf, wenn virtuelle Inhalte durch den Benutzer nicht an der richtigen Stelle wahrgenommen werden [47], da diese nicht richtig positioniert sind. In einem AR System muss dieser Fehler möglichst gering sein, um Fehlinterpretationen der gezeigten Inhalte zu verhindern, da diese ansonsten zu gefährlichen Fahrsituationen führen könnten. Demzufolge betrifft dieser Abbildungsfehler vor allem kontaktanaloge Anzeigeninhalte, bspw. die Markierung eines vorausfahrenden Fahrzeuges. Für die Bestimmung des Registrierungsfehlers im virtuellen Testbild werden zwei IQN herangezogen:

*IQN 1.1: Mittlere horizontale Bildverschiebung*

*IQN 1.2: Mittlere vertikale Bildverschiebung*

Die beiden IQN beschreiben die gemittelte horizontale und vertikale Bildverschiebung der Messpunkte im virtuellen Testbild in Milliradian [mrad]. Abb. 2.19 illustriert schematisch IQN

1.1. Dabei entsprechen die grünen Punkte dem nominalen Testbild und die roten Punkte dem tatsächlichen Testbild. In diesem Beispiel ist das tatsächliche Testbild nach rechts verschoben. Gründe für diesen Abbildungsfehler können, wie auch für alle weiteren Abbildungsfehler, eine Abweichung der nominalen Geometrie bzw. Abweichung der nominalen Einbaulage von Projektor oder WSS sein.

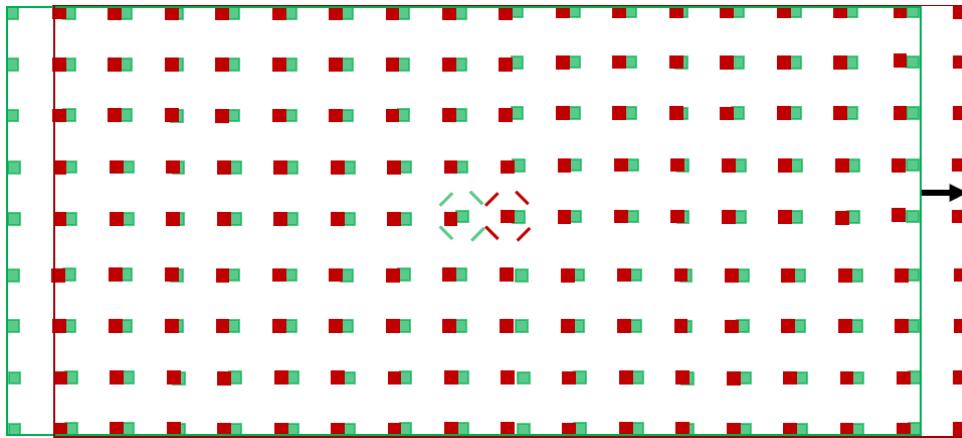


Abb. 2.19: IQN 1.1 - Mittlere horizontale Bildverschiebung

## Globale Steigungsfehler

Steigungsfehler treten auf wenn das virtuelle Bild eine Rotation erfährt. Vor allem genau horizontale und vertikale Darstellungen oder Linien sind anfällig für die Wahrnehmung dieses Abbildungsfehlers. Um den Steigungsfehler genauer zu beschreiben, wird die Rotation in horizontale und vertikale Anteile separiert. Daraus ergeben sich zwei weitere IQN:

IQN 1.3: *Mittlere horizontale Verkippung*

IQN 1.4: *Mittlere vertikale Verkippung*

Die Aufteilung ermöglicht die genaue Unterscheidung zwischen der Verkippung horizontaler oder vertikaler Linien. Abb. 2.20 zeigt die Verkippung vertikaler Linien (IQN 1.4), also der Spalten, während die horizontalen Linien, also die Zeilen, keine Abweichung enthalten. Die Berechnung erfolgt anhand der gemittelten Steigung zwischen den jeweils benachbarten Messpunkten. Die mittlere Verkippung ist in Grad [°] angegeben.

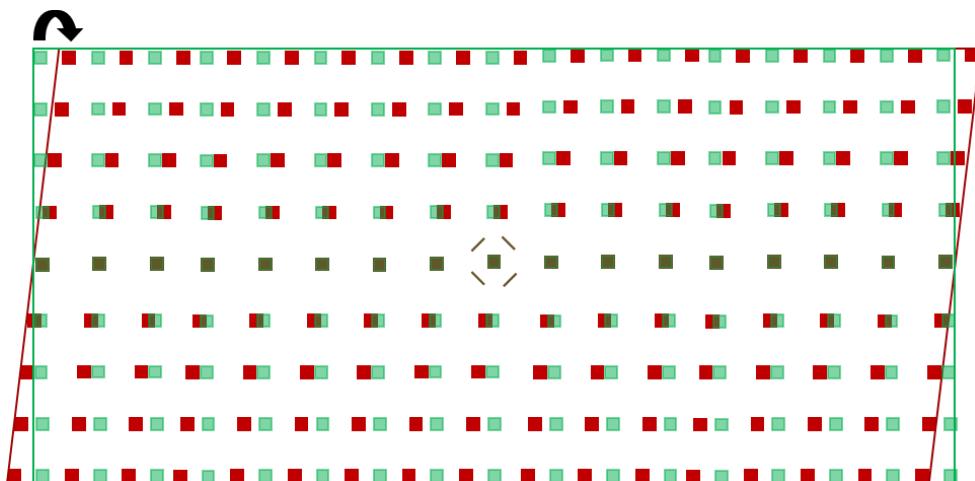


Abb. 2.20: IQN 1.4 - Mittlere vertikale Verkippung

## Globale Bildgrößenfehler

Der Bildgrößenfehler beschreibt ein virtuelles Bild, das entweder zu groß oder zu klein ist. Auch für den Bildgrößenfehler findet eine Aufteilung der zugehörigen IQN in horizontale und vertikale Anteile statt:

IQN 1.5: *Mittlere horizontale Bildverzeichnung*

IQN 1.6: *Mittlere vertikale Bildverzeichnung*

Ursache für den Bildgrößenfehler sind vor allem abweichende horizontale und vertikale Radien der WSS. Gerade bei bekannten Symbolen, bspw. der Anzeige eines runden Verkehrsschild in ovaler Form, ist eine Verzeichnung leicht wahrnehmbar. Außerdem führt ein zu großes virtuelles Bild zu einer größeren Überdeckung der Umwelt, welche für die Fahrer:in störend sein kann. In Abb. 2.21 ist beispielhaft IQN 1.5 dargestellt, worin das Testbild eine positive horizontale Verzeichnung erfährt und entsprechend größer ausfällt. Die mittlere Bildverzeichnung wird als arithmetisches Verhältnis zwischen nominalem und tatsächlichem Testbild angegeben und ist entsprechend dimensionslos. Zur Veranschaulichung erfolgt eine Angabe in Prozent [%].

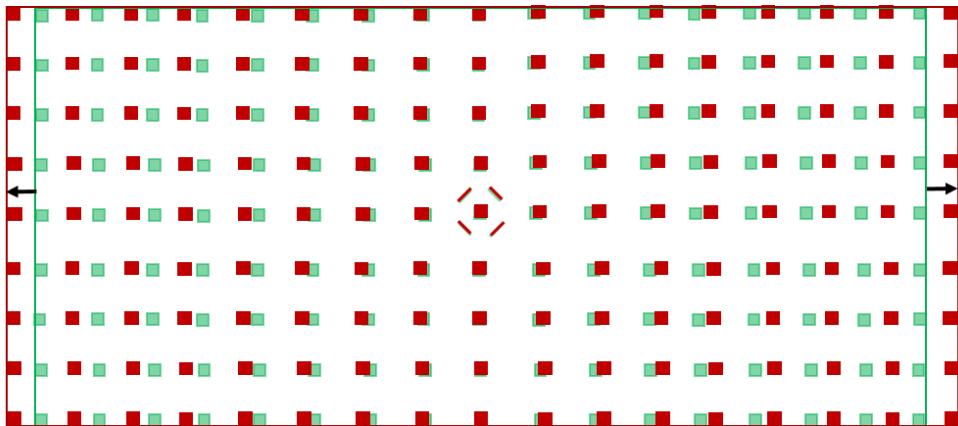


Abb. 2.21: IQN 1.5 - Mittlere horizontale Bildverzeichnung

## 2.4.2. Lokale Abbildungsfehler

Für die Bewertung kleinerer HUD Systeme, mit einer Bildentfernung von ca. 2,5 Metern und einem FOV von ca.  $6^\circ \times 2^\circ$ , ist die Betrachtung und Kontrolle globaler Abbildungsfehler ausreichend. AR HUD Systeme besitzen aufgrund ihrer größeren Bildentfernung und ihres größeren FOV auch einen deutlich größeren Reflektionsbereich auf der WSS. Im Herstellungsprozess der WSS kann es beim Biegen der Einzelscheiben zu lokalen Abweichungen kommen. Diese Abweichungen fallen als lokale Änderungen der Radien aus und führen zu lokalen Abbildungsfehlern im virtuellen Bild. Daher ist, neben den zuvor beschriebenen globalen Abbildungsfehlern, welche die Qualität des gesamten virtuellen Bildes beschreiben, auch die Betrachtung lokaler Abbildungsfehler nötig.

Die im Folgenden aufgezeigten IQN für lokale Abbildungsfehler beschreiben die Homogenität des virtuellen Testbildes, basierend auf jeweils einer Aufnahme aus einer Kameraposition (siehe Abb. 2.17). Die IQN werden über die Abweichung zwischen den grünen Soll- und roten Ist-Punkten bestimmt. Um die Homogenität des virtuellen Bildes zu beschreiben, werden Standardabweichungen und Maximalwertabweichungen betrachtet. Die IQN der lokalen Abbildungsfehler basieren auf den IQN der globalen Abbildungsfehler und sind erneut Doppelbildfehler, Steigungsfehler, Bildgrößenfehler und Registrierungsfehler. Entsprechend der Zuordnung nach Fehlerarten treten diese Abbildungsfehler lokal, monoskopisch und statisch auf.

### Lokale Doppelbildfehler

Die Entstehung lokaler Doppelbildfehler ist analog der Entstehung globaler Doppelbildfehler und kann in vertikaler sowie horizontaler Richtung auftreten. Die Ausprägung des Doppelbildfehlers kann allerdings innerhalb des virtuellen Testbildes variieren. Gründe hierfür

sind vor allem Abweichungen lokaler Radien des Glases oder Abweichungen des Keilwinkels der PVB-Folie. Die Bewertung des lokalen Doppelbildfehlers findet als eine Maximalwertbetrachtung des Ghost statt. Als Messgröße wird allerdings nicht der einfache Maximalwert des Ghost, sondern der Durchschnitt der fünf größten Messwerte für den Ghost verwendet. Diese Entscheidung basiert auf Erfahrungswerten vorausgehender HUD Projekte, welche zeigen, dass einzelne sehr hohe Maximalwerte teilweise auf Messfehler des Messsystems zurückzuführen sind. Bei insgesamt 200 Ghost-Marken je Testbild und 25 Kamerapositionen sind damit alleine je Lenkerseite für eine WSS 5000 Messwerte für den Ghost vorhanden. Aus diesem Grund erfolgt die Betrachtung des maximalen Doppelbildfehlers anhand des Mittelwerts der fünf größten Ghost-Messwerte je Testbild einer Kameraposition. Der lokale Doppelbildfehler wird ebenfalls in Milliradian [mrad] angegeben. Die Prüfung des maximalen Doppelbildfehlers ermöglicht damit lokal auftretende Unschärfe zu erkennen und zu verhindern.

## Lokale Registrierungsfehler

Während der globale Registrierungsfehler den gemittelten Versatz des virtuellen Bildes in horizontaler (IQN 1.1) und vertikaler (IQN 1.2) Richtung beschreibt, betrachtet der lokale Registrierungsfehler die Homogenität des Versatzes von Messpunkten über die Standardabweichung:

*IQN 2.1: Standardabweichung für den horizontalen Versatz von Messpunkten*

*IQN 2.2: Standardabweichung für den vertikalen Versatz von Messpunkten*

Entsprechend geben die IQN 2.1 und 2.2 die Standardabweichung des gemittelten Versatzes wieder. In Abb. 2.22 ist ein Ausschnitt des Testbildes zu sehen, in welchem der unterschiedliche horizontale Versatz der Messpunkte ersichtlich ist und damit die Ausprägung von IQN 2.1 verdeutlicht. Die letztendliche Messgröße ist die zweifache Standardabweichung des lokalen Versatzes aller Messpunkte und wird in Milliradian [mrad] angegeben. Die Verwendung der zweifachen Standardabweichung schließt bei einem annähernd normalverteilten Versatz ca. 95 % aller Messpunktewerte ein. Damit ermöglichen die IQN 2.1 und 2.2 eine grundsätzliche Bewertung der Homogenität des virtuellen Bildes und geben Aufschluss über lokale Registrierungsfehler, sowie zu lokalen Verzeichnungen in horizontaler und vertikaler Richtung. Die Bewertung der virtuellen Bildqualität mit Hilfe von IQN 2.1 und 2.2 ist wichtig, da lokale Verzeichnungen in den gemittelten IQN 1.1 und 1.2 nicht erfasst sind, da diese sich aufgrund der Durchschnittsbetrachtung gegenseitig aufheben.

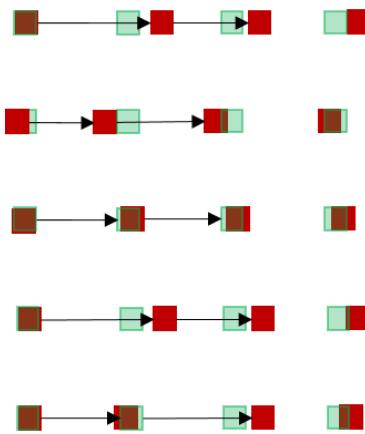


Abb. 2.22: IQN 2.1 - Standardabweichung für den horizontalen Versatz von Messpunkten

## Lokale Steigungsfehler

Dem Namen entsprechend ist der lokale Steigungsfehler dem globalen Steigungsfehler zugeordnet und bewertet ebenfalls die Rotation des virtuellen Bildes. Analog zum lokalen Registrierungsfehler beschreibt auch der lokale Steigungsfehler die Homogenität der Rotation und wird über die Standardabweichung der Verkippung bestimmt:

IQN 2.3: *Standardabweichung der horizontalen Verkippung*

IQN 2.4: *Standardabweichung der vertikalen Verkippung*

Die IQN 2.3 und 2.4 geben jeweils die Standardabweichung der gemittelten Verkippung wieder. In Abb. 2.23 ist ein Ausschnitt des Testbildes zu sehen, in welchem die unterschiedliche vertikale Verkippung der Messpunkte zueinander ersichtlich ist und damit IQN 2.4 beschreibt. Während im gezeigten Beispiel die ersten beiden Spalten auf eine inhomogene vertikale Verkippung der übereinanderliegenden Messpunkte hinweisen, ist in der letzten Spalte eine eher homogene Verkippung zu sehen. Genau wie bei IQN 2.1 und 2.2 wird für die IQN 2.3 und 2.4 die zweifache Standardabweichung der lokalen Verkippung aller Messpunkte als Messgröße verwendet. Allerdings erfolgt die Angabe in Grad [°]. IQN 2.3 und 2.4 sind auf diese Weise ein Indikator für die Homogenität des virtuellen Bildes bzgl. lokaler Steigungsfehler und liefern ebenfalls Informationen bzgl. lokaler Registrierungsfehler oder Verzeichnungen.

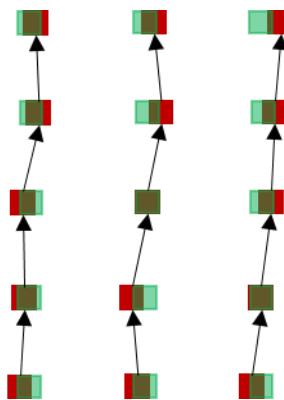


Abb. 2.23: IQN 2.4 - Standardabweichung für die vertikale Verkipfung von Messpunkten

### Maximale Bildgrößenfehler

Der maximale Bildgrößenfehler beschreibt die maximale Abweichung eines Messpunktes von seinen Soll-Koordinaten in horizontaler oder vertikaler Richtung:

IQN 2.5: *Maximale horizontale Abweichung*

IQN 2.6: *Maximale vertikale Abweichung*

Das Testbild in Abb. 2.24 zeigt die Ausprägung von IQN 2.5 und 2.6. Der durchgezogene Kreis im oberen linken Bildbereich markiert die maximale horizontale Abweichung eines Messpunktes und repräsentiert entsprechend IQN 2.5. Der gepunktete Kreis im mittleren rechten Bildbereich markiert die maximale vertikale Abweichung eines Messpunktes und repräsentiert damit IQN 2.6. Analog zu den IQN 1.5 und 1.6 für globale Bildgrößenfehler, sind auch die IQN 2.5 und 2.6 für maximale Bildgrößenfehler dimensionslose Verhältnisse.

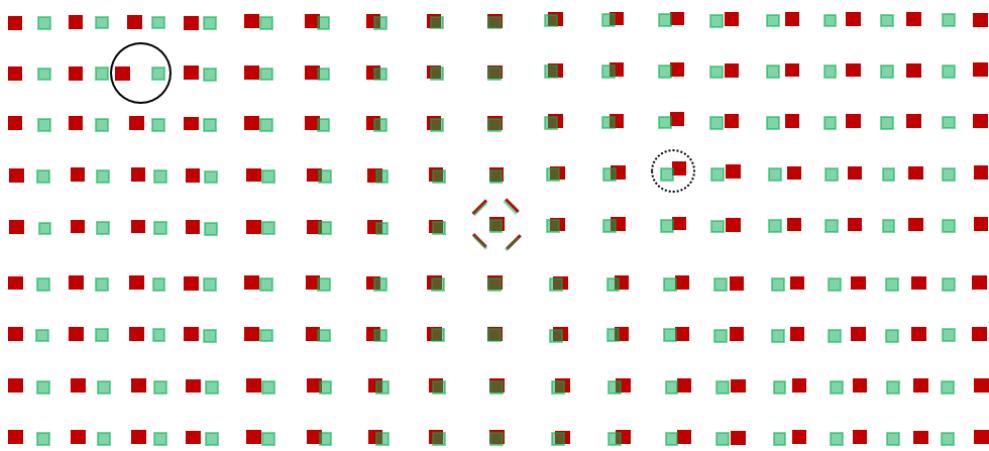


Abb. 2.24: IQN 2.5 und 2.6 – Maximale horizontale und vertikale Abweichung von Messpunkten

Die Bestimmung lokaler Abbildungsfehler über die Standardabweichung oder Maximalwerte ermöglicht die Bewertung von Verzeichnungen innerhalb des virtuellen Bildes. Dies ist wichtig, da die ausschließliche Betrachtung von Durchschnittswerten bei gleichzeitig deutlicher

Zunahme der Bildgröße zum Übersehen lokaler Abbildungsfehler führen kann. Die Betrachtung lokaler Abbildungsfehler ist daher unverzichtbar um die Kundenansprüche zu erfüllen.

### 2.4.3. Stereoskopische Abbildungsfehler

Die Berechnung der IQN für stereoskopische Abbildungsfehler repräsentiert das stereoskopische, menschliche Sehen mit beiden Augen. Basis für die Bestimmung stereoskopischer Abbildungsfehler sind Aufnahmen des virtuellen Testbildes aus zwei Kamerapositionen. Die beiden Kamerapositionen müssen auf einer horizontalen Linie in der Eyebox liegen und daher kein Delta in Z-Richtung zueinander besitzen. Die Berechnung der IQN basiert auf der Annahme eines horizontalen Abstandes der beiden Kamerapositionen von 65 mm und entspricht damit dem durchschnittlichen Augabstand von Menschen. Bei einer Abweichung des definierten Abstands der Kamerapositionen von 65 mm muss ein Korrekturfaktor für die Berechnung der IQN herangezogen werden.

Die Betrachtung stereoskopischer Abbildungsfehler ist wichtig, da die Sichtstrahlen von linkem und rechtem Auge aufgrund der erhöhten Bildentfernung weniger konvergieren. Folglich betrachten linkes und rechtes Auge zwei unterschiedliche Reflektionsbereiche auf der WSS. Die Lage der WSS, sie ist nicht parallel zur Y-Z-Ebene und damit zur Lage der Augen, sowie die variablen Radien der WSS führen dazu, dass linkes und rechtes Auge unterschiedliche Bilder sehen. Die Reflektionsbereiche überschneiden sich zwar in großen Teilen, allerdings findet die Reflexion der einzelnen Messpunkte des virtuellen Bildes an jeweils anderen Positionen der WSS statt. Die Verwendung asphärischer Spiegel im Projektor kann diese Fehler zum Teil korrigieren. Wie auch bei den zuvor beschriebenen Abbildungsfehlern, führen Abweichungen der geometrischen Form oder Lage der WSS zu stereoskopischen Abbildungsfehlern. Die Ausprägung möglicher stereoskopischer Abbildungsfehler betrifft vor allem Abweichungen der Lage für das virtuelle Bild, aber auch die unterschiedliche Verzeichnung des virtuellen Bildes für das jeweilige Auge. Diese Abbildungsfehler entsprechen den Fehlerarten *global*, *stereoskopisch* und *statisch*. Für die Berechnung der stereoskopischen Abbildungsfehler werden zwei IQN verwendet:

IQN 3.1: *Mittlere horizontale Divergenz*

IQN 3.2: *Mittlere vertikale Divergenz*

Im Gegensatz zu den IQN der lokalen Abbildungsfehler, erfolgt die Betrachtung der IQN für stereoskopische Abbildungsfehler erneut über den gemittelten Versatz des virtuellen Bildes und ist damit analog der Berechnung von IQN für globale Abbildungsfehler. Wie in Abb. 2.25 zu sehen ist, tritt nur dann Divergenz auf, wenn der gemittelte Versatz der virtuellen Bilder für linkes und rechtes Auge gegenläufig ist. Besitzen die virtuellen Bilder für beide Augen denselben Versatz in dieselbe Richtung, bspw. jeweils um 1,5 mrad nach rechts, besteht zwar ein globaler Registrierungsfehler (IQN 1.1 und 1.2), allerdings kein stereoskopischer Abbildungsfehler (IQN 3.1 und 3.2). Divergenz tritt nur auf wenn der Versatz zwischen linkem und rechtem Auge unterschiedlich ist. IQN 3.1 und 3.2 werden in Milliradian [mrad] angegeben.

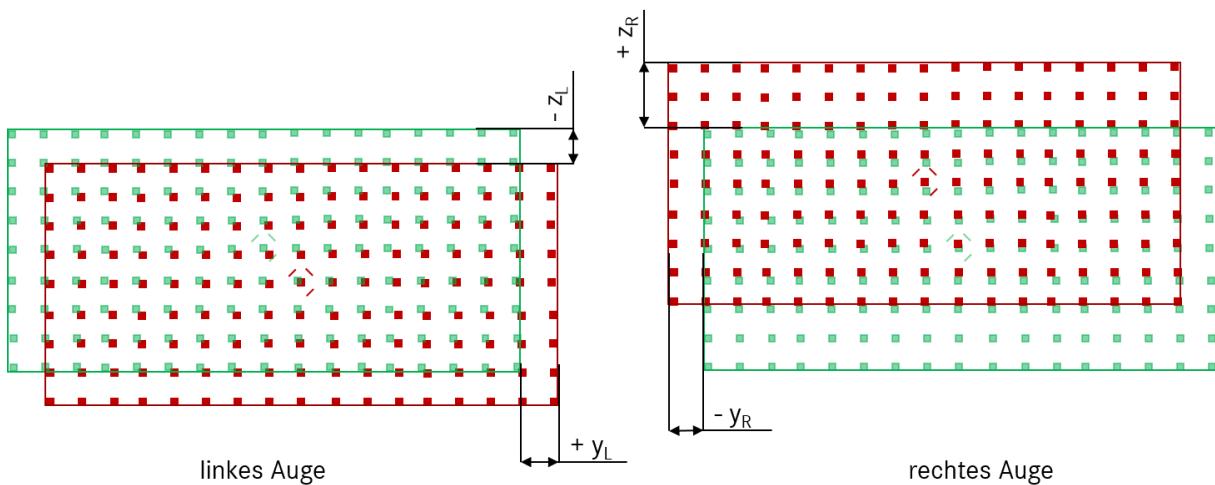


Abb. 2.25: IQN 3.1 und 3.2 - Mittlere horizontale und vertikale Divergenz

Treten horizontale und vertikale Divergenzen auf, versucht das menschliche visuelle System die unterschiedlichen Bilder des linken und rechten Auges zusammenzuführen und als ein Bild wahrzunehmen. Dieser Vorgang ist mit erhöhtem kognitiven Aufwand verbunden und kann zu Ermüdung und Kopfschmerzen führen. Zusätzlich erschwert auftretende Divergenz die korrekte kontaktanaloge Verordnung der virtuellen Bildinhalte in der Umwelt, da linkes und rechtes Auge diese an unterschiedlichen Positionen registrieren. Entsprechend führen stereoskopische Abbildungsfehler vor allem bei kontaktanalogen Anzeigeninhalten zu einer unangenehmen visuellen Wahrnehmung virtueller Bilder.

#### 2.4.4. Dynamische Abbildungsfehler

Dynamische Abbildungsfehler bilden die letzte betrachtete Fehlerart. Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, können dynamische Abbildungsfehler bei statischer Kopfposition aber

dynamischen Anzeigeninhalten, sowie bei dynamischer Kopfposition mit statischen oder dynamischen Anzeigeninhalten auftreten. Entsprechend lassen sich dynamische Abbildungsfehler in zwei Kategorien aufteilen. Zum einen tritt diese Fehlerart innerhalb *eines virtuellen Bildes* auf, also bei statischer Kopfposition mit dynamischen Anzeigeninhalten. Zum anderen treten dynamische Abbildungsfehler innerhalb *einer Eyebox* auf, welche durch eine dynamische Kopfposition ausgelöst werden. Folgend findet die Erläuterung der entsprechenden IQN statt.

## **Gradienten innerhalb eines virtuellen Bildes**

Zunächst erfolgt die Erläuterung der IQN für dynamische Abbildungsfehler innerhalb *eines virtuellen Bildes*. Für die Berechnung der jeweiligen IQN wird jeweils ein virtuelles Testbild aus einer Kameraposition herangezogen. Entsprechend handelt es sich hierbei um monoskopische Abbildungsfehler. Der dynamische Abbildungsfehler innerhalb eines virtuellen Bildes kann bspw. bei sich bewegenden Navigationshinweisen auftreten. Alle dynamischen Darstellungen lösen diesen Abbildungsfehler aus, da sich die angezeigten Inhalte verzeichnen können. Die vier zugeordneten IQN werden über den maximalen Gradienten innerhalb des virtuellen Bildes bestimmt und sind folgend aufgelistet:

IQN 4.1: *Maximaler horizontaler Gradient innerhalb des virtuellen Bildes*

IQN 4.2: *Maximaler vertikaler Gradient innerhalb des virtuellen Bildes*

IQN 4.3: *Maximaler horizontaler Steigungsgradient innerhalb des virtuellen Bildes*

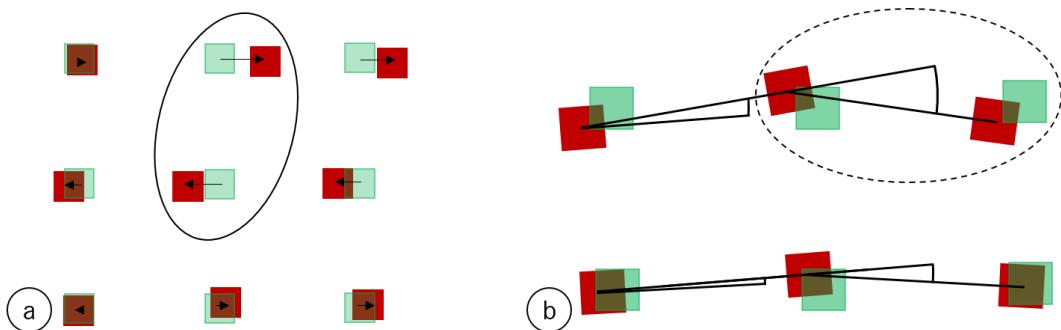
IQN 4.4: *Maximaler vertikaler Steigungsgradient innerhalb des virtuellen Bildes*

Entsprechend erfolgt die Berechnung der IQN nicht mehr ausschließlich über einen Soll-Ist-Vergleich der einzelnen Messpunkte, sondern über die Änderungsrate zwischen benachbarten Ist-Messpunkten im Verhältnis zu ihren jeweiligen Soll-Messpunkten. Folglich entsprechen die vier IQN den Fehlerarten lokal, monoskopisch und dynamisch. In Abb. 2.26 sind Beispiele für IQN 4.1 (a) und IQN 4.3 (b) zu sehen.

Das linke Beispiel (Abb. 2.26 a) zeigt den maximalen horizontalen Gradienten im Ausschnitt eines virtuellen Bildes und entspricht damit IQN 4.1. Darin wird deutlich, dass der maximale horizontale Gradient innerhalb des virtuellen Bildes alle benachbarten Messpunkte des tatsächlich betrachteten Messpunktes in die Berechnung der IQN 4.1 einbezieht. Für IQN 4.1 werden jeweils die horizontalen Abweichungen der benachbarten Messpunkte vom

betrachteten Messpunkt abgezogen. Diese Betrachtung wird für alle Messpunkte durchgeführt und der maximale Betrag ergibt schlussendlich den gesuchten Messwert. Im gezeigten Beispiel ist der maximale horizontale Gradient am durchgehenden ovalen Kreis (Abb. 2.26 a) zu erkennen. Analog dazu wird der maximale vertikale Gradient anhand IQN 4.2 in vertikaler Richtung bestimmt. Die Maßangabe der beiden maximalen Gradienten innerhalb des virtuellen Bildes erfolgt in Milliradian [mrad].

Das rechte Beispiel (Abb. 2.26 b) zeigt den maximalen horizontalen Steigungsgradienten und entspricht IQN 4.3. Analog zu den IQN 4.1 und 4.2, schließt die Berechnung der IQN 4.3 und 4.4 ebenfalls die Abweichungen aller benachbarten Messpunkte des tatsächlich betrachten Messpunktes mit ein. Allerdings bewerten IQN 4.3 und 4.4 dem Namen entsprechend die Steigungsabweichung. Wie im Beispiel anhand des gepunkteten Ovals sichtbar, befindet sich der maximale horizontale Steigungsgradient zwischen dem mittleren und dem rechten oberen Messpunkt. Aus Gründen der Anschaulichkeit, sind die horizontalen Steigungsgradienten vertikal angereihter Messpunkte nicht dargestellt. IQN 4.3 und 4.4 werden in Grad [ $^{\circ}$ ] angegeben.



**Abb. 2.26: IQN 4.1 (a) und 4.3 (b) – Maximaler horizontaler Gradient und Steigungsgradient innerhalb des virtuellen Bildes**

IQN 4.1 bis 4.4 stellen damit Maximalwertbetrachtungen innerhalb eines virtuellen Bildes dar. Deren Kontrolle ist für AR HUD Systeme von besonderer Bedeutung, da zum einen bei der großen verwendeten Reflektionsfläche auf der WSS von lokalen Geometrieabweichungen auszugehen ist. Diese könnten anderenfalls in der Betrachtung von Durchschnittswerten und Standardabweichungen für globale und lokale Abbildungsfehler übersehen werden. Zum anderen hat ein AR HUD System neuartige dynamische Anzeigeninhalte, die bei ihrer Bewegung keine Verzeichnung erfahren dürfen.

## Gradienten innerhalb einer Eyebox

Des Weiteren können Kopfbewegungen innerhalb der Eyebox dynamische Abbildungsfehler erzeugen. Um das tatsächliche stereoskopische Sehen des Menschen abzubilden, werden für die Berechnung der entsprechenden IQN die Abweichungen zwischen virtuellen Bildern aus unterschiedlichen Kamera- bzw. Augpaarpositionen verwendet. Entsprechend müssen für die Berechnung der verschiedenen IQN, virtuelle Bilder aus jeweils zwei oder vier unterschiedlichen Kamerapositionen herangezogen werden. Um die Veränderung des virtuellen Bildes bei der Kopfbewegung einer Fahrer:in nachzustellen, erfolgt jeweils ein Vergleich benachbarter Kamera- bzw. Augpaarpositionen. Über den Vergleich der virtuellen Bilder kann eine Bestimmung von Abweichungen stattfinden. Diese messtechnische Auswertung repräsentiert die Kopfbewegung der Fahrer:in.

Die Berechnung der IQN für dynamische Abbildungsfehler innerhalb der Eyebox erfolgt über Maximalwertbetrachtungen. Die vier IQN 5.1 bis 5.4 dieser Fehlerkategorie bewerten den lokalen dynamischen Registrierungs- bzw. Steigungsfehler innerhalb der Eyebox, also bei horizontaler oder vertikaler Kopfbewegung. Das bedeutet, dass die maximale Abweichung zwischen zwei benachbarten Kamerapositionen, für denselben Messpunkt im virtuellen Bild, dem gesuchten Messwert entspricht. Da sowohl horizontale und vertikale Kopfbewegungen betrachtet werden sollen, können sowohl zwei horizontal als auch vertikal angeordnete Kamerapositionen das gesuchte benachbarte Kamerapaar darstellen. Die entsprechenden IQN werden wie folgt bezeichnet:

*IQN 5.1: Maximaler horizontaler Gradient innerhalb der Eyebox*

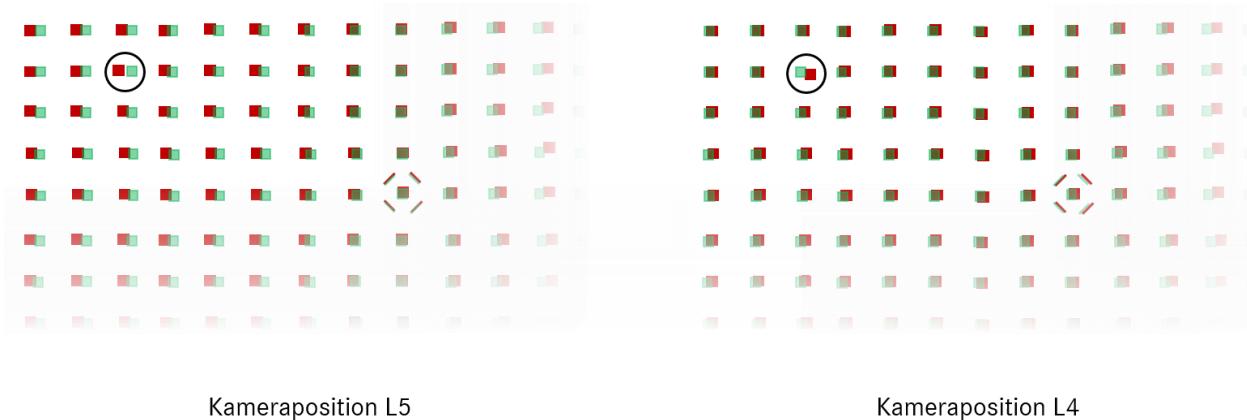
*IQN 5.2: Maximaler vertikaler Gradient innerhalb der Eyebox*

*IQN 5.3: Maximaler horizontaler Steigungsgradient innerhalb der Eyebox*

*IQN 5.4: Maximaler vertikaler Steigungsgradient innerhalb der Eyebox*

Der linke Testbildausschnitt in Abb. 2.27 zeigt eine Aufnahme aus der Kameraposition L5, während der rechte Testbildausschnitt eine Aufnahme aus Kameraposition L4 darstellt. In beiden Testbildern ist jeweils derselbe Messpunkt anhand eines durchgehenden Kreises gekennzeichnet. Es lässt sich erkennen, dass die Veränderung zwischen den Testbildern aus den Kamerapositionen L5 und L4 für diesen Messpunkt in horizontaler Richtung am größten ist. Dieser Vergleich entspricht einer Änderung der Augposition der Fahrer:in von L5 nach L4, bei welcher der gekennzeichnete Messpunkt, im Vergleich zu allen anderen Messpunkten, eine

überdurchschnittlich große Veränderung seiner horizontalen Position erfährt. Entsprechend stellt Abb. 2.27 ein Beispiel für IQN 5.1 dar, vorausgesetzt, dass für alle anderen Kombinationen benachbarter Kamerapositionen kein Messpunkt mit größerer horizontaler Abweichung existiert. Würden die Testbilder in Abb. 2.27 aus zwei vertikal benachbarten Kamerapositionen stammen, bspw. R10 und R13, würden diese ebenso ein Beispiel für IQN 5.1 darstellen. Da die größte Änderungsrate den gesuchten Messwert ergibt, erfolgt die Bezeichnung der IQN 5.1 als Gradient.



**Abb. 2.27: IQN 5.1 – Maximaler horizontaler Gradient innerhalb der Eyebox**

Die Bestimmung der IQN 5.2 bis 5.4 folgt demselben Prinzip über den Vergleich benachbarter Kamerapositionen und maximaler Gradienten. Während IQN 5.2, analog zu IQN 5.1, den maximalen vertikalen Gradienten innerhalb der Eyebox bestimmt, also den Versatz in Z-Richtung, betrachten die IQN 5.3 und 5.4 die maximalen horizontalen und vertikalen Steigungsgradienten. IQN 5.1 und 5.2 werden in Milliradian [mrad], sowie IQN 5.3 und 5.4 erwartungsgemäß in Grad [ $^{\circ}$ ], angegeben. Entsprechend geben die IQN 5.1 bis 5.4 jeweils die maximalen Abweichungen in horizontaler und vertikaler Richtung zweier benachbarter Kamerapositionen innerhalb der gesamten Eyebox wieder. Die vier IQN lassen sich den Fehlerarten lokal, monoskopisch und dynamisch zuordnen, da diese einen lokalen Abbildungsfehler bewerten, welcher bei der dynamischen Betrachtung mit einem Auge entsteht.

Zuletzt bewerten die beiden IQN 5.5 und 5.6 stereoskopische dynamische Abbildungsfehler und damit die virtuelle Bildqualität hinsichtlich der tatsächlichen stereoskopischen Betrachtung der Anzeigeninhalte mit beiden Augen. Im Gegensatz zu den IQN 5.1 bis 5.4, welche zwar benachbarte Kamerapositionen miteinander vergleichen, und damit das monoskopische dynamische Betrachten des virtuellen Bildes bewerten, erfolgt die Berechnung der IQN 5.5 und

5.6 über den Vergleich benachbarter Augpaarpositionen. Daher müssen für deren Berechnung Testbilder aus vier Kamerapositionen herangezogen werden.

Befindet sich bspw. die Kopfposition der Fahrer:in in der Mitte der Eyebox, sind die virtuellen Bilder aus den Kamerapositionen L1 und R1 die Basis des ersten Augpaars A (siehe Abb. 2.17). Bewegt die Fahrer:in ihren Kopf anschließend nach rechts, verändert sich ihre Augposition. Folglich bilden die Kamerapositionen C0 und R3 das zweite Augpaar B. Bewegt die Fahrer:in ihren Kopf nach oben, da sie sich bspw. aufrechter hinsetzt, liefern die Kamerapositionen L4 und R4 zwei neue virtuelle Bilder und entsprechen dem alternativen zweiten Augpaar B'. Diese Herangehensweise ermöglicht die Bewertung der stereoskopischen virtuellen Bildqualität bei sich bewegender Kopfposition und lässt diese Abbildungsfehler den globalen, stereoskopischen und dynamischen Fehlerarten zuordnen. Die IQN 5.5 und 5.6 basieren damit auf den IQN 3.1 und 3.2 mit folgenden Bezeichnungen:

IQN 5.5: *Maximaler horizontaler Divergenzgradient innerhalb der Eyebox*

IQN 5.6: *Maximaler vertikaler Divergenzgradient innerhalb der Eyebox*

IQN 3.1 und 3.2 bewerten den mittleren horizontalen und vertikalen Versatz der beiden virtuellen Bilder eines Augpaars. Darauf aufbauend bewerten IQN 5.5 und 5.6 die Veränderung des Versatzes zwischen benachbarten Augpaaren, also die Änderungsrate der horizontalen und vertikalen Divergenz und damit den Divergenzgradient bei Kopfbewegung. Im Gegensatz zu den IQN 5.1 bis 5.4 wird für die IQN 5.5 und 5.6 nicht ein einziger Messpunkt im virtuellen Bild gesucht, welche die größte Änderungsrate zwischen zwei Augpaarpositionen besitzt. Stattdessen wird die größte Veränderung der mittleren horizontalen und vertikalen Divergenz zwischen zwei horizontal oder vertikal benachbarten Augpaarpositionen als Messwert herangezogen. Die Angabe der Messwerte für den maximalen horizontalen und vertikalen Divergenzgradienten innerhalb der Eyebox erfolgt in Milliradian [mrad]. Tritt dieser Abbildungsfehler bei Kopfbewegungen auf, erschwert dieser das Zusammenführen der unterschiedlichen virtuellen Bilder für linkes und rechtes Auge durch das visuelle System der Betrachter:in. Vor allem in dynamischen Fahrsituationen, bei welchen die Anzeigeninhalte, der Kopf der Fahrer:in, das Fahrzeug und die Umwelt in Bewegung sind, kann das korrekte und problemlose Wahrnehmen des HUD durch die Fahrer:in beeinträchtigt werden. Gründe hierfür sind bspw. ein andauernder erhöhter kognitiver Aufwand oder mögliche Registrierungsfehler kontaktanaloger Anzeigeninhalte, da linkes und rechtes Auge die virtuellen Bildinhalte an unterschiedlichen Positionen in der Umwelt registrieren.

Die ausführliche Beschreibung des AR HUD Systems und seiner möglichen Abbildungsfehler in diesem Abschnitt bilden die Basis vorliegender Dissertation. Nur wenn die Abbildungsfehler des virtuellen Bildes bekannt sind, welche auf die WSS zurückzuführen sind, können die Anforderungen an die virtuelle Bildqualität aufgestellt werden. Damit liefert dieser Abschnitt bereits erste Antworten auf Forschungsfrage (A), welche Abbildungsfehler grundsätzlich im virtuellen Bild eines AR HUD entstehen können. Die Erläuterung der Abbildungsfehler eines AR HUD in Abgrenzung zu herkömmlichen HUD zeigt zudem auf, welche Unterschiede zwischen AR HUD und konventionellem HUD bestehen. Des Weiteren dient diese Beschreibung der späteren Analyse möglicher Korrelationen zwischen objektiv gemessener und subjektiv wahrgenommener virtuellen Bildqualität im Rahmen der Probandenstudien und Untersuchungen der Kapitel 4 und 5. Die erste Probandenstudie in Kapitel 4 zielt darauf ab die Forschungsfragen (B), (C) und (D) zu beantworten, indem sie aufzeigt, wie die Proband:innen die virtuelle Bildqualität eines AR HUD subjektiv wahrnehmen und ob die IQN diese subjektive Wahrnehmung bereits abbilden. Im besten Fall bestätigt die Probandenstudie die vorliegenden IQN und ihre Toleranzgrenzwerte bzw. zeigt auf, welche Abbildungsfehler als besonders störend wahrgenommen oder bisher nicht von den IQN abgedeckt werden. Da im Rahmen dieser Arbeit erstmalig die Bewertung eines AR HUD unter Verwendung tatsächlicher seriennaher Komponenten durch neutrale Proband:innen stattfindet, sind neue Erkenntnisse bzgl. der subjektiven Wahrnehmung des virtuellen Bildes zu erwarten.

Im Rahmen der Konzeptprüfung zum p-polarisierten HUD in Kapitel 5 erfolgt ebenfalls die Untersuchung möglicher Abbildungsfehler. Der Fokus liegt hierbei auf der Beantwortung der Forschungsfragen (E), (F) und (G), mit dem Ziel der Umsetzung eines mit polarisierender Sonnenbrille wahrnehmbaren HUD Systems. Im Idealfall treten bei der Umsetzung eines p-polarisierten HUD keine zusätzlichen Abbildungsfehler auf, welche nicht bereits in diesem Abschnitt bzw. im Rahmen von Kapitel 4 entwickelt wurden. Da bisher keine gesamtheitliche Untersuchung eines p-polarisierten HUD stattfand, besteht auch hier die Möglichkeit das neue Abbildungsfehler bzw. bestehende Abbildungsfehler mit anderweitiger Ausprägung oder anderweitigem Ursprung entstehen.



### 3. Stand der Technik

Dieses Kapitel bildet einen ausgewählten, aktuellen wissenschaftlichen Stand der Technik zu automobilen Head-up Displays ab. Hintergrund ist, dass bereits bestehendes Wissen für die vorliegende Dissertation genutzt und parallel die Forschungslücke spezifiziert werden soll, um den wissenschaftlichen Beitrag der Arbeit sicherzustellen.

Grundlage dieses Kapitels ist eine detaillierte Literaturrecherche. Diese wurde mit Hilfe der folgenden wissenschaftlichen Online Datenbanken durchgeführt: ACM Digital Library, Google Scholar, IEEE Xplore Digital Library, SAE Mobilus, ScienceDirect, SpringerLink, Springer Professional und Wiley Online Library. Sie enthält verschiedene Dokumente, dazu gehören Artikel aus Fachzeitschriften, Konferenzbeiträge, technische Reporte, Patente, Bücher, sowie weitere Veröffentlichungen in Form von Dissertationen oder akademischen Abschlussarbeiten. Die verwendeten Suchbegriffe hierfür sind: *windshield*, *Head-up Display*, *Augmented Reality*, *Augmented Reality Head-up Display*, *P-polarized Head-up Display*. Zusätzlich sind Daten zur Marktforschung den Plattformen A2mac1, Frost & Sullivan, IHS Automotive und statista entnommen.

Das vorliegende Kapitel soll einen ganzheitlichen Einblick in den aktuellen Stand der Technik von HUD ermöglichen. Beleuchtet werden verschiedene Aspekte, sowohl zum allgemeinen Nutzen sowie der Technik von HUD, als auch Design und Wahl von Bildinhalten, um so auf die ganzheitliche Betrachtung und Bedeutung der virtuellen Bildqualität eines HUD einzugehen. Zunächst erfolgt die Beschreibung der *Hierarchie der Fahraufgaben* nach Geiser [33] während des Steuerns eines Pkw, um die Verwendung des HUD Systems während des Fahrens einzuordnen.

Das Fahren eines Kraftfahrzeuges lässt sich in verschiedene Teilaufgaben separieren. Geiser (1985) kategorisiert diese in drei Bereiche, welche auch heute noch Gültigkeit besitzen: die *primären Aufgaben*, die *sekundären Aufgaben* und die *tertiären Aufgaben*. Die primären Aufgaben der Fahrer:in beschäftigen sich damit, das Fahrzeug auf Kurs zu halten. Dazu gehört, neben der Navigationsaufgabe und Reiseplanung, bei welcher die Fahrer:in heutzutage stark durch Assistenten wie dem Navigationssystem unterstützt wird, vor allem die Führungsaufgabe des Kraftfahrzeuges. Um das Kraftfahrzeug zu führen muss die Fahrer:in unter Berücksichtigung äußerer dynamischer Umstände (Straßenverlauf, Verkehrsteilnehmer,

Witterung etc.) den Sollkurs und die Sollgeschwindigkeit bestimmen, sowie entsprechend die longitudinale und laterale Steuerung umsetzen. Die sekundären Aufgaben beschreiben Aktionen und Reaktionen, welche in direkter Abhängigkeit der primären Aufgaben stehen. Aktionen sind bspw. das Betätigen der Fahrtrichtungsanzeige oder Lichthupe. Reaktionen können das Einschalten des Abblendlichts oder Wischsystems bei sich ändernden äußereren Sicht- oder Witterungsbedingungen sein. Die tertiären Fahraufgaben liegen außerhalb der tatsächlichen Steuerung und Führung des Kraftfahrzeuges und bedingen teilweise eine komplette Abwendung von Fahraufgabe und Verkehrsgeschehen. Unter die tertiären Aufgaben fällt die Bedienung und Einstellung von Komfortfunktionen, Kommunikation sowie Unterhaltung, kurzum dem Info- und Entertainment im Fahrzeug [12]. Das HUD System hat vordergründig die Aufgabe der Fahrer:in Informationen zur Verfügung zu stellen, welche vor allem die primäre Fahraufgabe unterstützen und erleichtern sollen. Dazu gehören bspw. die Anzeige der Fahrzeuggeschwindigkeit oder Navigationshinweise (für weitere Beispiele siehe Abschnitt 3.2.1). Das HUD greift selbst nicht in das Fahrgeschehen ein und ist daher als passives Fahrassistentensystem kategorisiert [53].

### **3.1. Allgemeine Diskussion zum Einsatz von Head-up Displays**

In der Literatur ist der Einsatz von HUD bereits vielfältig untersucht und diskutiert. Eine Vielzahl unterschiedlicher Studien bestätigt die Vorteile bzgl. der Erhöhung der Fahrsicherheit eines Pkw unter der Verwendung eines HUD im Vergleich zu klassischen *Head-down Displays* (HDD), wie z.B. einer analogen oder digitalen Instrumententafel. Diese Vorteile beziehen sich nicht nur auf eine verbesserte Fahrperformance bei Navigation durch den Verkehr [65], sondern die allgemeine Erhöhung der Fahrsicherheit durch eine verbesserte Informationsbereitstellung für die Fahrer:innen. Die Reduktion von *Look-Down-* und *Look-Over-Angle* führt grundsätzlich zu einer Verbesserung der Fahrperformance. Daher ist es sinnvoll Informationen in die Nähe oder gar direkt in das Sichtfeld der Fahrer:in zu bringen [113]. Das Bereitstellen relevanter Informationen zur Ausführung der primären Fahraufgabe im virtuellen Bild eines HUD in das direkte Sichtfeld der Fahrer:in ermöglicht die Reduktion der Zeit *eyes-off-the-road* [48,57,69,91]. Das bedeutet, dass dank der verbesserten Informationsdarstellung die Ausrichtung der Augen bzw. des Kopfes der Fahrer:in, inklusive ihrer Aufmerksamkeit, für kürzere Zeiten vom tatsächlichen Verkehrsgeschehen abgewendet sind. Dadurch können Reaktionszeiten verkürzt und die Fahrsicherheit erhöht werden.

Grund hierfür ist die erhöhte Entfernung des virtuellen Bildes eines HUD zur Augposition der Fahrer:in im Vergleich zu einem HDD (bspw. Instrumententafel). Folglich ist der Unterschied zwischen der Fokusebene für die Fahrzeugumwelt zur Informationsposition für das HUD geringer als der Unterschied zwischen den Fokusebenen der Fahrzeugumwelt und eines HDD. Dadurch ist die Verkürzung der Akkommodationszeit zwischen Fahrzeugumwelt und bereitgestellten Informationen möglich [38]. Das HUD ermöglicht dank der verkürzten Akkommodationszeit sowie der Positionierung der verkehrsrelevanten Informationen in das direkte Sichtfeld einen reduzierten Informationszugangsaufwand für Fahrer:innen [111]. Die damit verbundene geringere Ablenkung und mentale Belastung konnte durch Weinberg et al. im Rahmen der Erhebung des *NASA TLX workloads* zwischen HUD und HDD bestätigt werden [108]. Weitere Studien bestätigen die allgemein bessere Fahrperformance für die primären und sekundären Fahraufgaben bei Verwendung eines HUD [39,48,57,60,65,68,91,108].

Generell können verschiedenste Anzeigeninhalte im virtuellen Bild eines HUD dargestellt und damit unterschiedliche Funktionen ermöglicht werden, welche die Fahrer:in unterstützen. Diese sind abhängig von den technischen, optischen Parametern des HUD, wie bspw. Bildentfernung und FOV, dem Vorliegen bestimmter Signale und anderer Fahrassistenzsysteme, sowie dem grundsätzlichen UI Konzept. Zu den direkt Fahrsituation bezogenen Anzeigeninhalten zur Unterstützung der primären und sekundären Fahraufgabe gehören z.B. Warnhinweise [16,55,94,95], Verkehrszeichenerkennung [55,114] oder Fahrhinweise (Navigation) [16,55,115]. Funktionen eines HUD, welche nicht direkt auf die Fahrsituation bezogen sind, betreffen weitgehend das Info- und Entertainment, also kommunikationsbezogene Informationen [15,59] und umweltbezogene Informationen [30]. Da vor allem die ausgewählten Anzeigeninhalte sowie die Art und Weise ihrer Darstellung den Nutzen eines HUD definieren, sind weitere Details zur Literatur von Anzeigeninhalten und UI Konzepten unter Abschnitt 3.2 zu finden.

Die Literatur zeigt, dass auch die Verwendung eines AR HUD die Zeit *eyes-off-the-road* im Vergleich zu klassischen HDD reduziert [60,68]. Die gesamtheitliche Fahrperformance mit AR HUD ist dem konventionellen HUD sogar überlegen. Diese Feststellung ist trotz teilweise längeren Fokussierungszeiten auf die Anzeigeninhalte des AR HUD gültig, welche keine negativen Auswirkung auf die primäre Fahraufgaben aufweisen [90]. Grund hierfür ist zum einen die erhöhte Entfernung des virtuellen Bildes zur Kopfposition der Fahrer:in und damit einer zusätzlichen Verkürzung der Akkommodationszeit. Zum anderen ermöglicht die Augmentierung virtueller Bildinhalte, also die kontaktanaloge Positionierung von relevanten

Informationen in der tatsächlichen Fahrzeugumgebung einen zusätzlich einfacheren Informationszugang. Die Studie von Shariar und Kun lässt außerdem darauf schließen, dass Fahrer:innen das AR HUD dem AR Video, also der Augmentierung eines live streams der Umwelt im HDD, bevorzugen [88]. Des Weiteren befürworten Fahrer:innen in einer teilautomatisierten Fahrsituation nach SAE Level 1-3 [82] die Verwendung eines AR HUD, da Ihnen mehr Informationen zur Verfügung stehen. Dadurch kann ein besseres Verständnis und mehr Vertrauen ggü. dem teilautomatisierten Fahren etabliert werden [83,86,112].

Das AR HUD ist mit seiner Vergrößerung hinsichtlich FOV und virtueller Bildentfernung, sowie den zusätzlichen Funktionen um die Erweiterung kontaktanaloger Inhalte, eine Weiterentwicklung des konventionellen HUD und trägt zur weiteren Erhöhung der Fahrsicherheit in immer komplexeren Fahrsituationen bei. Das AR HUD stellt als kollaborative Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine das automobile HMI der nächsten Generation dar.

Die Verwendung eines HUD bzw. AR HUD birgt allerdings auch Risiken für die Fahrer:in. Konzentriert sich die Fahrer:in übermäßig auf die virtuellen Bildinhalte, welche sich nahe dem oder direkt im Sichtfeld befinden, kann dies zur Ablenkung vom tatsächlichen Fahrgeschehen führen. Entsprechende Stichworte sind das *Perceptual Tunneling* und der *Information Overload* [31,93]. Außerdem kann ein ineffizienter Wechsel im Richten der Aufmerksamkeit zwischen virtuellen Bildinhalten und der realen Welt entstehen. Die *kognitive Erfassung*, also die jeweilige Interpretation des Gesehenen, kann zu längeren Reaktionszeiten, bis hin zum Übersehen gefährlicher Fahrsituationen führen [38]. Die gleichen Gefahrensituationen können bei einer Überlagerung der realen Welt durch die virtuellen Bildinhalte entstehen, insbesondere bei falscher Positionierung der Anzeigeninhalte in der Fahrzeugumgebung [31,38]. Die Überlagerung der realen Welt durch die virtuellen Bildinhalte kann darüber hinaus zu einer falschen Akkommodation führen, bei welcher das menschliche visuelle System die virtuellen Bildinhalte anstatt der realen Welt scharf stellt [38,67,109]. Da das virtuelle Bild eines HUD auch in hellen Lichtverhältnissen sichtbar sein soll, erreichen die Helligkeiten virtueller Bilder mancher HUD Systeme Leuchtdichten von größer 12.000 cd/m<sup>2</sup>. Hohe Helligkeiten des virtuellen Bildes könnten in dunklen Lichtverhältnissen zu einer Blendung des Fahrers führen und sind daher zwingend zu vermeiden [31].

Falsch gewählte Anzeigeninhalte, sowohl in ihrer Darstellung, Größe und Positionierung als auch zum falschen Zeitpunkt, können ebenfalls negative Auswirkungen in der Fahrperformance

hervorrufen. Die Gründe sind an dieser Stelle analog den bereits beschriebenen, nämlich die Überladung von Informationen und Anzeigeninhalten [38] sowie das Verdecken der realen Welt und damit dem tatsächlichen Verkehrsgeschehen durch virtuelle Bildinhalte [72]. Um die möglichen negativen Auswirkungen eines HUD auf die Performance des Fahrers zu minimieren sollten daher nur die wichtigsten Informationen angezeigt werden. Entsprechend ist die Kenntnis darüber, *welche Informationen* der Fahrer zu *welchem Zeitpunkt* benötigt, äußerst wichtig. Zusätzlich müssen die ausgewählten Informationen in einer Art und Weise dargestellt sein, welche die Informationsverarbeitung erleichtern – folglich sind Prinzipien zur Gestaltung der virtuellen Bildinhalte einzuhalten [69]. Die wichtigsten Gestaltungsprinzipien der Anzeigeninhalte, also das UI als ganzheitliches Anzeigekonzept, sind im folgenden Abschnitt beschrieben.

Zusammenfassend bestätigt die vorhandene Literatur anhand einer Vielzahl von Studien und Untersuchungen den grundsätzlichen Mehrwert eines AR HUD sowie die Erhöhung der Fahrsicherheit durch die bessere Zugänglichkeit relevanter Informationen. Die beiden größten Vorteile eines AR HUD sind die verbesserte Reaktionszeit und geringere mentale Belastung der Fahrer:innen. Ob ein HUD System letztendlich eine Unterstützung für die Fahrer:in darstellen kann, hängt insbesondere vom ganzheitlichen UI Konzept ab, also welche Informationen in welcher Form und zu welchen Zeitpunkten dargestellt werden.

## **3.2. Anforderungen an das User Interface eines Head-up Display**

### **3.2.1. Anzeigeninhalte eines Head-up Displays**

Park und Park (2019) orientieren sich in ihrer Literaturanalyse zu *Funktionalen Anforderungen an automobile Head-up Displays* an einem Modell zu Nutzen, Nutzbarkeit und Nützlichkeit nach Nielsen (1994). Darin ist der Nutzen als Erfüllungsgrad des Kundennutzens definiert. Nach Park und Park (2019) entspricht der Nutzen eines HUD Systems der Erfüllung seiner funktionalen Anforderungen und damit der Bestimmung *welche Informationen* anzuzeigen sind. Die Nutzbarkeit des HUD Systems wiederum, ist abhängig von der Zugänglichkeit der Funktionen anhand des gewählten User Interfaces (UI), also *wann* und *wie die Inhalte* dargestellt sind. Nutzen und Nutzbarkeit sind stark voneinander abhängig und tragen gemeinsam zur Nützlichkeit des Systems bei. Das HUD ist ein Fahrsicherheitssystem, daher

hat die Fahrsicherheit oberste Priorität und steht im Mittelpunkt der Nützlichkeit. In den beiden Abschnitten zuvor wurde die Nützlichkeit eines HUD Systems bereits beschrieben. Eine Analyse gewünschter HUD Funktionen ist die Basis zur Auslegung des gesamten HUD Systems, inklusive Optik, Software, IT-Architektur und UI.

Park und Park (2019) haben in einer groß angelegten Studie die Anzeigeninhalte der auf dem Markt verfügbaren HUD ausgewertet. Daraus ist abzuleiten, dass ausschließlich Informationen im HUD angezeigt werden, die auch im HDD oder Zentraldisplay zu finden sind. Zu diesen Informationen und damit den Anzeigeninhalten gehören:

- Fahrzeugstatusinformationen (Fahrzeuggeschwindigkeit, Motordrehzahl, Scheinwerferzustand, ESP-Status, etc.),
- Fahrsicherheitsinformationen (Kollisionsmeldung, Straßenschilderinformationen, Spurhaltestatus),
- Navigationsinformationen (Navigationsanweisungen, Verbleibende Distanz, Ankunftszeit, Kompass),
- Kommunikations- und Infotainmentinformationen (Radio- u. Audiowiedergabe, Telefonie, Spracherkennung) oder
- Umweltinformationen (Außentemperatur).

Die Anzeigeninhalte der meisten OEM sind vergleichbar und beziehen sich vor allem auf Fahrzeuggeschwindigkeit, Geschwindigkeitsregelanalage, Navigationshinweise, Gefahrenhinweise und Verkehrsschilderkennung. Daraus lässt sich schließen, dass das HUD aus Sicht der OEM vor allem eine Unterstützung der primären Fahraufgabe darstellen soll. Zur primären Fahraufgabe gehören in erster Linie die longitudinale und laterale Fahrzeugkontrolle unter Berücksichtigung der äußeren Verkehrssituation und Umwelteinflüsse [33].

Zusätzlich haben Park und Park (2019) die HUD Anzeigeninhalte in einer detaillierten Literaturrecherche mit 41 Studien zur Bewertung von Prototyp HUD Systemen im Zeitraum von 1994 bis 2019 untersucht. Die in den 41 untersuchten Studien zu findenden Anzeigeninhalte lassen sich in 2 Cluster mit jeweiligen Untergruppen einteilen:

*1. Informationen zur konventionellen Fahraufgabe, mit den Untergruppen:*

- Gefahrhinweise
- Unterstützung bei der Verkehrsschilderkennung
- Unterstützung bei der Nachtsicht

- Unterstützung bei der Fahrbahnerkennung
- Vorhersagen zu Fahrsituationen
- Fahrweisungen
- Informationen zur Navigationsstrecke

2. *Informationen zum autonomen Fahren u. nicht-fahrbezogene Informationen, mit den Untergruppen:*

- Autonomes Fahren
- Konventionelle Kommunikation
- Fahrer-zu-Fahrer Kommunikation
- Fahrer-zu-Beifahrer Kommunikation
- Umwelt
- Entertainment

Im letzten Schritt untersuchten Park und Park (2019) welche Anzeigeninhalte von Fahrer:innen bevorzugt werden. Aus den Ergebnissen lässt ich ebenfalls schließen, dass die Fahrer:innen vor allem an Informationen interessiert sind, welche die Erfüllung der primären Fahraufgabe unterstützen.

Der Nutzen des HUD Systems setzt sich aus der Anzahl von Anzeigeninhalten zusammen, unter der Voraussetzung, dass angezeigte Inhalte dem situationsbedingten Bedarf der Fahrer:in entsprechen. Daher ist das gleichzeitige Anzeigen einer Vielzahl von Informationen begrenzt [70], da eine zu hohe Informationsdichte auch Risiken birgt (siehe Abschnitt 3.1). Entsprechend besteht eine Rivalität bzgl. Nutzen und Nutzbarkeit des HUD Systems und damit seiner Nützlichkeit. Wie gut das HUD System benutzt werden kann und damit seine Nutzbarkeit ist, basiert auf dem ganzheitlichen Anzeigekonzept, also dem UI.

### 3.2.2. Anzeigekonzept eines Head-up Displays

Im Anzeigekonzept, dem UI, erfolgt die Festlegung *wann* und *wie* die möglichen Anzeigeninhalte dargestellt werden. Damit trägt das UI durch seine Nutzbarkeit zur gesamten Nützlichkeit des Systems bei. Erhöht sich die Anzahl gleichzeitig angezeigter Inhalte, und damit die Informationsdichte, steigen der theoretische Nutzen und die Systemkomplexität auf Kosten der Nutzbarkeit. Aufgrund dieses Zielkonfliktes ist eine sorgfältige Auswahl der Anzeigezeitpunkte essentiell. Des Weiteren spielt auch die Gestaltung und das Design der

Inhalte eine tragende Rolle, welche ebenfalls Teil des UI sind. Das UI sollte auf den Prinzipien der menschlichen Wahrnehmung und kognitiver Verarbeitung von Inhalten basieren.

Die Mehrzahl der OEM ermöglicht eine Konfiguration der Anzeigeninhalte im HUD durch die Fahrer:in, teilweise auch mit Optionen für unterschiedliche Designs. Auf diese Weise ist es der Fahrer:in möglich ein individuelles Anzeigekonzept im HUD zu wählen [69]. Häufig besteht das UI aus vordefinierten Abschnitten, welche von Fahrer:innen mit wiederum vordefinierten Anzeigeninhalten besetzt werden dürfen. Abb. 3.1 verdeutlicht dieses Prinzip am Beispiel der Mercedes-Benz CLA-Klasse (BR118). Hier besteht die Möglichkeit in drei Bereichen unterschiedliche Anzeigeninhalte auszuwählen. Informationen zur Beurteilung und Durchführung der primären Fahraufgabe sind zumeist mittig im virtuellen Bild platziert. Eine Verwendung bestimmter Bildbereiche zur Anordnung der Informationen, abgestimmt auf die Wahrnehmung und kognitive Verarbeitung von Informationen durch die Fahrer:in, kann sich daher positiv auf die Fahrperformance auswirken.



Abb. 3.1: Auswahlmöglichkeiten zu Anzeigeninhalten im HUD einer Mercedes-Benz CLA-Klasse

Zum Teil verhalten sich dargestellte Inhalte dynamisch, bezogen auf die Fahrsituation. Beispiele hierfür sind Gefahrenhinweise oder Rückmeldungen zu Benutzeraktionen. Eine Bereitstellung verschiedener Anzeigeoptionen in Kombination mit ereignisgesteuerter Anzeige von Inhalten, bspw. eben genannter Gefahrenhinweise, ermöglicht die Bereitstellung einer Vielzahl von Informationen zum richtigen Zeitpunkt. Dadurch erhöht sich der Nutzen bei gleichbleibender guter Nutzbarkeit. Ein solches UI in Kombination mit freier Inhaltsbesetzung der Bildbereiche, erhöht die Systemnützlichkeit zusätzlich auf der individuellen Ebene der Fahrer:innen und trägt folglich zur Verbesserung der Nützlichkeit eines HUD Systems bei. Die Möglichkeiten für individuelle Einstellungen sind dennoch zu begrenzen, da ein Überangebot an Optionen mit einem Anstieg an Komplexität, Zeit und Anstrengung für die Fahrer:in

einhergeht. Ein Überangebot kann demnach zur Überforderung und damit zur Abnahme der Nutzbarkeit und schließlich Nützlichkeit führen.

Eine Orientierung an Designprinzipien bei der Ausgestaltung der Anzeigeninhalte erhöht die Benutzbarkeit und damit Nützlichkeit des HUD Systems. Einige dieser Prinzipien lassen sich aus dem *Modell des Situationsbewusstseins* (*Situation Awareness - SA*) nach Endsley (1995) für Entscheidungsfindung in dynamischen Umgebungen, bspw. dem Fahren eines Pkw, ableiten. Das Situationsbewusstsein ist die Basis für die Entscheidungsfindung und teilt sich in drei Schritte auf. *Level 1 SA* ist die *Wahrnehmung von Objekten in der Umwelt*. *Level 2 SA* ist das *Verstehen der Objektbedeutung*. *Level 3 SA* ist das *Vorhersagen zukünftiger Objektzustände*. Das UI Design eines Systems hat großen Einfluss auf das Situationsbewusstsein seiner Anwender:innen. Es bestimmt maßgeblich *wie viele* Informationen, *wie exakt* aufgenommen werden können, als auch *wie passend* die Informationen zu den Bedürfnissen der Anwender:in sind [27]. Das UI zielt darauf ab, die Informationen der Anwender:in unter möglichst geringem kognitiven Aufwand bereitzustellen. Entsprechend kann ein HUD in allen drei Schritten das Situationsbewusstsein der Fahrer:in unterstützen [69].

Die Gestaltung wichtiger und kritischer Informationen zum aktuellen Fahrgeschehen muss auffällig sein, sodass die Aufmerksamkeit der Fahrer:in auf diese kritischen Informationen gelenkt wird. Die Auffälligkeit von Anzeigeninhalten sollte mit ihrer Dringlichkeit erhöht werden. Die Herausforderung bei der Unterstützung des Situationsbewusstseins ist entsprechend, die Aufmerksamkeit der Fahrer:in auf die *situationsbedingten* kritischen Informationen zu lenken. Dies kann bspw. durch das gezielte Weglassen irrelevanter Inhalte umgesetzt werden. Ein UI Design sollte die Fahrer:in dabei unterstützen ein ganzheitliches Situationsbewusstsein zu schaffen, also einen Überblick zu den Aufgaben der Fahrer:in mit Fokus auf die jeweils situationsbezogene Aufgabe zu geben. Demnach ist das Weglassen irrelevanter Anzeigeninhalte nötig, um einen Informationsüberfluss zu verhindern. Die Reduktion zu verstehender Informationen kann dem Situationsbewusstsein daher zuträglich sein.

Der Mehrwert der Berücksichtigung des Modells zum Situationsbewusstsein liegt darin, die dynamischen Fahrsituationen und damit wechselnden Informationsbedürfnisse der Fahrer:in vollumfänglich in das UI Design einfließen zu lassen. Der Fokus auf das Situationsbewusstsein ermöglicht ein dynamisches und zielorientiertes Verhalten bei ständig wechselnden

Fahraufgaben. Aus der Literatur geht klar die Empfehlung hervor die Anzeigeninhalte dynamisch, also auf gegebene Fahrsituation und entsprechenden Informationsbedarfs der Fahrer:in, anzupassen [22,27,34,69]. Des Weiteren können zur Minimierung des Informationszugangsaufwands die Designprinzipien für Displays anhand menschlicher Faktoren nach Wickens et al. (2003) herangezogen werden.

In der Literatur sind neben allgemeinen Richtlinien zur Gestaltung visueller Informationen in Kraftfahrzeugen [18,23], außerdem studienbasierte Vorschläge zur Gestaltung der Inhalte zu finden. Bspw. erörtert Pfannmüller (2017) grundlegende Anzeigekonzepte für ein AR HUD mit Hilfe von Studien sowohl in Fahrsimulatoren [75] und tatsächlichen Fahrversuchen in Fahrzeugen. Pfannmüller (2017) gibt erste Empfehlungen hinsichtlich der Darstellung zur Verbesserung von Tiefenwahrnehmung, Registrierungsfehler, Navigation und kognitiver Beanspruchung. Sadovitch (2020) beschäftigt sich mit der Auswirkung und Reduzierung von Registrierungsfehlern, unter anderem durch Verwendung unterschiedlicher Darstellungen. Schneider et al. (2019) haben die Gestaltung von Navigationsinhalten untersucht, mit dem Ziel eine möglichst geringe Verdeckung der realen Umwelt zu erreichen und dadurch *visual clutter* zu reduzieren.

In verschiedenen Studien sind auch Empfehlungen zur Positionierung des virtuellen Bildes im Sichtfeld der Fahrer:in zu finden. Die letztendlichen Empfehlungen sind zwar leicht unterschiedlich, schlagen aber immer einen LDA (*Look-Down-Angle*)  $<10^\circ$  vor und sind damit im oder sehr nahe dem direkten Sichtfeld der Fahrer:in [38,49,56,96]. Eine Positionierung der virtuellen Inhalte im direkten Sichtfeld der Fahrer:in mit einem LDA von  $0^\circ$  kann sich vor allem zu Beginn auch negativ auf die Navigationsperformance auswirken [28], wenn visuelle Überlagerungen der virtuellen Bildinhalte und realen Welt auftreten [70]. Gewöhnt sich die Fahrer:in allerdings an die direkt im Sichtfeld gezeigten virtuellen Bildinhalte, kann diese Darstellung auch positive Auswirkungen auf die Fahrperformance haben [92]. Dabei ist es wichtig die Positionierung von Inhalten entsprechend ihrer Bedeutung für die primären, sekundären oder tertiären Fahraufgaben anzupassen. Wichtige und kritische Informationen sollten möglichst in die Mitte des Sichtfeldes, Zusatzinformationen wie bspw. eingehende Anrufe eher in seitlichen Bereichen des virtuellen Bildes platziert werden [70].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Untersuchungen und Empfehlungen zu Anzeigeninhalten und Anzeigekonzepten von AR HUD in wissenschaftlichen Schriften bereits vielfältig aufgeführt sind. Die Literatur behandelt in diesem Forschungsfeld vor allem welche

Inhalte *wann* und *wie* dargestellt werden sollen um die Fahrsicherheit zu erhöhen. Dies wird durch die Erleichterung von Wahrnehmung, Verarbeitung und Verständnis dargestellter Inhalte und Reduktion kognitiver Beanspruchung erreicht. Mit Ausnahme der Gestaltungsempfehlung zur Auswirkung und Reduzierung von Registrierungsfehlern nach Sadovitch (2020), finden sich allerdings keinerlei Hinweise zur Akzeptanz und Minimierung weiterer Abbildungsfehler oder dem Einfluss der WSS auf diese.

### 3.3. Technische Betrachtung von Head-up Displays

In Tabelle 1 ist eine Auswahl von HUD verschiedener OEM zu sehen. Das erste HUD wurde 1988 von GM im Oldsmobile Cutlass Supreme eingeführt [107]. Start für die breite Massenproduktion des HUD war dessen Einführung im BMW 5er im Jahr 2003. Seither hat eine Vielzahl von OEM die Integration von HUD in ihre Fahrzeuge umgesetzt. Dabei ist ein klarer Trend hin zu größeren FOV und virtuellen Bildentfernung zu erkennen. Die verschiedenen OEM erweitern stetig die Auswahl verschiedener Anzeigeninhalte. Im Jahr 2020 wurde mit der Markteinführung der Mercedes-Benz S-Klasse erstmalig ein AR HUD in einem Serienfahrzeug angeboten.

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter HUD verschiedener Hersteller (Stand Januar 2022)

Automobilhersteller	Modell	FOV	Bildentfernung	Markteinführung
Audi	A6	6,0° x 2,0°	2,3 m	2011
	Q4 e-tron	9,2° x 4,6°	10,0 m	2021
BMW	3er	6,0° x 2,0°	2,3 m	2012
	3er	7,0° x 3,0°	2,5 m	2019
	5er	5,6° x 2,8°	2,0 m	2003
	5er	6,0° x 2,0°	2,3 m	2010
	5er	7,0° x 3,0°	2,5 m	2017
	Oldsmobile Cutlass Supreme	-	-	1988
GM	Chevrolet Corvette	3,5° x 1,5°	2,6 m	1998
	Hyundai Ioniq 5	8,0° x 3,0°	7,5 m	2021
Lexus	LS	11,5° x 2,5°	3,0 m	2017
Mercedes-Benz	A-Klasse	6,0° x 2,0°	2,3 m	2018
	C-Klasse	5,7° x 1,9°	2,1 m	2014
	C-Klasse	9,0° x 3,0°	4,5 m	2021
	GLE-Klasse	9,0° x 3,0°	2,9 m	2018
	S-Klasse	5,7° x 1,9°	2,0 m	2013
	S-Klasse	10,0° x 5,0°	10,0 m	2020

VW

ID.3

 $9,2^\circ \times 4,6^\circ$ 

10,0 m

2020

Die bisher auf dem Markt erhältlichen HUD basieren alle auf dem Prinzip konventioneller Reflektionsoptik, bei welcher ein mit Hilfe einer PGU generiertes Bild über Spiegel im HUD Projektor und die WSS in das Sichtfeld der Fahrerin projiziert wird. Kern der PGU ist in der Regel ein TFT LCD oder DMD. Ein vielversprechender neuer Ansatz ist das *holografische HUD* und im Folgenden beschrieben.

### 3.3.1. Holografisches Head-up Display

Aufgrund des begrenzten Raumes zur Integration des HUD Projektors in der Instrumententafel, sind die Systemparameter, *FOV*, *Bildentfernung* und *HMB*, begrenzt. Eine Vergrößerung der benannten Parameter setzt bei Verwendung klassischer Reflektionsoptik eine Vergrößerung des HUD Projektors voraus. Mit dem Einsatz von holografischen optischen Elementen (HOE) ist es möglich die begrenzten Parameter zu vergrößern, bei zum Teil gleichzeitiger Reduktion des Projektorvolumens. Hierfür sind in der Literatur verschiedene Ansätze zu holografischen HUD zu finden, welche folgend kurz benannt werden sollen, ohne dabei tiefer auf die holografische Funktionsweise und dahinterliegende Physik einzugehen.

Das HOE kann an verschiedenen Stellen des optischen Systems eingesetzt werden. Beispiele sind die Integration des HOE in die WSS oder in die PGU des Projektors. Dabei werden sich immer die optischen Eigenschaften eines HOE zu Nutze gemacht und Beugungsordnungen anstelle klassischer Snell-Descartes Brechung verwendet. Der Einsatz eines HOE im optischen HUD System ermöglicht die Reduktion des Projektorvolumens bei gleichzeitiger Vergrößerung der Systemparameter [19].

Eine Annäherung an die Integration eines tatsächlichen HOE in das optische System stellt die Verwendung einer Fresnel-Linse in der WSS dar, welche in der Theorie eine Verkleinerung des Projektorvolumens ermöglicht [66]. Dieser Ansatz lässt eine Vergrößerung des FOV zu. Die Integration einer solchen Optik in die WSS ist allerdings aus produktionstechnischer Sicht äußerst schwierig umzusetzen, könnte allerdings über die Verwendung eines HOE, welcher eine Fresnel-Optik darstellt, realisiert werden [97].

Eine weitere Option ist der Einsatz eines Projektors auf Basis der Lichtwellenleiter-Technologie. Unter Verwendung eines digital erzeugten Beugungsgitters, entsprechend der

Bragg-Gleichung, können Hologramme in beliebiger Distanz erzeugt werden [79,104]. Allerdings steht die Integration dieser Technologie in ein Automobil noch am Anfang. Verschiedene technische Prototypen zeigen die großen Herausforderungen bei der technologischen Industrialisierung auf. Eine dieser Herausforderung ist die zum Teil neue Anordnung und Positionierung der HUD Projektoreinheit, da in einem holografisch-optischen System das Reflektionsgesetz *Einfallswinkel der Lichtstrahlen entspricht Ausfallwinkel der reflektierten Lichtstrahlen* nicht gültig ist. Aus Sicht des Fahrzeugpackaging kann dies ein Problem darstellen und zur Kollision mit anderen Bauteilen in der Instrumententafel führen. Zusätzlich ist eine äußerst genaue Positionierung des HOE zu den weiteren optischen Elementen in einem holografischen HUD System notwendig. Bereits kleinste Abweichung des Einfallswinkels von Lichtstrahlen auf das HOE im Bereich weniger Bogenminuten führen zur Reduktion der Beugungseffizienz des Hologramms. Dadurch treten Verluste in der Helligkeit des virtuellen Bildes auf. Zudem führt dies zu inhomogenen Bildhelligkeiten, vor allem bei dynamischen Kopfpositionen.

Ein weiteres Problem ist die Darstellung in Farbe sowie die Farbtreue des virtuellen Bildes eines Hologramms. Phasenhologramme werden in der Regel unter Verwendung einer einzigen Wellenlänge hergestellt, welche einer bestimmten Farbe entspricht. Eine mehrfarbige Darstellung ist entsprechend eine große Herausforderung und bisher noch nicht zufriedenstellend gelöst. Ein Fehlerbild ist bspw. der Farbwechsel von Bildinhalten bei Kopfbewegung. Außerdem können durch konstruktive und destruktive Interferenz von kohärentem Licht auch Speckles als Fehlerbild auftreten.

Auch die Integration des HOE in die WSS ist eine große Herausforderung. Das Hologramm ist in diesem Fall ein Volumenhologramm, welches in einem Photopolymer gespeichert ist. Der Laminationsprozess einer WSS verwendet hohe Temperaturen und Drücke, welche das Photopolymer und damit das HOE beschädigen können. Das Beschreiben des Hologramms nach Laminierung der Photopolymer Trägerfolie in die WSS ist ebenfalls kritisch. Gründe hierfür sind bspw. das grundsätzliche Handling der großen WSS und deren genaue schwingungsfreie Lagerung während des Schreibprozesses des Hologramms oder notwendige Vor- und Nachbehandlungsschritte. All diese Aspekte erhöhen zudem den Aufwand und Preis einer WSS mit HOE. Trotz dieser Herausforderungen ist die holografische Technologie aufgrund ihrer spannenden Möglichkeiten bei der Umsetzung von HUD weiterhin genau zu beobachten.

### 3.3.2. P-polarisiertes Head-up Display

Alle am Markt erhältlichen HUD mit konventioneller Reflektionsoptik machen sich die Reflektionseigenschaften von s-polarisiertem Licht an Glas zu nutze. Da sich die an der WSS auftreffenden Lichtstrahlen vom HUD Projektor in der Nähe des Brewster-Winkels befinden, reflektieren beinahe ausschließlich die s-polarisierten Lichtanteile (siehe Abschnitt 2.2.2 – Erklärung zu Lichtpolarisation). Aus diesem Grund sind die OEM und HUD Lieferanten darauf bedacht, möglichst hohe s-polarisierte Lichtanteile vom HUD Projektor an die WSS zu senden, um eine hohe Reflektivität an der WSS und damit hohe Helligkeiten des virtuellen Bildes zu erreichen. Auf diese Weise kann die benötigte Leuchtdichte der PGU reduziert werden, was aufgrund der hohen auftretenden Temperaturen und entsprechend kritischem Temperaturmanagement der PGU von Vorteil ist. Die Bemühung möglichst hohe s-polarisierte Lichtanteile zu erzeugen führt allerdings auch dazu, dass das virtuelle Bild kaum p-polarisierte Lichtanteile enthält und daher mit polarisierenden Sonnenbrillen kaum zu sehen ist.

Ein möglicher Ansatz dieses Problem in bestehenden Fahrzeugarchitekturen zu lösen, ist die Verwendung eines p-polarisierten HUD Systems. Beispielsweise haben Derlofske et al. (2019) den *Windshield Combiner Film* (WCF) eingeführt, welcher die Umsetzung eines p-polarisierten HUD Systems ermöglichen soll. Der WCF ist eine dünne durchsichtige Folie, welche p-polarisiertes Licht auch für die typischen Einfallswinkel der vom HUD Projektor kommenden Lichtstrahlen auf der WSS reflektiert. Der WCF kann in den PVB-Verbund der WSS integriert werden. Bei Umstellung der Lichtpolarisation der HUD PGU von s-polarisiertem auf p-polarisiertes Licht kann das virtuelle Bild auch bei Verwendung einer polarisierenden Sonnenbrille sichtbar sein.

Derlofske et al. (2019) behaupten, dass mit der Einführung des WCF „die Sichtbarkeit ausschließlich s-polarisierter virtueller Bilder und Doppelbildfehler (siehe Abschnitt 5.2) gelöst sei und „gleichzeitig kein keilwinkliges PVB mehr nötig ist“. Allerdings erfolgt keine Berücksichtigung möglicher Doppelbildfehler in einem p-polarisierten HUD System (siehe Kapitel 5). Entsprechend liegen keine Untersuchungen zur Messung und akzeptablen Ausprägung, noch Lösungsansätze zur möglichen Minimierung, des Doppelbildfehlers eines p-polarisierten HUD vor.

Mit Ausnahme der Untersuchungen von Qin et al. (2017) und Schneid (2008), sind in der Literatur kaum relevante Untersuchungen zu den Doppelbildfehlern eines p-polarisierten HUD vorhanden. Qin et al. (2017) analysieren Doppelbildfehler in Abhängigkeit des *Ambient*

*Contrast Ratio* (ACR). Das ACR beschreibt das Kontrastverhältnis zwischen der Leuchtdichte des virtuellen Bildes und der Leuchtdichte der Umgebung. Qin et al. (2017) zeigen in ihren Untersuchungen, dass das Kontrastverhältnis zwischen virtuellem Bild und Umgebung einen Einfluss auf die Wahrnehmung des Doppelbildfehlers besitzt. Allerdings bezieht sich diese Analyse auf den Abstand zwischen primärem und sekundären Bild, also der Reflektion an der Innen- bzw. Außenfläche der WSS, eines s-polarisierten HUD. Das Kontrastverhältnis des Doppelbildes, also zwischen den Leuchtdichten des primären und des sekundären Bildes, spielt hier keine Rolle. Gleichermaßen gilt für die Untersuchung von Schneid (2008) mit der ausschließlichen Analyse des maximal zulässigen Abstandes zwischen primärem und sekundären virtuellen Bild, allerdings unter Berücksichtigung des angezeigten Inhalts.

Empfehlungen zu den Kontrastanforderungen zwischen virtuellem Bild und der Umgebung wurden erstmals von Rogers et al. (1986) aufgestellt, welche sich auf die ursprüngliche Verwendung eines HUD in der Luftfahrt beziehen. Basierend auf diesen Empfehlungen von Rogers et al. (1986), haben Gish und Staplin (1995) dynamische Anforderungen an die Helligkeit eines HUD im Automobil, in Abhängigkeit der Umgebung, definiert. Außerdem zeigen Haeuslschmid et al. (2017), dass eine Erhöhung des Kontrastverhältnisses zwischen Leuchtdichte des virtuellen Bildes und Leuchtdichte der Umgebung die Wahrnehmung des HUD verbessert. Diese verbesserte Wahrnehmung des virtuellen Bildes führt zudem zu verkürzten Reaktionszeiten von Fahrer:innen.

Die Recherche zeigt, dass im aktuellen Stand der Technik zu p-polarisierten HUD Systemen keine Hinweise auf mögliche Doppelbildfehler oder dem Kontrastverhältnis zwischen den Leuchtdichten des primären und sekundären Bildes vorhanden sind.

### **3.4. Abbildungsfehler eines Augmented Reality Head-up Displays**

Die tatsächliche Untersuchung von Abbildungsfehlern im virtuellen Bild eines AR HUD ist bis auf wenige Ausnahmen begrenzt. Bspw. beschreibt Schneid (2008) in seiner Arbeit die Entwicklung und Erprobung eines AR HUD und geht dabei auch auf möglich auftretende Abbildungsfehler ein. Diese Beschreibung umfasst die Abbildungsfehler der sphärischen Aberration, des Astigmatismus, der Koma, der Bildfeldwölbung, des Doppelbildfehlers und der Verzeichnung, welche auf Artefakte in der Optik zurückzuführen sind. Mit Ausnahme des Doppelbildfehlers und der Verzeichnung sind die benannten Abbildungsfehler in der

tatsächlichen Anwendung eines AR HUD für Fahrer:innen nicht negativ wahrnehmbar oder bereits in angemessenem Maß kontrollierbar. Dies beruht auf den fortgeschrittenen simulativen Möglichkeiten zur Auslegung optischer Systeme und stetig steigender Fertigungspräzision optischer Elemente. Zu diesen in weiten Teilen unter Kontrolle liegenden Abbildungsfehlern gehören entsprechend die sphärische Aberration, der Astigmatismus, die Koma und die Bildfeldwölbung im virtuellen Bild eines AR HUD. Aus diesem Grund können diese im Weiteren vernachlässigt werden. Wie im vorausgehenden Abschnitt 3.3.2 beschrieben, untersucht Schneid (2008) den Doppelbildfehler nur hinsichtlich des maximal zulässigen Abstands zwischen primärem und sekundärem Bild in einem konventionellen s-polarisierten HUD System. Die Analyse von Schneid (2008) bzgl. maximal zulässiger Verzeichnung berücksichtigt ausschließlich eine gemittelte kissen- bzw. tonnenförmige Verzeichnung des virtuellen Bildes. Diese Analyse deckt im Gegensatz zur vollumfänglichen Beschreibung globaler und lokaler Verzeichnungen bei statischer und dynamischer Betrachtung in Abschnitt 2.4 nur einen geringen Teil der möglichen Abbildungsfehler eines AR HUD ab.

Hinsichtlich stereoskopischer Abbildungsfehler beschreibt bereits Gibson (1980) das mögliche Auftreten *retinaler Disparitäten* in HUD Systemen der Luftfahrt. Bereits kleine Disparitäten können demnach die Wahrnehmung des virtuellen Bildes beeinträchtigen. Dabei sollen Anwender:innen vor allem auf Disparitäten in vertikaler Richtung empfindlich sein, da das menschliche visuelle System aufgrund der horizontalen Anordnung der Augen keine vertikalen Konvergenzen oder Divergenzen umsetzen kann. Diese beschriebenen retinalen Disparitäten sind den horizontalen und vertikalen Divergenzen in Abschnitt 2.4.3 gleichzusetzen. Des Weiteren beziehen sich Gish und Staplin (1995) explizit auf das automobile HUD und mögliche *stereoskopischer Ausrichtungsfehler*. Diese können zu *okulomotorischer Ermüdung, binokularen Rivalität und Kopfschmerzen führen*. Die Toleranzgrenze für stereoskopische Abbildungsfehler kann bereits bei 1 mrad liegen [37], weist allerdings starke subjektive Differenzen auf.

Die WSS selbst wird in der Literatur bisher kaum bis gar nicht als Ursache für Abbildungsfehler beschrieben oder analysiert. Bspw. nennen Pfannmüller, Walter und Bengler (2015) unter anderem mangelnde Genauigkeit von Sensordaten, Kartenmaterial oder das Nickmoment als Ursache für Registrierungsfehler, nicht aber die WSS. Ebenso sind keine Auswertealgorithmen für die möglichen Abbildungsfehler eines AR HUD in der gängigen Literatur vertreten.

### 3.5. Zusammenfassung und offene Forschungsthemen

Ein AR HUD soll als passives Fahrassistenzsystem die Fahrer:in bei der Durchführung ihrer primären Fahraufgabe, dem Steuern des Pkw, unterstützen. In der Literatur ist Vielfach der Nachweis zu finden, dass für die Bereitstellung relevanter Informationen das HUD ggü. einem HDD überlegen ist. Gründe hierfür sind verkürzte Reaktionszeiten, ein geringerer Informationszugangsaufwand und schlussendlich eine steigende Fahrperformance. Des Weiteren ist in vorliegender Literatur ausführlich beschrieben, wie die Anzeigeninhalte zu gestalten und in welchen Situationen Informationen darzustellen sind. Diese lassen sich allgemein im grundlegenden Anzeigekonzept des UI zusammenfassen.

Damit die im Optimalfall wichtigen Informationen zur richtigen Zeit der Fahrer:in zur Verfügung stehen, muss allerdings auch das virtuelle Bild eines AR HUD eine bestimmte Qualität aufweisen. Nur wenn das virtuelle Bild eine Qualität aufweist, welche es der Fahrer:in ermöglicht die Inhalte eindeutig zu erkennen und Wahrzunehmen, kann das AR HUD eine Unterstützung für das Erfüllen der primären Fahraufgabe darstellen. Nach Endsley's (1995) *Modell des Situationsbewusstseins (Situation Awareness - SA)* ist das *Level 1 SA*, die *Wahrnehmung von Objekten in der Umwelt*, die Basis zur Entscheidungsfindung in dynamischen Umgebungen. Auf das AR HUD übertragen bedeutet dies, dass nur bei korrekter Wahrnehmung der bereitgestellten Informationen im virtuellen Bild, diese anschließend auch kognitiv Verstanden werden können.

Genau an dieser Stelle weist die Literatur eine Forschungslücke auf. Trotz der Vielzahl an wissenschaftlichen Studien und Untersuchungen im Themengebiet des AR HUD, ist die Analyse möglicher Abbildungsfehler im virtuellen Bild bisher nur sehr begrenzt Gegenstand des wissenschaftlichen Diskurses. Es sind nur unzureichend Untersuchungen vorliegend, welche beschreiben wie die genauen Abbildungsfehler im virtuellen Bild eines AR HUD entstehen können und ab welcher Ausprägung diese als störend wahrgenommen werden oder sogar das initiale Erkennen der Anzeigeninhalte beeinträchtigen. Entsprechend sind keine Berechnungsgrundlagen für Qualitätskennzahlen und Grenzwerte für diese Qualitätskennzahlen vorhanden. Insbesondere ist der Einfluss der WSS auf die virtuelle Bildqualität eines AR HUD in der Literatur bis auf wenige Ausnahmen nicht abgebildet und beschränkt sich vor allem auf den in konventionellen s-polarisierten HUD Systemen entstehenden Doppelbildfehler [78,84].

Bzgl. p-polarisierten HUD Systemen sind bisher ausschließlich Informationen zu deren technischen Umsetzung zu finden [20], nicht aber zu den potentiell entstehenden Abbildungsfehlern in einem solchen System. Folglich sind auch keine Analysen des Doppelbildfehlers in einem p-polarisierten HUD vorhanden, in welchem Maße dieser noch kundentauglich erscheint oder wie dieser minimiert werden könnte.

Ein möglicher Grund für das Fehlen dieser Untersuchungen im öffentlich zugänglichen Wissenschaftsbetrieb kann die Geheimhaltungsabsicht von OEM und Lieferanten zu dieser Thematik sein. Zudem sind bisher nur wenige OEM und Lieferanten in die Entwicklung von AR HUD Systemen eingestiegen. Am wichtigsten ist aber die Tatsache, dass zur Untersuchung von tatsächlichen AR HUD Systemen die Verfügbarkeit von seriennahen optischen Komponenten nicht gegeben ist. Dies liegt daran, dass die Entwicklung und Herstellung eines gesamten AR HUD Systems inkl. aller optischer Komponenten äußerst kostspielig ist. Daher ist die Umsetzung eines AR HUD Systems ausschließlich im kommerziellen Umfeld sinnhaft.

Umso wichtiger ist es mit vorliegender Arbeit erste Untersuchungen bzgl. den Anforderungen an die virtuelle Bildqualität eines AR HUD in Abhängigkeit der WSS, sowie eine Konzeptprüfung für p-polarisierte HUD Systeme, durchzuführen. Auf diese Weise ist es möglich einen Teil der bestehenden Forschungslücke zu schließen. Zusätzlich können die Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit auch auf Anwendungen, mit AR-Funktion oder grundsätzlich virtuellen Bildern, außerhalb des automobilen Umfelds übertragen werden.

## 4. Einfluss der Windschutzscheibe auf die subjektive Wahrnehmung eines AR HUD

### Verweis auf allgemeine Beiträge

Dieses Kapitel behandelt die Analyse zum Einfluss der WSS auf die subjektive Wahrnehmung des virtuellen Bildes eines AR HUD. Informationen zur Planung und Durchführung, der im Rahmen der zuvor genannten Analyse durchgeführten Probandenstudie, sind in der Publikation von Wagner et al. (2020) zu finden. Erstautor der Publikation ist Daniel Wagner. Planung, Aufbau und Durchführung der Studie wurden durch die Masterarbeit von Florian Dross unterstützt (Arbeit unter Sperrvermerk). Die Initiierung und Betreuung der Masterarbeit erfolgte durch Daniel Wagner.

Wie in Abschnitt *1.1 Problemstellung* ausgeführt, kann ein HUD nur dann eine Unterstützung der Fahrer:in sicherstellen, wenn die angezeigten virtuellen Bildinhalte in guter Qualität dargestellt sind. Die Vergrößerung der Projektionsdistanz und des virtuellen Bildes, sowie steigende Kundenansprüche an die Bildqualität, stellen genauere Anforderungen an die optischen Komponenten des HUD Systems und damit an die WSS. Um diese geometrischen Anforderungen an die WSS definieren zu können, müssen im Vorfeld die Kundenansprüche an die virtuelle Bildqualität bekannt sein. Das Entwicklungsprojekt der AR HUD WSS befindet sich zum Zeitpunkt der Studienplanung ca. zwei Jahre vor SOP. Daher sollen die Kundenansprüche im Rahmen dieser Arbeit genauer quantifiziert werden. Außerdem sind die Zusammenhänge zwischen subjektiv wahrnehmbarer und objektiv gemessener Qualität nicht ausreichend bekannt. Entsprechend müssen die vorhandenen Qualitätskennzahlen, die IQN, zur objektiven Bewertung der virtuellen Bildqualität verifiziert und falls nötig erweitert werden. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse können die Toleranzgrenzwerte der IQN festgelegt werden.

Die zum Planungszeitpunkt aktuell gültigen Toleranzgrenzwerte der IQN basieren auf den Erkenntnissen einer vorausgehenden Probandenstudie an einem 3D-Monitor, welche zu Beginn des Entwicklungsprojektes (fünf Jahre vor SOP) für das AR HUD durchgeführt wurde. Ziel dieser Studie war die Ermittlung der Wahrnehmungs- und Störschwellen für diverse Abbildungsfehler, sowie die Ableitung von Toleranzgrenzwerten für die IQN. Eine vergleichbare Bewertung von Abbildungsfehlern eines tatsächlichen AR HUD Systems hat bisher nicht stattgefunden.

Daher ist es essentiell im Rahmen einer neuen Probandenstudie einen Abgleich der Kundenansprüche mit den Grenzwerten der IQN durchzuführen. Bleibt dieser Schritt aus, könnten die Qualitätsansprüche an die WSS zu niedrig oder zu hoch gewählt sein. Zu niedrige Qualitätsanforderungen können dazu führen, dass die Kundenansprüche nicht erfüllt werden. Überhöhte Qualitätsanforderungen führen zu einer Verschwendungen von Ressourcen, da der Ausschuss produzierter WSS ansteigt. Dies ist aus unternehmerischer Sicht vor allem aus zwei Gründen zu vermeiden: Zum einen gefährdet ein hoher Produktionsausschuss die sichere Belieferung der Fahrzeugproduktion mit genügend Bauteilen und zum anderen erhöhen sich dadurch die Kosten. Des Weiteren schränken überhöhte Qualitätsanforderungen die Auswahl potentieller Lieferanten ein, da möglicherweise nicht alle Lieferanten in der Lage sind die gestellten Qualitätsanforderungen zu erreichen.

Die WSS ist der erste, transparente Spiegel im optischen HUD System und trägt mit ihrer Formgenauigkeit maßgeblich zur virtuellen Bildqualität bei. Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, kann die WSS Ursache für verschiedene Abbildungsfehler sein. Dieses Kapitel stellt den *Untersuchungsbereich 1* der Dissertation dar und behandelt die folgenden Forschungsfragen (siehe Abschnitt 1.2 *Zielsetzung & Forschungsfragen*):

- (A) *Welche Abbildungsfehler können im virtuellen Bild eines AR HUD entstehen?*
- (B) *Wie nehmen Kund:innen die virtuelle Bildqualität subjektiv wahr?*
- (C) *Welchen Einfluss hat die Windschutzscheibe auf Abbildungsfehler im virtuellen Bild sowie die subjektiv wahrgenommene virtuelle Bildqualität?*
- (D) *Ist die subjektive Wahrnehmung der Kund:innen auf die definierten IQN für Abbildungsfehler zurückzuführen oder müssen diese erweitert werden?*

Die Forschungsfragen werden im Rahmen einer Probandenstudie untersucht. Die Durchführung der Studie erfolgt unter Verwendung seriennaher Komponenten des AR HUD Systems, welche in einen Teilaufbau eines Fahrzeuges integriert werden. Die Grundlage des Versuchsträgers ist eine Teilkarosse der Mercedes-Benz S-Klasse 2020, mit ihrer internen Baureihenbezeichnung W223. Ebenso entsprechen die verwendeten AR HUD Komponenten denjenigen der Baureihe W223.

Auf Basis dieser erstmaligen Bewertung der virtuellen Bildqualität mit tatsächlicher seriennaher Hardware, wird die subjektive Wahrnehmung der Kund:innen in Abhängigkeit der WSS untersucht. Die Verwendung verschiedener WSS in unterschiedlicher Qualität, sowohl bzgl. ihrer Formgenauigkeit als auch ihrer IQN, stellt eine Bewertung in Abhängigkeit der WSS

sicher. Demnach ist ebenfalls zu prüfen, inwieweit die vorhandenen IQN für Abbildungsfehler mit der subjektiven Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität konvergieren.

Bezüglich des Einflusses der Formgenauigkeit der WSS stehen dabei die folgenden Hypothesen im Fokus der Untersuchung, welche anhand der Probandenstudie evaluiert werden:

*Hypothese 1: Unterschiede in der Formgenauigkeit von Windschutzscheiben, und damit in ihrer Qualität, haben keinen Einfluss auf die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes.*

*Hypothese 2: Die Qualitätskennzahlen des virtuellen Bildes, die IQN, stehen im Einklang mit der subjektiv wahrgenommenen Qualität.*

*Hypothese 3: Alle Bereiche eines virtuellen Bildes werden in gleicher Qualität subjektiv wahrgenommen.*

Im folgenden Abschnitt findet eine Detaillierung der Aufgabenstellung und der Vorgehensweise hinsichtlich Planung und Durchführung der Studie statt.

## 4.1. Vorgehensweise & Studienprämissen

In folgender Tabelle sind die nominalen technischen Daten des AR HUD Systems der Baureihe W223, sowie die technischen Daten des HUD Systems des Vorgängers W222 (Mercedes-Benz S-Klasse 2013) aufgelistet:

**Tabelle 2: Technische Systemdatenübersicht für AR HUD Generation 1 (W223) und HUD Generation 1 (W222)**

Technische Systemdaten	AR HUD W223	HUD W222
<i>Mercedes-Benz HUD Generation</i>	AR HUD Generation 1	HUD Generation 1
Bildentfernung	10 m	2,5 m
Virtuelle Bildgröße	1800 mm × 900 mm	210 mm × 70 mm
Reflektionsfläche WSS	1024 cm <sup>2</sup>	256 cm <sup>2</sup>

Die AR HUD WSS der Baureihe W223 muss im Reflektionsbereich höchste Formgenauigkeiten aufweisen. Die schematische Darstellung in Abb. 4.1 verbildlicht die Vergrößerung des Reflektionsbereichs zwischen den Mercedes-Benz HUD Generationen um das ca. vierfache und verdeutlicht damit in welchem Bereich die WSS höchsten optischen Ansprüchen genügen muss. Da der Projektor für AR HUD Systeme einen großen Bauraum von ca. 15 Litern in Anspruch nimmt, kommt dieser nur in den größten Baureihen der Mercedes-Benz AG zum Einsatz.



Abb. 4.1: Schematische Darstellung der Reflektionsfläche auf der WSS für verschiedene HUD Generationen

Die Vergrößerung des virtuellen Bildes sowie der virtuellen Bildentfernung erfolgen zum einen durch das größere Volumen des HUD Projektors und des dadurch verlängerten optischen Weges der Lichtstrahlen. Zum anderen tragen auch die drei Spiegel des AR HUD Systems zur Vergrößerung des virtuellen Bildes bei. Diese sind die WSS, sowie die asphärischen Spiegel im Projektor. Die starke optische Vergrößerung des AR HUD Systems, mit einem Faktor von ca. 20, erhöht den Einfluss geometrischer Ungenauigkeiten der Windschutzscheibenform zusätzlich und wirkt als Hebel für die Entstehung von Abbildungsfehlern.

Untersuchungen der Komponenten für das AR HUD System haben zu Beginn dieser Arbeit lediglich am HUD Prüfstand der Mercedes-Benz AG stattgefunden. Die Probandenstudie soll die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität unter Verwendung seriennaher Entwicklungskomponenten wiedergeben und damit den Reifegrad des AR HUD Systems bestimmen. Um den Proband:innen ein tatsächliches Fahrgefühl zu vermitteln und dadurch die Bewertungsqualität bzw. Aussagefähigkeit der Studienergebnisse zu verbessern, erfolgt der Aufbau eines Versuchsträgers. Die Durchführung der Studie erfolgt nicht in einem tatsächlichen Fahrzeug unter realen Fahrbedingungen, sondern in einem für die Studie entwickelten Versuchsträger. Diese Entscheidung hat zwei Gründe. Erstens müssen die untersuchten WSS während der Studie wiederholbar ausgetauscht werden. Aus diesem Grund ist kein Verkleben der WSS in ein Fahrzeug umsetzbar. Zweitens soll zwar eine realitätsnahe Fahrsituation für die Proband:innen entstehen, allerdings muss die Aufmerksamkeit der Proband:innen ausschließlich auf die Bewertung der virtuellen Bildqualität ausgerichtet sein.

Der Versuchsträger muss in einem realitätsnahen Versuchsaufbau folgende Punkte erfüllen:

- Positionsgetreue Aufnahme der optischen Systemkomponenten, sowie wiederholbarer Austausch der WSS
- Ansteuerung des Projektors ohne tatsächliche Fahrzeugumgebung, mit Hilfe einer Restbussimulation als Ersatz für Steuergeräte und Sensorsignale
- Darstellung verschiedener virtueller Bildinhalte zur subjektiven Bewertung der virtuellen Bildqualität

Zusätzlich ist die Integration eines Messsystems in den Versuchsträger zur objektiven Bewertung und Berechnung der IQN aus Sicht der Proband:innen umzusetzen. Die Umsetzungsbeschreibung dieser Prämissen ist im Abschnitt *4.2.1 Versuchsträger* zu finden.

Das Versuchsobjekt der Studie ist die WSS. Um den Einfluss der WSS auf die subjektiv wahrgenommene Bildqualität zu untersuchen, ist es notwendig unterschiedliche WSS aus verschiedenen Produktionsläufen in der Studie zu verwenden. In der Entwicklungsphase der WSS werden viele Produktionsläufe durchgeführt um in einem iterativen Prozess die Qualität der WSS über die Anpassung der Produktionsparameter voranzutreiben und damit den Reifegrad zu erhöhen. Dabei muss sichergestellt sein, dass die ausgewählten Versuchsobjekte verschiedene Qualitäten hinsichtlich objektiv gemessener IQN aufweisen und gleichzeitig Unterschiede im virtuellen Bild subjektiv eindeutig sichtbar sind. Die Auswahl der Versuchsobjekte ist im Abschnitt *4.2.2 Auswahl der Versuchsobjekte (Windschutzscheiben)* beschrieben.

Versuchssubjekt der Studien sind die Proband:innen. Die Auswahl der Proband:innen muss ein repräsentatives Probandenkollektiv sicherstellen, welches Basis für eine aussagekräftige Studie darstellt. Die Auswahl der Versuchssubjekte ist im Abschnitt *4.2.3 Auswahl der Versuchssubjekte (Proband:innen)* dargestellt.

Des Weiteren müssen die Abbildungsinhalte im virtuellen Bild für die Studien definiert und erstellt werden. Die richtige Auswahl der Abbildungsinhalte ist Voraussetzung, damit die Proband:innen die unterschiedlichen Abbildungsfehler wahrnehmen können. Gleichzeitig müssen die gewählten Abbildungsinhalte der Studie die Abbildungsinhalte des tatsächlichen AR HUD Systems repräsentieren. Folglich müssen Testbilder erstellt werden, welche die vorausgehenden Punkte berücksichtigen und die Bewertung verschiedener Abbildungsfehler

zulassen. Die Auswahl und Erstellung der Abbildungsinhalte ist in Abschnitt *4.2.4 Erstellung der Testbilder und des Fragebogens* beschrieben.

Gleichzeitig kann die Befragung der Proband:innen definiert und damit die Gestaltung des Fragebogens durchgeführt werden. Der Fragebogen muss unter Berücksichtigung der dargestellten Abbildungsinhalte sicherstellen, dass dessen Beantwortung durch die Proband:innen, Rückschlüsse auf die virtuelle Bildqualität ermöglicht. Darunter fällt auch der Abgleich zu den IQN. Die Formulierungen des Fragebogens müssen deshalb präzise sein, damit die Verständlichkeit der Fragestellung eindeutig ist und die subjektive Bewertung einen möglichst direkten Vergleich mit den IQN ermöglicht. Eine genaue Beschreibung hierzu ist ebenfalls im Abschnitt *4.2.4 Erstellung der Testbilder und des Fragebogens* ausgeführt.

Zuletzt erfolgt die Festlegung von Aufbau und Ablauf der Studie. Die Planung berücksichtigt die zuvor aufgestellten Rahmenbedingungen. Darunter fallen die Möglichkeiten und Grenzen des Versuchsträgers, der Versuchsobjekte, der Versuchssubjekte, der Abbildungsinhalte und der Fragestellungen. Außerdem bilden äußere Gegebenheiten, bspw. die begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen, den Rahmen der Studie. Darunter fallen die Räumlichkeiten, Studienpersonal, Projektterminplan sowie monetäre Mittel. Die genaue Definition von Aufbau und Ablauf ist im Abschnitt *4.2.5 Aufbau und Ablauf der Studien* beschrieben.

Darüber hinaus müssen die aufgestellten Prämissen der Studie und deren Umsetzung in iterativen Schleifen überprüft und angepasst werden, damit diese untereinander und in Bezug auf das Studienziel stimmig sind. Das Hauptkriterium bei der Erstellung des Studiendesigns ist es Studienergebnisse zu generieren, welche als Datenbasis zur Beantwortung der Forschungsfragen dienen.

## **4.2. Studiendesign**

Dieser Abschnitt beschreibt das Studiendesign der Probandenstudie. Die ausführliche Beschreibung dient der Interpretation und wissenschaftlichen Einordnung der Studie. Folglich kann dieser Abschnitt später als Basis zur Diskussion der Ergebnisse und zum Aufzeigen der Limitationen herangezogen werden.

#### 4.2.1. Versuchsträger

Die Basis für den Versuchsträger bildet eine Teilkarosse der Baureihe W223 (Mercedes-Benz S-Klasse 2020), welche in Abb. 4.2 zu sehen ist. Die Rohkarosse ist auf einem Rahmen aus item-Profilen mit Rollen angebracht, welche den einfachen Transport des Versuchsträges ermöglicht. In diesen müssen die Komponenten des AR HUD Systems, der AR HUD Projektor und die AR HUD WSS, integriert werden. In diesem Abschnitt ist die technische Umsetzung der aufgestellten Prämissen bzgl. des Versuchsträger aus Abschnitt 4.1 *Vorgehensweise & Studienprämissen* schrittweise beschrieben.



Abb. 4.2: Versuchsträger als Teil der Rohkarosse (A- bis B-Säule) der Baureihe W223

#### Positionsgutreue Aufnahme der optischen Systemkomponenten

Um den Einfluss von äußerer Toleranzen bestmöglich zu reduzieren, müssen bereits beim Einbau der Komponenten Maßnahmen getroffen werden. Die Rohkarosse und der Cockpitquerträger sind in ihren Geometrien toleranzbehaftet. Dies kann zu einer Fehlpositionierung der Komponenten führen. Folglich können Abbildungsfehler im virtuellen Bild entstehen. Aus diesem Grund findet der Komponenteneinbau, unter Verwendung des *ATOS-Systems* der Firma *gom*, in einer optischen Geometrievermessungsstation statt.

Abb. 4.3 zeigt die Abweichungen in X-, Y- und Z-Richtung der Einmessungspunkte der verwendeten Teilkarosse für den Versuchsträger in Millimetern. Dabei wird anhand der Einmessungspunkte an A- und B-Säule der Rohkarosse das Fahrzeugkoordinatensystem definiert.

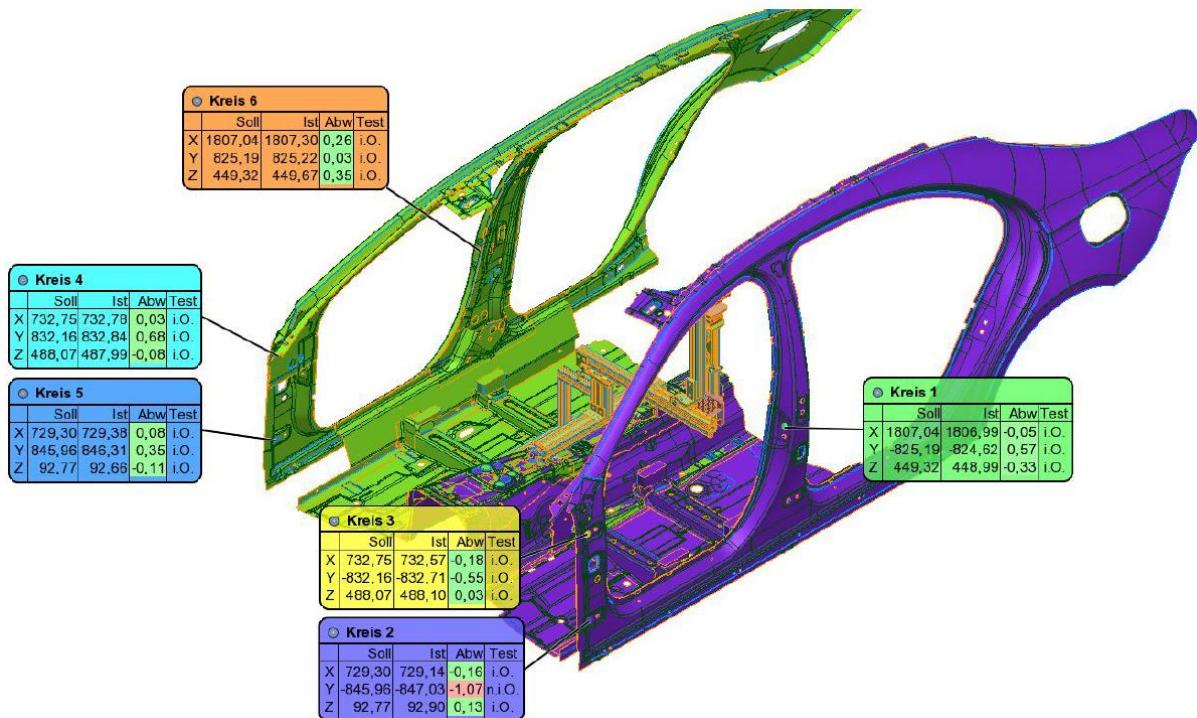


Abb. 4.3: Einmessung der Rohkarosse in das Fahrzeugkoordinatensystem inkl. Abweichungen in Millimetern

In Abb. 4.4 sind die Abweichungen der Rohkarosse im Aufnahmebereich der WSS zu sehen. Die Abweichung ist in orthogonaler Richtung zur Fläche des Messpunktes zu verstehen und in Millimetern angegeben. Da die korrekte Aufnahme der WSS höchste Priorität hat, wird an dieser Stelle die *Best-Fit* Methode angewendet. Dabei definiert die Software des Messsystems durch eine Positionskorrektur den Fahrzeugkoordinatenursprung neu, um auf diese Weise die auftretenden Abweichungen zu minimieren. Die in Abb. 4.4 markierten Messpunkte A1 bis A4 sind für die Windschutzscheibenlage am wichtigsten, da sich an diesen Stellen die *Spacer* der WSS befinden, welche direkten Kontakt zur Rohkarosse haben und damit die Aufnahmepunkte bilden. Da die WSS während der Studie ausgetauscht werden müssen, findet keine Verklebung und damit kein Einsatz des Windschutzscheibenklebstoffes statt. Entsprechend erfolgt keine Kraftübertragung der Rohkarosse über eine Verdrückung des Klebstoffes an die WSS und daher auch keine unbeabsichtigte Lageänderung der WSS. Da vor allem rotatorische Abweichungen der Windschutzscheibenlage einen großen Einfluss auf die Lage der Reflektionsfläche sowie das optische System besitzen und Abbildungsfehler hervorrufen können, müssen diese rotatorischen Abweichungen möglichst klein sein [99]. Translatorische Bewegungen verändern

zwar die Brennweite des optischen HUD Systems, wirken sich allerdings kaum auf die virtuelle Bildqualität aus und können folglich vernachlässigt werden. In Abb. 4.4 ist erkenntlich, dass die maximale rotatorische Abweichung zwischen den beiden Punkten A2 und A3 besteht. Die Abweichung beträgt 0,8 mm. Die Toleranz für die Rotation der WSS wird über ihre Abweichungen der Aufnahmepunkte zueinander festgelegt und beträgt in horizontaler Richtung 1,7 mm (A1 zu A2 bzw. A3 zu A4) sowie in vertikaler Richtung 1,2 mm (A2 zu A3 bzw. A1 zu A4) [99]. Folglich sind die Abweichungen für die Windschutzscheibenaufnahme der verwendeten Rohkarosse zum Aufbau des Versuchsträgers innerhalb der Toleranz.

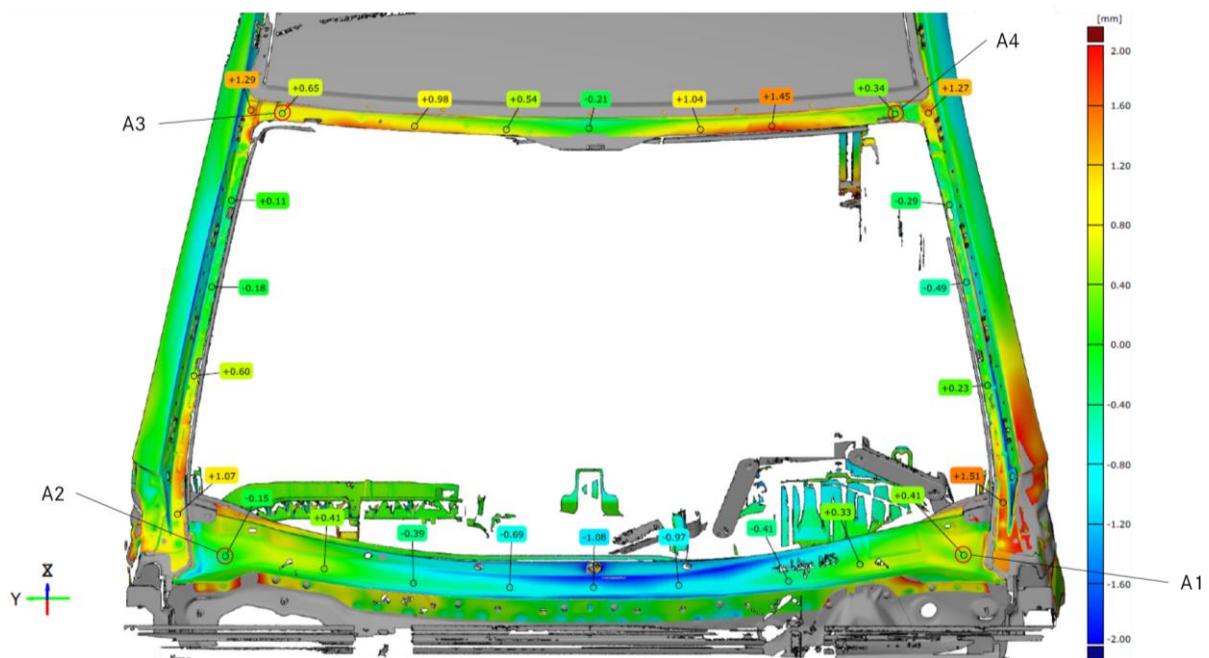


Abb. 4.4: Abweichungen der Rohkarosse im Bereich der Windschutzscheibenaufnahme in Millimetern

Die Auflagefläche der Rohkarosse für die WSS kann nicht durch bauliche Maßnahmen verändert bzw. verbessert werden. Daher wird die Windschutzscheibenaufnahme als Basis für die Best-Fit Methode verwendet und entsprechend das Koordinatensystem zur Minimierung der Abweichungen angepasst. Aufgrund dieser Anpassung und leichten Verschiebung des Koordinatensystems verändern und verschlechtern sich die Abweichungen der Einmessungspunkte für die Rohkarosse (siehe Abb. 4.5). Die Verschlechterung dieser Abweichungen ist für die Studie nicht relevant, hat keine negativen Auswirkungen auf die Studienergebnisse und wird daher bewusst akzeptiert.

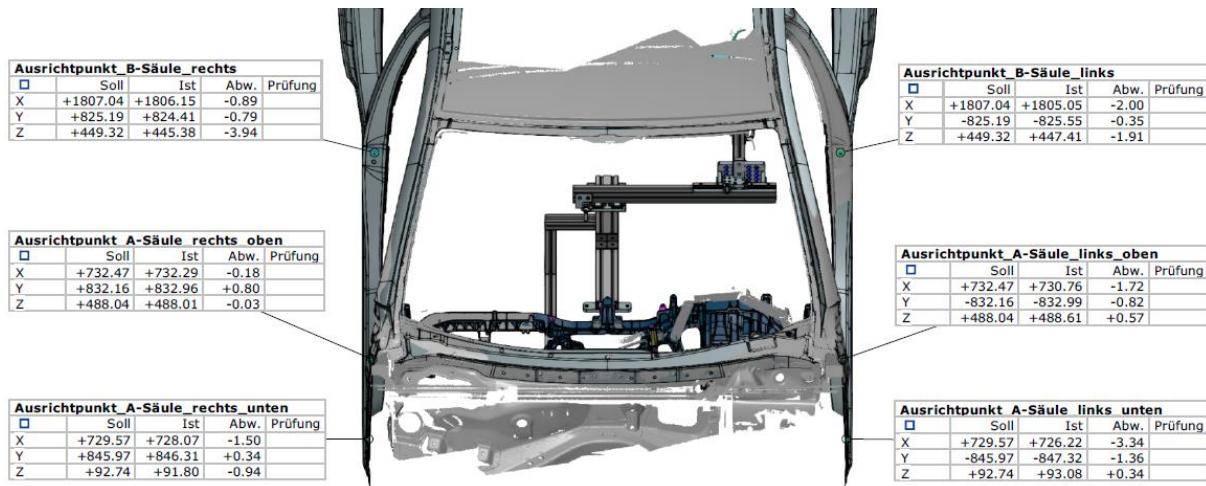


Abb. 4.5: Abweichungen der Rohkarosse nach Anwendung der Best-Fit Methode in Millimetern

Um den HUD Projektor in den Versuchsträger einbauen zu können, muss vorab die Montage des Cockpitquerträgers erfolgen. Unter Berücksichtigung seiner geometrischen Bauteilabweichungen wird der Querträger in der Rohkarosse so positioniert, dass eine minimale Lageabweichung der optischen AR HUD Systemkomponenten zueinander realisiert werden kann. In Abb. 4.6 sind der Querträger im verbauten Zustand, sowie die Lageabweichungen der Aufnahmepunkte für den HUD Projektor dargestellt. Mit Hilfe der Best-Fit Methode bleiben alle vier Aufnahmepunkte des HUD Projektors, Headup\_VR, Headup\_VL, Headup\_HR und Headup\_HL, innerhalb der max. zulässigen Abweichung (<1 mm) für alle drei Achsen.

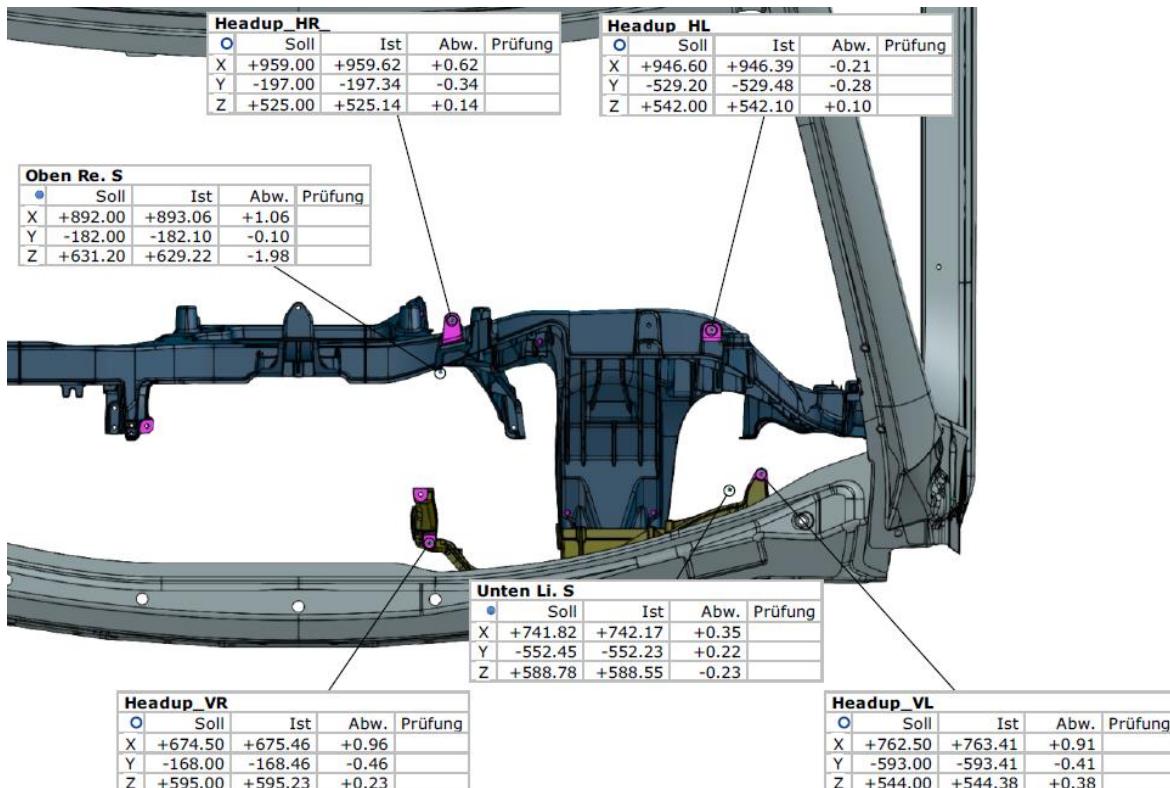


Abb. 4.6: Abweichungen der Projektoraufnahmepunkte nach Anwendung der Best-Fit Methode in Millimetern

Basis für die Ausrichtung des Cockpitquerträgers ist das angepasste Koordinatensystem an die Windschutzscheibenaufnahme, um somit geringste Lageabweichungen der Komponenten im optischen System zu erreichen. Auf diese Weise können Abbildungsfehler, welche auf Lageabweichungen der optischen Komponenten zurückzuführen sind, minimiert werden. Absolute Abweichungen der verschiedenen Messpunkte zur CAD-0-Lage, sowie die korrekte Positionierung anderer Bauteile, bspw. des Lenkgestänges oder anderer Interieurkomponenten, sind für die Probandenstudie nicht relevant und werden hierbei bewusst vernachlässigt.

Des Weiteren muss der Versuchsträger einen wiederholbaren Austausch der WSS gewährleisten, welcher keinen Einfluss auf die objektiv messbare und subjektiv wahrnehmbare Qualität des virtuellen Bildes ausübt. Eine kostengünstige Umsetzung ist die Übernahme des *Anschlagkonzeptes* des HUD Prüfstands. Die Umsetzung des Anschlagkonzeptes am Versuchsträger ist in einer Schnittdarstellung der X-Z-Ebene in Abb. 4.7 zu sehen. Hierzu werden zwei Anschlüsse an einem item-Profil am oberen Ende der Motorhaube befestigt. Dieses Konzept ist hinsichtlich Positionierungsgenauigkeit der WSS mittels konventioneller Messsystemanalyse (MSA) hinreichend verifiziert [99] und unter dem Punkt *Integration eines Messsystems in den Versuchsträger* beschrieben.

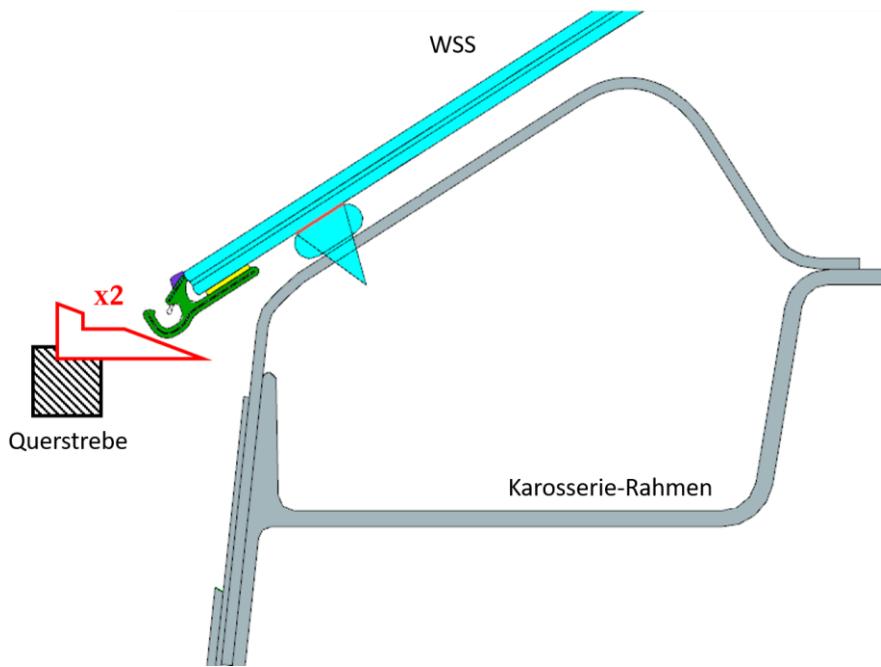


Abb. 4.7: Anschlagkonzept zur wiederholbaren Positionierung der WSS auf dem Versuchsträger

Die Anschlüsse sind in Abb. 4.7 rot dargestellt. Deren Ausrichtung ist einmalig durchzuführen. Die Ausrichtung der Anschlüsse und damit der WSS erfolgt über das bündige Positionieren des Dachkantenprofils an der Dachkante des Rohbaus und mittige Positionieren zwischen der linken u. rechten A-Säule. Eine Ausrichtung nach Augenmaß ist hierbei ausreichend.

Anschließend können die Anschläge an das Wasserkastenprofil der WSS herangefahren und arretiert werden. Das Wasserkastenprofil ist in Abb. 4.7 grün dargestellt. In Folge dessen kann die Platzierung der WSS auf dem Versuchsträger stattfinden. Bei jeder Platzierung ist die mittige Ausrichtung der Scheibe zwischen den A-Säulen, sowie das korrekte Anliegen des Dachkantenprofils an der Dachkante des Rohbaus zu überprüfen.

Mit Hilfe der Einbaumaßnahmen ist sichergestellt, dass der Komponenteneinbau keinen Störfaktor darstellt und damit keinen Einfluss auf die Qualität des virtuellen Bildes hat.

## **Ansteuerung des AR HUD Projektors**

Um den AR HUD Projektor betreiben zu können ist neben der Stromversorgung auch eine Fahrzeugumgebung notwendig, welche den Projektor mit Signalen versorgt und ansteuert. Die Ansteuerung des Projektors findet in den Baureihen der Mercedes-Benz AG über das Steuergerät des Kombiinstruments statt. Die elektrischen Komponenten kommunizieren via CAN BUS. Das Steuergerät des Kombiinstruments erhält eine Vielzahl von Informationen über den Fahrzustand des Fahrzeugs, Umweltbedingungen oder den Funktionszustand anderer elektrischer Fahrzeugsysteme. Zu den Fahrzeugzuständen zählen bspw. die Geschwindigkeit und Position des Fahrzeugs. Umweltbedingungen können die Helligkeit oder der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sein. All diese und weitere Daten verwendet das Steuergerät zur Ansteuerung und Kommunikation mit dem HUD Projektor, um bspw. dessen Helligkeit zu regulieren.

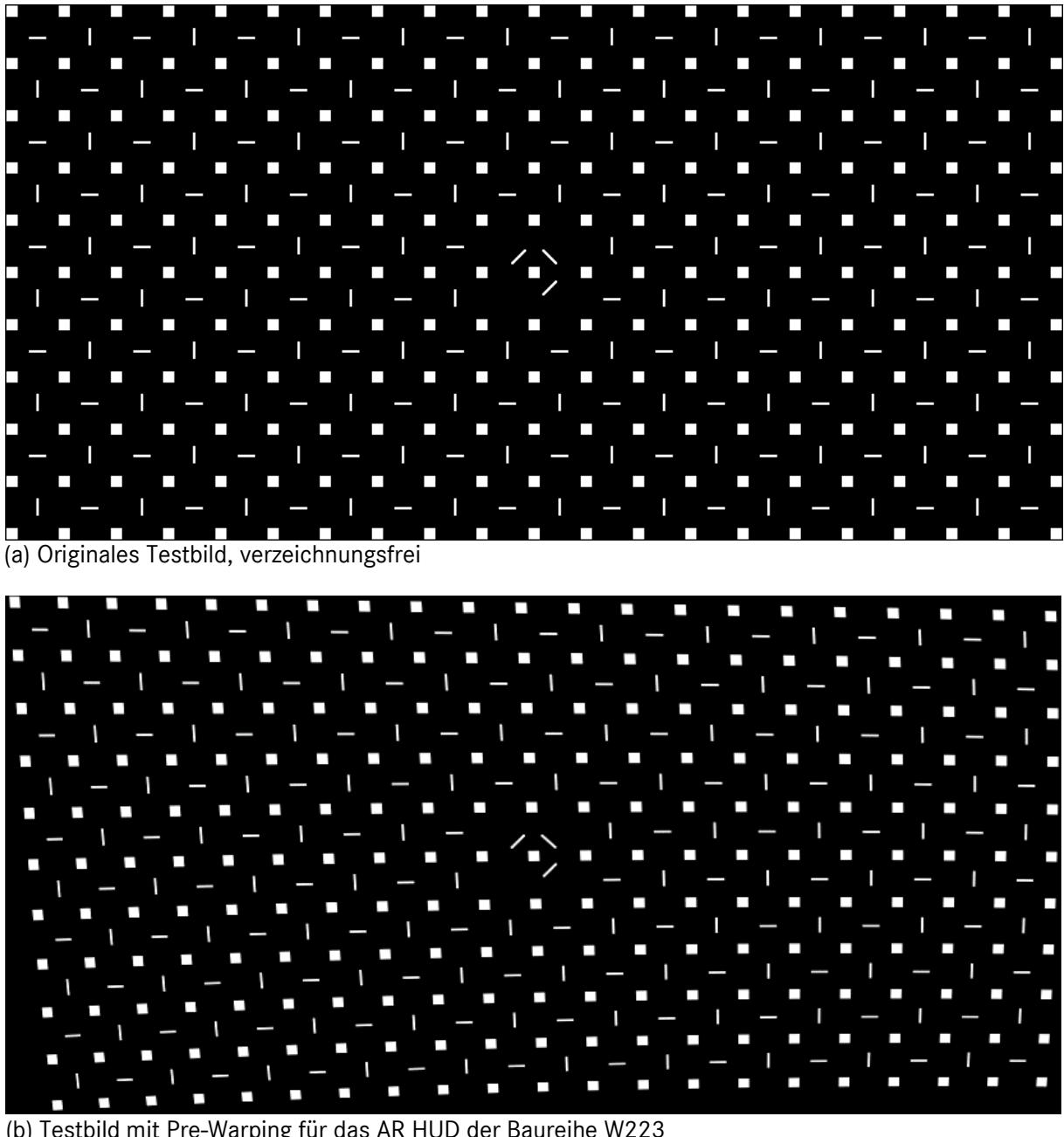
In das Steuergerät ist außerdem die sogenannte *HUD Engine* integriert, welche auf Basis der im Steuergerät aggregierten Daten die Position und Inhalte der HUD Anzeige generiert und über einen HSVL an den Projektor sendet. Der Projektor lässt die Anzeige von Bildinhalten nur zu, wenn die übermittelten Informationen stimmig sind. Zum Beispiel wird die Helligkeit des Projektors und damit die Helligkeit des virtuellen Bildes über das Helligkeitssignal des Regen-Licht-Sensors (*RLS*) bzw. der Multi-Purpose-Kamera (*MPC*) gesteuert. Stellt der HUD Projektor einen Widerspruch zwischen Helligkeitsbefehl der *HUD Engine* und Rohsignal des *RLS* oder der *MPC* fest, aus welchen der Helligkeitsbefehl abgeleitet und die Lichtleistung der PGU bestimmt wird, verweigert der Projektor die Ansteuerung. Im beschriebenen Fallbeispiel kann so eine Blendung der Fahrer:in verhindert werden, welche durch einen System- bzw. Kommunikationsfehler, oder im schlimmsten Fall durch ungewollten fälschlichen Zugriff Dritter ausgelöst werden könnte.

Um die Risiken eines solchen oder ähnlichen Angriffs dritter Parteien zu reduzieren, ist die Ansteuerung des Projektors nur durch vorherige Authentifizierung möglich. Die Authentifizierung wird mittels spezifischen Zertifikaten durchgeführt, welche im Steuergerät hinterlegt sein müssen. Da diese gesamte Fahrzeugumgebung im Versuchsträger nicht vorhanden ist, muss die Fahrzeugumgebung mittels CAN-Restbussimulation erzeugt werden. Die Restbussimulation wird über die Software *CANoe* der Firma Vector Informatik GmbH betrieben. Ein Add-on der Mercedes-Benz AG ermöglicht außerdem den Zugriff auf die benötigten Zertifikate zur Authentifizierung ggü. dem HUD Projektor, auf welche über ein firmeninternes Online-Tool Zugriff besteht. Auf diese Weise ist die Ansteuerung und Kommunikation mit dem HUD Projektor sichergestellt. Mit Hilfe der Restbussimulation lassen sich alle Fahrzeugparameter, welche für die Ansteuerung und Kommunikation von Bedeutung sind, manuell einstellen. Beispiele hierfür sind die Einstellung des RLS-/MPC-Signals oder das Auslesen der *Warping Matrize*. Informationen zu letzterer sind im folgenden Unterabschnitt zu finden.

Die HUD Engine, welche Inhalte und Position der Anzeige generiert, ist nicht in der Restbussimulation enthalten. Aus diesem Grund wird eine *Image Box* der Firma TZ Electronic Systems GmbH verwendet. Über die Image Box besteht via HSVL die Möglichkeit zur Übertragung beliebiger Bildinhalte, inklusive Warping, an den HUD Projektor. Dies lässt die individuelle Darstellung von Inhalten zu, welche eine intuitive Bewertung der virtuellen Bildqualität durch die Proband:innen ermöglicht.

## **Warping zur Korrektur von Verzerrungen durch den HUD Projektor**

Um Verzeichnungen des virtuellen Bildes zu minimieren, welche nicht auf die WSS zurückzuführen sind, findet ein *Warping* der Bildinhalte statt. Diese bewusste *Verzeichnung* des Bildinputs ist nötig, da die Fahrer:in die dargestellten Bildinhalte der PGU, aufgrund der Reflektionen an den beiden asphärischen Spiegeln sowie der freiformflächigen WSS, im virtuellen Bild stark verzeichnet wahrnehmen würde. In Abb. 4.8 ist anhand eines Testbildes das nötige Warping exemplarisch dargestellt. Dabei ist oben (a) das verzeichnungsfreie Testbild, und unten das Testbild mit Warping (b) zu sehen. Um ein verzeichnungsfreies virtuelles Bild zu erhalten, stellt die PGU des Projektors das Testbild mit Warping (b) dar. Das Warping befreit das virtuelle Bild von Verzeichnungen allerdings nur dann, wenn alle Komponenten keine Abweichungen aufweisen und sich ihre Einbautagen im CAD-0 Zustand befinden.



**Abb. 4.8: Verzerrungsfreies (a) und vorverzerrtes (b) Testbild für das AR HUD der Baureihe W223 zur Kompensation der freiformflächigen Spiegel im HUD System**

Da sowohl die optischen Geometrien der HUD Komponenten, als auch ihre Einbaulagen, nicht toleranzfrei sind, ist ein weiteres Warping nötig. Diese Korrektur findet bei der tatsächlichen Fahrzeugproduktion *End-of-Line* statt. Das bedeutet, dass das HUD System nach Fertigstellung des Fahrzeuges ein Warping erhält, um die Toleranzen des HUD Projektors und der WSS sowie deren Einbaulagen zu korrigieren. Die Korrektur ist jedoch zum Aufbauzeitpunkt des Versuchsträgers noch nicht verfügbar. Allerdings ist die Korrektur von Abbildungsfehlern des virtuellen Bildes im Falle der Probandenstudie nicht nötig, wenn die Abbildungsfehler auf die Windschutzscheibengeometrie zurückzuführen sind. Die Probandenstudie untersucht gerade

die subjektive Wahrnehmung von Abbildungsfehlern aufgrund unterschiedlicher Qualitäten der WSS. Entsprechend gilt es letztendlich diejenigen Abbildungsfehler zu reduzieren, welche auf den AR HUD Projektor zurückzuführen sind. Daher wird über die zu zeigenden Bildinhalte eine weitere *Warpingmatrix* (Verzeichnungsmatrix) gelegt, welche die Optikfehler des HUD Projektors korrigiert. Diese projektorspezifische Warpingmatrix wird vom Lieferant liefert, indem dieser für jeden Projektor ein virtuelles Testbild an einer CAD-0-WSS via Kamera erfasst und daraus eine spezifische Warpingmatrix für jeden Projektor ableitet. Die CAD-0-WSS ist über einen polierten Aluminiumspiegel abgebildet, welcher die exakte CAD-0-Fläche (Toleranzen <7 µm) des Reflektionsbereichs der WSS besitzt. Die im vorausgehenden Abschnitt beschriebene Image Box verwendet diese projektorspezifische Warpingmatrix und legt diese über die anzuseigenden Bildinhalte.

Durch diese Maßnahme werden die Störfaktoren zusätzlich minimiert. Entsprechend hat ausschließlich die Qualität der WSS einen Einfluss auf das virtuelle Bild und stellt daher die einzige Variable der Studie dar.

## **Integration eines Messsystems in den Versuchsträger**

Schließlich soll der Versuchsträger die Möglichkeit bieten die Qualitätskennzahlen des virtuellen Bildes möglichst aus Sicht der Proband:innen zu berechnen. Dadurch ist ein Vergleich zwischen subjektiver Wahrnehmung der Proband:innen und objektiver Messung mittels IQN möglich. Dies ergänzt die Messdaten hinsichtlich unterschiedlicher Qualitäten der WSS für die Probandenstudie, welche am HUD Prüfstand erhoben werden. Auf diese Weise würden die Messungen im Versuchsträger einen direkten Abgleich zwischen subjektiv wahrgenommenen und objektiv gemessenen Abbildungsfehlern ermöglichen.

Um dies zu realisieren wird eine Vorrichtung zur Installation eines Kamerasytems in den Versuchsträger integriert. Die Umsetzung erfolgt durch die Befestigung eines item-Profil auf dem Getriebetunnel der Rohkarosse. An diesem Profil ist ein Kameraträger auf einer Schiene angebracht, welcher in Y-Richtung des Fahrzeugkoordinatensystems beweglich ist. Die Positionierung des Kameraträgers für die Messung erfolgt mittels Anschlag und anschließender Arretierung. Die korrekte Positionierung von Kamerasytem und Anschlag erfolgt in der Geometrievermessungsstation. In Abb. 4.9 ist das CAD-Modell des Kameraträgers in Messposition im Versuchsträger dargestellt. Darin sind der Kameraträger und die Kamera selbst in rot, und die WSS in blau, dargestellt. In dieser Position können über eine Lochplatte alle Kamerapositionen der HMB exakt angefahren werden. Für die subjektive Bewertung des

virtuellen Bildes durch die Proband:innen ist es möglich den Kameraträger in Y-Richtung auf die Seite des Beifahrers zu verschieben.

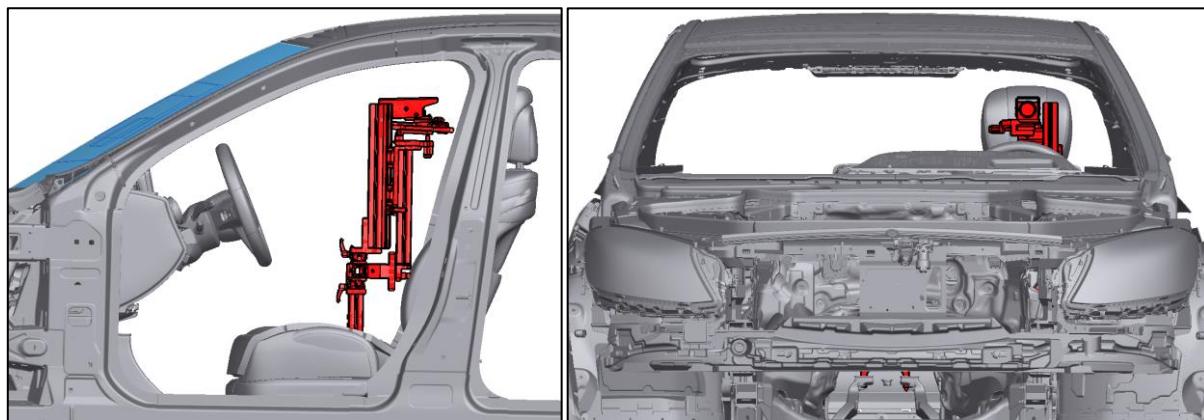


Abb. 4.9: Kameramesssystem im Versuchsträger

Der Einbau des Kameramesssystems wurde ebenfalls in der Geometrievermessungsstation durchgeführt. Die Abweichungen für die Kameraposition C0 sind in Abb. 4.10 zu sehen. Die max. zulässige translatorische Abweichung der Kamerapositionen im Versuchsträger ist mit <2 mm, die Abweichung der Winkel mit <0,5°, toleriert. Die zulässigen Toleranzen des Messsystems im Versuchsträger sind höher als die zulässigen Toleranzen für den tatsächlichen Prüfstand. Grund hierfür sind die Toleranzen der verwendeten Rohkarosse, sowie der Anwendung der Best-Fit Methode zur Minimierung der Abweichungen zur Aufnahme von WSS und Projektor. Die Abweichungen der Messpunkte MP 94 und MP 92 beschreiben jeweils die Abweichung in Z-Richtung, betragen jeweils <2 mm und sind daher innerhalb der Toleranz. Die Messpunkte MP 46 und MP 47 beschreiben die Abweichung in Y-Richtungen und sind ebenfalls innerhalb der zulässigen Toleranz. Auch die Winkelabweichungen der Ebenen liegen innerhalb der Toleranz. Alle weiteren Messpunkte können vernachlässigt werden, da ihre Bauteile nicht direkt mit der Kameraträgerplatte in Verbindung stehen. Zusätzlich findet eine intrinsisch kalibrierte Kamera Verwendung. Die Auswirkungen der höher zulässigen Toleranzen des Messsystems im Versuchsträger ggü. dem HUD Prüfstand sind im weiteren Verlauf dieses Abschnittes im Rahmen einer MSA aufgeführt.

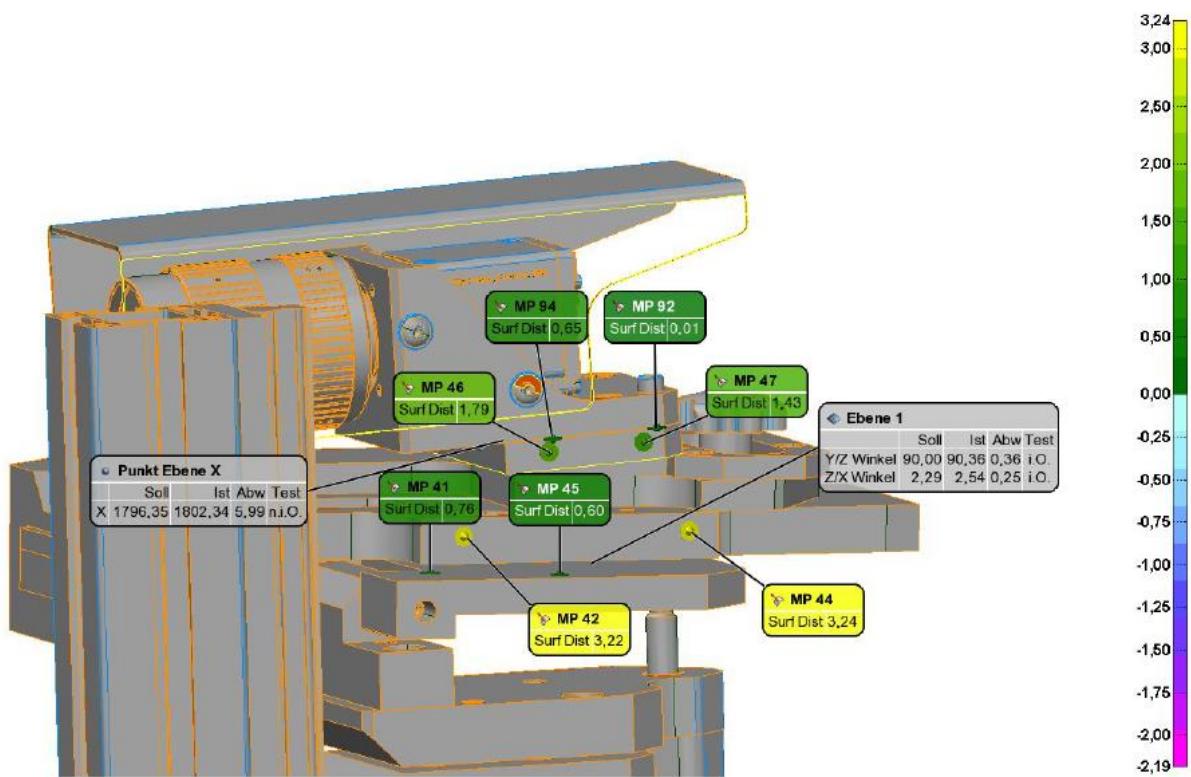


Abb. 4.10: Abweichungen des verbauten Kameraträgersystems im Versuchsträger in Millimetern

Zur Vermessung der WSS wird diese wie im Abschnitt *Positionsgetreue Aufnahme der optischen Systemkomponenten* auf dem Prüfstand platziert. Die Bilderfassung erfolgt über dieselbe Kamera, wie sie auch am HUD Prüfstand Verwendung findet (siehe Abschnitt 2.3.3). Die erfassten Bilder werden an die Messsoftware Gefasoft® weitergeleitet, in welcher die IQN-Berechnung stattfindet. Somit ist eine Bestimmung der IQN analog zum HUD Prüfstand möglich. Ein Abgleich zwischen Kamerapositionen und Kopfpositionen der Proband:innen liefert entsprechend die Datenbasis zur Analyse der Zusammenhänge von subjektiv wahrgenommener und objektiv berechneter Qualität des virtuellen Bildes. In Abb. 4.11 ist links das Kamerasytem in Messposition (a) und rechts ein Testproband sowie das in Y-Richtung verschobene Kamerasytem (b) zu sehen. Zusätzlich zur Ausrichtung des Messsystems erfolgen Analysen der Messmittelfähigkeiten am Versuchsträger und Prüfstand, um somit die Messgenauigkeit zu bestimmen.



**Abb. 4.11: Kamerasystem in Messposition (a); Testproband in Fahrerposition und Kamera in Studienposition (b)**

Die MSA hat das Ziel, die Konformität des Messprozesses sicherzustellen. Gründe für das Überschreiten von Grenzwerten sind nicht ausschließlich fehlerhafte Komponenten. Es können ebenfalls Unsicherheiten im Messprozess vorliegen. Entsprechend muss die Unsicherheit im Messprozess bekannt sein und in einem angemessenen Verhältnis zur Toleranz stehen [21]. Mit Hilfe einer MSA können Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit, Vergleichbarkeit und Auflösung untersucht werden [98]. Die verwendeten Begrifflichkeiten sowie die Durchführung der MSA orientieren sich am *VDA Band 5 zur Prüfprozesseignung* [98], wonach jeweils die Bewertung der einzelnen Komponenten und Prozessschritte stattfindet. Die Berechnungsgrundlagen entsprechen weitestgehend dem industriellen Standard der *Firmenrichtlinien nach AIAG MSA 4* (Handbuch zur Messsystemanalyse der Automotive Industry Action Group) [2]. Die wichtigste Kennzahl der MSA ist die *Messsystemstreuung*  $C_g$ . Für die *systematische Standardabweichung*  $C_{gk}$  des Messsystems kann keine Berechnung erfolgen, da kein Einstellmeister mit Nennmaß  $x_m$ , also kalibriertes Referenzteil (WSS), vorhanden ist. Das Fehlen der systematischen Standardabweichung stellt allerdings kein Problem dar, da das Messsystem vorab kalibriert wird. Auf diese Weise lässt das Messsystem die Bestimmung der IQN der WSS zu. Damit ist ein Vergleich der WSS untereinander und der erreichten Qualität möglich. Das Prüfmerkmal des Messprozesses ist nicht die WSS selbst, sondern ihre IQN.

Die MSA beinhaltet jeweils die Überprüfung der Messgenauigkeit in Abhängigkeit der Streufaktoren: *Kamera und Software*, *Kamerapositionierung*, sowie die *Auflage der WSS*. Die Analyse der drei Streufaktoren erfolgt weitestgehend isoliert mit jeweils einer Messreihe. Nach Dietrich u. Schulze [21] sind zur Bestimmung des  $C_g$ -Wertes mindestens 25 Messungen nötig. Für die vorliegende MSA werden jeweils 50 Wiederholungsmessungen je Streufaktor angesetzt. In Anbetracht begrenzter Ressourcen berücksichtigen die MSA nur die mittlere

Kameraposition C0 der HMB und ausschließlich die IQN 1.1 bis 3.2. Durch das Inkludieren der IQN 3.1 und 3.2 ist auch die Überprüfung der Messmittelfähigkeit stereoskopischer Abbildungsfehler gegeben. Da bei den IQN 4.1 bis 5.6 keine neuen Messprinzipien Anwendung finden, welche nicht bereits durch die IQN 1.1 bis 3.2 abgedeckt sind, wird von einer Überprüfung der IQN 4.1 bis 5.6 im Rahmen der MSA abgesehen.

Die Prüfung von Kamera und Software bildet die Basis der MSA, da dieser Streufaktor in allen Messungen enthalten ist und erfolgt über 50 Messungen aus der Kameraposition C0. Entsprechend darf keine Veränderung der Kameraposition oder der Positionierung der WSS stattfinden. Diese Vorgehensweise stellt in einem ersten Schritt sicher, dass der Auswertungsalgorithmus der Messsoftware, inklusive Verwendung der intrinsisch kalibrierten Kamera, robust ist. Im zweiten Schritt erfolgt die Überprüfung der Kamerapositionierung. Dafür wird die Kameraposition C0 50 Mal angefahren und jeweils eine Messung durchgeführt. Auf diese Weise kann die Überprüfung des Einflusses der Kamerapositionierung auf das Messergebnis stattfinden. Im letzten Schritt wird der Einfluss der Windschutzscheibenauflage geprüft. Dafür wird die selbe WSS 50 Mal auf den Prüfstand respektive den Versuchsträger aufgelegt, nach Vorgabe positioniert und entsprechend vermessen. Eine Änderung oder erneutes Anfahren der Kameraposition C0 ist innerhalb der 50 Messungen nicht zulässig. Die MSA für den Streufaktor Windschutzscheibenauflage ermöglicht nicht nur eine Aussage zur Messmittelfähigkeit der Messsysteme, sondern auch ob die Proband:innen nach einem Tausch der WSS wie gewünscht nur den Einfluss der WSS auf die virtuelle Bildqualität wahrnehmen.

Da die MSA, sowie alle Messungen der IQN, in einem klimatisierten Labor mit gleichbleibenden Lichtbedingungen stattfinden, können Umwelteinflüsse vernachlässigt werden. Der Einfluss des Prüfers wird ebenfalls vernachlässigt. Zum einen werden sowohl die MSA als auch die Messungen vom selben Prüfer durchgeführt. Zum anderen ist der Prüfer ausschließlich für das Auflegen der WSS und Positionieren der Kamera zuständig. Beide möglichen Streufaktoren sind bereits in den oben beschriebenen Streufaktoren Kamerapositionierung und Auflage der WSS enthalten.

Nach Durchführung der Messungen erfolgt die Berechnung des  $C_g$ -Wertes in der Software Minitab® mit Hilfe der *Messsystemanalyse Typ 1*. Der Zielwert liegt bei  $C_g \geq 1,33$  bei einer zulässigen prozentualen Streuung des Messmittels zur Merkmaltoleranz von  $\pm 10\%$ . Für die Merkmaltoleranz der einzelnen IQN werden die aktuellen Grenzwerte herangezogen, welche auf einer Probandenstudie zur Bewertung der Abbildungsfehler eines virtuellen Bildes (siehe

Abschnitt 2.4) basieren. Da wie beschrieben kein Einstellmeister vorhanden ist, aber die Berechnung des  $C_g$ -Wertes einen Referenzwert voraussetzt, wird alternativ der Mittelwert der jeweiligen 50 Messungen herangezogen.

In Abb. 4.12 ist beispielhaft die Messsystemanalyse Typ 1 für den Streufaktor *Kamerapositionierung* der IQN 3.2 *Mittlere vertikale Divergenz* am HUD Prüfstand zu sehen. Die Angabe der IQN 3.2 erfolgt in diesem Beispiel in Millimetern anstatt Milliradian. Entsprechend der Toleranz von  $\pm 4$  mm bilden die beiden roten Linien jeweils die  $\pm 0,4$  mm Toleranzgrenzen für den Messprozess in Abhängigkeit des Referenzwertes und damit  $\pm 10\%$  der Toleranz für diese IQN. Der gewählte Referenzwert entspricht mit 0,81 mm in etwa dem Mittelwert der 50 Messungen und wird als Ersatz für den Einstellmeister herangezogen.

Das Verlaufsdiagramm der Messwerte lässt eine zufällige Streuung erkennen. Die Standardabweichung  $\sigma = 0,0796$  beträgt nur knapp 1 % der Gesamttoleranz der IQN 3.2 ( $\pm 4$  mm  $\approx 8$  mm) und entspricht damit einer sehr geringen Streuung des Messprozesses. Entsprechend erfüllt der HUD Prüfstand mit einem  $C_g$ -Wert = 1,67 die Anforderungen der MSA für den Streufaktor *Kamerapositionierung* der IQN 3.2.

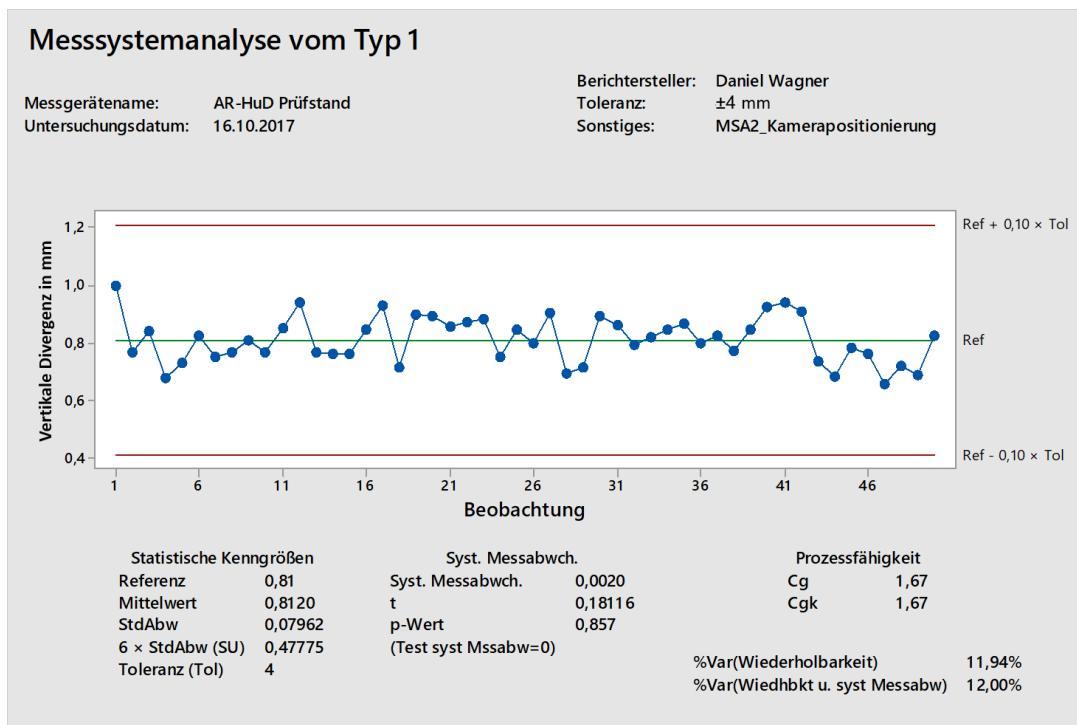


Abb. 4.12: Messsystemanalyse Typ 1 für IQN 3.2 Mittlere vertikale Divergenz

Der erreichte  $C_g$ -Wert = 1,67 ist das schlechteste Ergebnis der MSA für den HUD Prüfstand, unter Berücksichtigung aller Streufaktoren sowie IQN. Der  $C_g$ -Wert liegt damit aber noch deutlich über dem Zielwert für  $C_g = 1,33$ . Damit besteht der HUD Prüfstand die MSA für alle

Streufaktoren und IQN, auch für die empfindlich zu messenden stereoskopischen Abbildungsfehler.

Da der Einfluss des Streufaktors *Kamera und Software* vernachlässigend gering ist, wurden für die MSA des Versuchsträgers ausschließlich die Streufaktoren *Kamerapositionierung* und *Auflage der WSS* untersucht. Die MSA für den Versuchsträger fällt wie erwartet schlechter als die MSA für den HUD Prüfstand aus. Der Versuchsträger besteht die MSA für die stereoskopischen Abbildungsfehler (IQN 3.1 und 3.2) nicht. Entgegen den Erwartungen erhalten auch die MSA für monoskopische Abbildungsfehler am Versuchsträger teilweise keine positive Bewertung. Die Gründe hierfür betreffen die grundsätzliche Auslegung des Versuchsträgers, welche den Ansprüchen an das sensible Messsystem für ein AR HUD nicht gerecht werden kann. Heranzuführen sind an dieser Stelle die erhöhten Toleranzen zur Aufnahme der WSS und des Projektors sowie des Kameramesssystems. Vor allem das zuletzt benannte Kameramesssystem, welches aufgrund der geforderten Flexibilität als beweglicher Messarm ausgeführt ist, erfährt aufgrund fehlender Steifigkeit Schwingungen. Diese Schwingungen des Kameramesssystems führen letztendlich zu Abweichungen in der Kamerapositionierung und damit zu Abweichungen in den Messergebnissen. Die unterschiedliche Auslegung und Steifigkeit der Messsysteme von Versuchsträger und HUD Prüfstand sind bei Betrachtung voriger Abbildung (siehe Abschnitt 2.3.3 und 4.2.1) deutlich zu erkennen. Daher können die Messwerte des Versuchsträgers nur eingeschränkt für die Untersuchungen im Rahmen der Probandenstudien herangezogen werden.

Entsprechend findet die Bestimmung der IQN für die ausgewählten WSS der Probandenstudie am HUD Prüfstand statt. Dieses Vorgehen ist weiterhin akzeptabel und liefert die benötigten Informationen zur unterschiedlichen Qualität der verwendeten WSS. Begründung hierfür ist, dass die WSS die einzige Variable im Versuchsaufbau ist und dadurch weiterhin der Einfluss der WSS auf die subjektive Wahrnehmung der Proband:innen untersucht werden kann.

## **Innenausbau des Versuchsträgers**

Zuletzt findet der Innenausbau des Versuchsträgers statt. Der Innenausbau hat das Ziel den Proband:innen eine realitätsnahe Fahrumgebung zu bieten. Die Priorität liegt hierbei auf der korrekten Positionierung der Augen innerhalb der HMB. Daher werden das Lenkrad und der Fahrersitz mit der jeweiligen Möglichkeit zur elektrischen Positionseinstellung in den Versuchsträger eingebaut. Die Stromversorgung ist über eine 48 Volt Pkw-Batterie sichergestellt, welche auch die Stromversorgung des HUD Projektors und der Image Box

übernimmt. Somit ist der Versuchsträger auch mobil einsetzbar. Außerdem werden die Pedalerie sowie ein Teil des Fahrzeuginterieurs in den Versuchsträger eingebaut, damit die Proband:innen eine realitätsnahe Fahrsituation erleben können. Dazu gehören unter anderem die Instrumententafel, Ausstattung des Fußraumes sowie die Integration eines Ablagebrettes als Mittelkonsole. Abb. 4.13 zeigt den fertigen Versuchsträger.



Abb. 4.13: Finaler Aufbau des Versuchsträgers

#### 4.2.2. Auswahl der Versuchsobjekte (Windschutzscheiben) und Aufstellen der Untersuchungshypothesen

Die Auswahl geeigneter Versuchsobjekte für die Studie ist eine essentielle Aufgabe der Vorbereitung. Im Falle der vorliegenden Studie stellen die WSS der Baureihe W223 die möglichen Versuchsobjekte dar. Die WSS müssen unterschiedliche Qualitäten aufweisen, welche subjektiv eindeutig wahrnehmbar sind. Um dies sicherzustellen, werden verschiedene WSS von einer Expertengruppe, bestehend aus drei Personen, im Versuchsträger gesichtet und einer ersten makroskopischen Untersuchung unterzogen. Die Untersuchung findet im finalen Versuchsträger statt. Das bedeutet, dass bereits die Ausrichtung des Querträgers und damit die Aufnahme des HUD Projektors nach der Best-Fit Methode erfolgte und derjenige HUD Projektor im Einsatz ist, welcher auch in der tatsächlichen Probandenstudie Verwendung findet.

Die drei Expert:innen sind für die Entwicklung von HUD WSS zuständig und betrachten bei der makroskopischen Untersuchung die zur Verfügung stehenden WSS abwechselnd im direkten Vergleich um die Unterschiede zwischen den WSS herauszuarbeiten. Auf diese Weise sollen die WSS hinsichtlich der subjektiv wahrgenommenen Bildqualität bewertet und kategorisiert werden. Ziel ist dabei die Ausarbeitung von Hypothesen bezüglich ausgewählter WSS, welche im Rahmen der Studie untersucht werden, sowie die Einteilung der WSS in die Kategorien *grün*, *gelb* und *rot*.

Die Kategorisierung nach Ampelfarben entspricht der Bewertung des Reifegrades eines Bauteils im Entwicklungsprozess, wobei die Farben folgendes bedeuten:

- Eine *grüne* Bewertung bedeutet, dass das Bauteil vollumfänglich *kundentauglich* ist, den definierten Kundenansprüchen entspricht, keine Verbesserungen nötig sind und das Bauteil in Kundenfahrzeugen Einsatz findet.
- Eine *gelbe* Bewertung bedeutet, dass das Bauteil *bedingt kundentauglich* ist, den definierten Kundenansprüchen nur zum Teil entspricht, Verbesserungen nötig sind aber das Bauteil in Kundenfahrzeugen Einsatz findet.
- Eine *rote* Bewertung bedeutet, dass das Bauteil *nicht kundentauglich* ist, den definierten Kundenansprüchen nicht entspricht, Verbesserungen nötig sind und das Bauteil in Kundenfahrzeugen keinen Einsatz findet.

Die Bewertung und Kategorisierung der WSS erfolgt unter Betrachtung des virtuellen Testbildes (siehe Abb. 2.15), da Abbildungsfehler anhand des Testbildes am besten zu bewerten sind. Dadurch kann die Kategorisierung der WSS nach ihrem Reifegrad in Ampelfarben, sowie eine genaue makroskopische Untersuchung der Abbildungsfehler und ein Vergleich zwischen den WSS stattfinden. Die subjektive Bewertung der WSS orientiert sich an den in Abschnitt 2.4 beschriebenen Fehlerarten (Globale und Lokale Fehler; Monoskopische und Stereoskopische Abbildungsfehler; Statische und Dynamische Abbildungsfehler).

Neben der makroskopischen Betrachtung und Kategorisierung der WSS werden auch deren Messergebnisse der IQN herangezogen und entsprechend mit der Kategorisierung abgeglichen. Die Messung der IQN findet am HUD Prüfstand statt. Zum Zeitpunkt der Studie erreicht keine WSS die definierten Toleranzgrenzwerte der IQN. Wie bereits zu Beginn dieser Arbeit in der Problemstellung beschrieben wurde (siehe Abschnitt 1.1), erfolgte die Festlegung der Toleranzgrenzwerte für die IQN anhand einer Probandenstudie an einem 3D-Monitor. In dieser Studie wurden Wahrnehmungs- und Störschwellen von Abbildungsfehlern ermittelt und die

Toleranzgrenzwerte der IQN abgeleitet. Da alle WSS die definierten Toleranzen nicht einhalten können, erfüllen sie per Definition nicht die Kundenansprüche und sind damit nach objektiver Messung der IQN *nicht kundentauglich*.

Die zuvor beschriebene makroskopische Untersuchung der WSS durch die drei Expert:innen ergibt allerdings ein anderes Ergebnis: Die untersuchten WSS erreichen auch *grüne* oder *gelbe* Bewertungen und sind damit *kundentauglich* bzw. *bedingt kundentauglich*. Diese Erkenntnisse stehen damit im Gegensatz zum Nicht-Erreichen der objektiv gemessenen IQN am HUD Prüfstand. Dies ist bereits ein erster Hinweis darauf, dass die gewählten Toleranzgrenzwerte, welche am 3D-Monitor ermittelt wurden, nicht die tatsächlichen Kundenansprüche repräsentieren. Grund hierfür ist vor allem, dass sich die subjektive Wahrnehmung virtueller Bildinhalte zwischen den tatsächlichen Hardware Komponenten des AR HUD und dem 3D-Monitor unterscheidet. Die Vergleichbarkeit dieser optischen Systeme ist entsprechend begrenzt. Daher ist es essentiell mit Hilfe der Probandenstudie einen Abgleich der Kundenansprüche mit den Grenzwerten der IQN durchzuführen. Bleibt dieser Schritt aus, könnten nach aktueller Auffassung die Qualitätsansprüche an die WSS zu hoch gewählt sein. Dadurch ist zwar die Erreichung der Kundenansprüche sichergestellt, allerdings führen überhöhte Qualitätsanforderungen, wie zu Beginn des Kapitels beschrieben, zu einer Verschwendungen von Ressourcen, da der Ausschuss produzierter WSS ansteigt.

Wie zuvor gefordert, müssen die Qualitätsunterschiede der ausgewählten WSS für die Studie, eindeutig subjektiv wahrnehmbar sein. Um diese Anforderungen an die Versuchsobjekte sicherzustellen, sollen für die Studie WSS aus allen drei Reifegradkategorien ausgewählt werden. Die makroskopische Untersuchung der zur Verfügung stehenden WSS durch die drei Expert:innen ermöglicht die Erfüllung dieser Anforderung, da unter den zur Verfügung stehenden WSS alle drei Reifegradkategorien (*grün*, *gelb* und *rot*) enthalten sind.

Das angewendete Bewertungsschema lässt sich in drei Schritte aufteilen. In einem ersten Schritt findet eine statische qualitative Bewertung des virtuellen Testbilds aus der oberen, mittleren und unteren Kopfposition durch die Expert:innen statt. Die Kopfpositionen repräsentieren die drei standardisierten Eyeboxen. Die Expert:innen beschreiben anhand qualitativer Aussagen die subjektiv wahrgenommene Bildqualität der WSS. Im zweiten Schritt bewerten die Expert:innen das virtuelle Testbild erneut qualitativ, in diesem Fall allerdings mit dynamischer Kopfposition. Dabei wird zwischen einer horizontalen Kopfbewegung (Kopfschütteln) und einer vertikalen Kopfbewegung (Kopfnicken) unterschieden. Die ersten beiden Bewertungsschritte dienen den

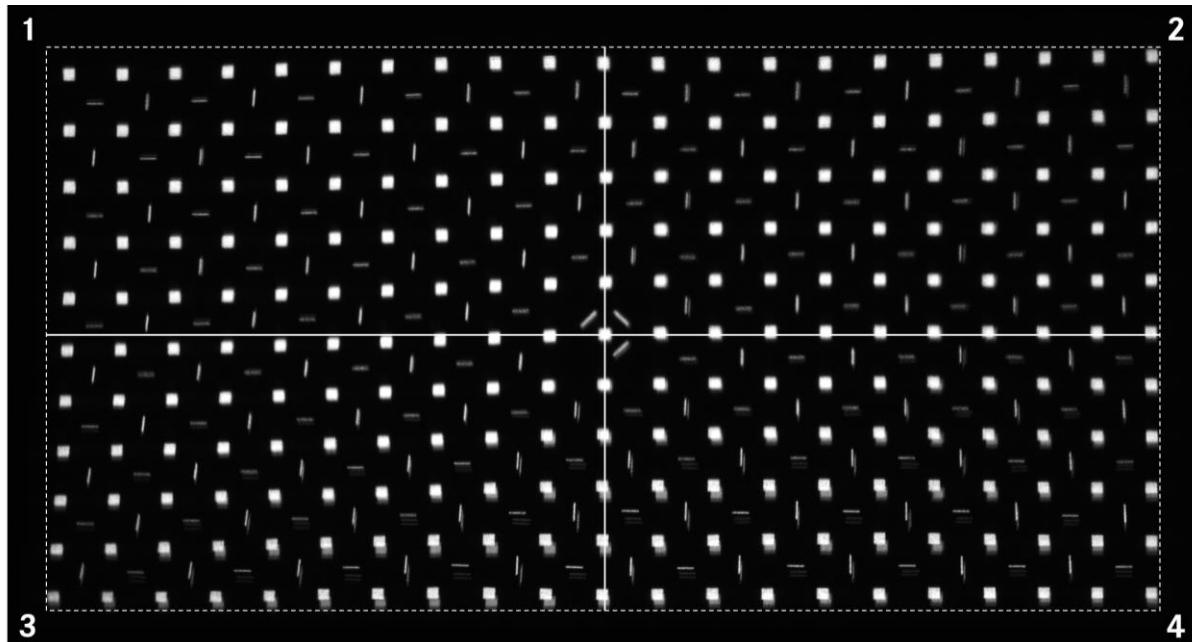
Expert:innen dazu einen ersten generellen Eindruck der subjektiv wahrgenommenen Bildqualitäten der unterschiedlichen WSS zu erlangen. Da den Expert:innen aufgrund ihrer Erfahrungen mit HUD die möglichen Abbildungsfehler im virtuellen Bild bekannt sind, ermöglicht die qualitative Beschreibung der Bildqualität zudem die genaue Feststellung der auftretenden Abbildungsfehler. Auf diese Weise ist eine Bewertung der virtuellen Bildqualität analog der Fehlerarten möglich:

- Globale Abbildungsfehler über Ghost und Verzeichnungen (IQN 1.X)
- Lokale Abbildungsfehler über Ghost und Verzeichnungen (IQN 2.X)
- Stereoskopische Abbildungsfehler über horizontale und vertikale Divergenz (IQN 3.X)
- Dynamische Abbildungsfehler über lokale Verzeichnung bei dynamischen Bildinhalten (IQN 4.X)
- Dynamische Abbildungsfehler über Verzeichnung bei Kopfbewegung (IQN 5.X)

Im dritten und letzten Bewertungsschritt bewerten die Expert:innen das virtuelle Testbild quantitativ anhand einer fünfstufigen Likert Skala mit den Werten 1 bis 5 (siehe auch Abschnitt 4.2.4). Dabei gilt: desto höher die vergebene Punktzahl, desto besser ist die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes. Entsprechend repräsentiert die Bewertung eines virtuellen Bildes mit 5 Punkten eine sehr gute subjektiv wahrgenommene Bildqualität und damit eine *grüne* Bewertung. Folglich repräsentiert die Bewertung eines virtuellen Bildes mit 1 Punkt eine sehr schlechte subjektiv wahrgenommene Bildqualität und damit eine *rote* Bewertung. Die Bewertung eines virtuellen Bildes mit 3 Punkten repräsentiert eine mäßig subjektiv wahrgenommene Bildqualität und schlussendlich eine *gelbe* Bewertung. Der letzte Bewertungsschritt dient dazu eine Vergleichbarkeit der vorherigen qualitativen Bewertungen des ersten und zweiten Bewertungsschrittes herzustellen. Aus diesem Grund fasst die quantitative Bewertung des virtuellen Bildes sowohl die statische als auch die horizontal und vertikal dynamische Kopfposition in einer Bewertung zusammen.

Da bei einigen WSS auffällig ist, dass die Bildqualität innerhalb eines virtuellen Bildes unterschiedlich ist, wird das virtuelle Bild zur Bewertung in vier Quadranten aufgeteilt. Abb. 4.14 zeigt die beispielhafte Aufnahme eines virtuellen Bildes am HUD Prüfstand, bei welcher eindeutig die unterschiedlichen Qualitäten innerhalb des virtuellen Bildes zu sehen sind. Während im zweiten Quadranten oben rechts kaum Abbildungsfehler zu erkennen sind, treten im dritten Quadranten unten links eindeutig Unschärfe und Verzeichnungen auf. In dieser

monoskopischen Betrachtung ist die Unschärfe anhand des Doppelbildfehlers in den unteren Zeilen des dritten Quadranten zu sehen. Außerdem sind die Steigung horizontaler Linien sowie die Steigung vertikaler Linien deutlich zu erkennen (IQN 1.3, 1.4, 2.3 und 2.4). Zudem ist grundsätzlich erkenntlich, dass nur im unteren Bildbereich Ghost (Quadranten 3 und 4) und vor allem im linken Bildbereich Verzeichnung (Quadranten 1 und 3) vorhanden ist.



**Abb. 4.14: Virtuelles Testbild mit eingezeichneten Quadranten; aufgenommen am HUD Prüfstand**

Die quantitative Bewertung im dritten Schritt erfolgt daher sowohl für das Gesamtbild als auch einzeln für jeden der Quadranten, um eine differenzierte Bewertung der virtuellen Bildqualität zu ermöglichen. Zudem ist es den Expert:innen während der Bewertung erlaubt, sich verschiedene WSS im Wechsel anzuschauen. Dies ermöglicht die Feststellung unterschiedlicher Ausprägungen von Abbildungsfehlern zwischen den WSS.

Mit Hilfe der drei Bewertungsschritte erfolgt die Auswahl von drei WSS, welche jeweils eine *grüne, gelbe oder rote Bewertung* durch die Expert:innen erhalten. Dadurch ist sichergestellt, dass Qualitätsunterschiede zwischen den drei WSS eindeutig subjektiv wahrnehmbar sind. Im direkten Vergleich sind die verschiedenen Ausprägungen von Abbildungsfehlern zwischen den WSS klar zu unterscheiden.

In Tabelle 3 sind die Bewertungen durch die Expert:innen der drei letztendlich ausgewählten Versuchsstoffe für die Probandenstudie aufgelistet. Die Bezeichnung der ausgewählten WSS erfolgt als WSS A, WSS B und WSS C. Die Bewertung wurde anhand des zuvor beschriebenen Schemas vorgenommen. Entsprechend ist die Tabelle in die Bereiche *qualitativ statische*

*Bewertung* (Schritt 1), *qualitativ dynamische Bewertung* (Schritt 2) sowie *quantitative Bewertung* (Schritt 3) aufgeteilt. Grundsätzlich konnten die Expert:innen alle Fehlerarten von Abbildungsfehlern im virtuellen Bild feststellen. Dazu gehören globale und lokale Verzeichnungen sowie stereoskopische und dynamische Abbildungsfehler. Dabei stellten die Expert:innen eindeutig subjektiv wahrnehmbare Unterschiede in der Qualität der virtuellen Bilder zwischen den WSS fest. Entsprechend sind die Ausprägungen der Abbildungsfehler für die drei WSS unterschiedlich. Dies spiegelt sich auch in der quantitativen Bewertung der WSS anhand der fünfstufigen Likert Skala wieder.

Das virtuelle Bild von WSS A weist für die statische qualitative Betrachtung bei allen Kopfpositionen eine Verzeichnung vor. Dabei ist vor allem die Verkippung horizontaler und vertikaler Linien ersichtlich. Diese Abbildungsfehler sind den IQN 1.3 und 1.4 zuzuordnen. In der oberen Kopfposition ist zudem die obere linke Ecke lokal verzeichnet, welche auf erhöhte Messwerte der IQN 2.X und 4.X hinweist. Zusätzlich sind je nach Kopfposition bestimmte Bereiche des virtuellen Bildes *unangenehm* wahrzunehmen. Das bedeutet, dass es dem Beobachter schwer fällt bestimmte Bereiche eindeutig zu erkennen oder zu fokussieren. Grund hierfür sind vor allem horizontale und vertikale Divergenzen (IQN 3.x), bei welchen das linke und rechte Auge die Form oder Position des Bildes unterschiedlich wahrnehmen. Diese Abbildungsfehler führen vor allem bei kontaktanaloger Darstellung zu einem erhöhten kognitiven Aufwand, da der menschliche Bildverarbeitungsprozess einen Konflikt bzgl. der Registrierung der virtuellen Bildinhalte in der realen Umwelt feststellt. Zuletzt weisen bei dynamisch qualitativer Betrachtung jeweils bestimmte Bildbereiche Abbildungsfehler in Form von dynamischen horizontalen und vertikalen Verzeichnungen auf (siehe Tabelle 3). Diese spiegeln sich in den IQN 4.X und 5.X wieder.

Bei WSS B treten weitestgehend dieselben Abbildungsfehler im virtuellen Bild auf. In den meisten Fällen ist allerdings deren Ausprägung im negativen Sinne erhöht und wird durch die Expert:innen als störender wahrgenommen als bei WSS A. Für WSS C fallen die auftretenden Abbildungsfehler im direkten Vergleich eindeutig am geringsten aus.

Die Beobachtungen der ersten beiden qualitativen Bewertungsschritte fließen gesamtheitlich in den dritten quantitativen Bewertungsschritt ein. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Abbildungsfehler zwischen den WSS als auch zwischen den verschiedenen Bereichen innerhalb eines virtuellen Bildes finden sich in der quantitativen Bewertung wieder.

**Tabelle 3: Bewertung der drei ausgewählten Versuchsobjekte (WSS) durch die Expert:innen anhand des erläuterten Bewertungsschemas**

Bewertung	WSS A	WSS B	WSS C		
Qualitativ / Statisch	Obere Kopfposition	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkippung der Zeilen/Spalten (1.3; 1.4)</li> <li>• Verzeichnung der Ecke links oben (2.X; 4.X)</li> <li>• Mittlerer Bildbereich unangenehm wahrzunehmen (3.X)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deutliche Verkippung der Zeilen/Spalten (1.3; 1.4)</li> <li>• Gesamter Bildbereich unangenehm u. unscharf wahrzunehmen (3.X)</li> <li>• Deutlichste Divergenz (3.X)</li> </ul>		
	Mittlere Kopfposition	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leichte Verkippung der Zeilen/Spalten (1.3; 1.4)</li> <li>• Mittlerer/oberer Bildbereich unangenehm wahrzunehmen (3.X)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deutliche Verkippung der Zeilen/Spalten (1.3; 1.4)</li> <li>• Gesamter Bildbereich unangenehm u. unscharf wahrzunehmen (3.X)</li> </ul>		
	Untere Kopfposition	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkippung der Zeilen/Spalten (1.3; 1.4)</li> <li>• Unterer Bildbereich unangenehm wahrzunehmen (3.X)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deutliche Verkippung der Zeilen/Spalten (1.3; 1.4)</li> <li>• Gesamter Bildbereich unangenehm u. unscharf wahrzunehmen (3.X)</li> </ul>		
Qualitativ / Dynamisch	Horizontale Kopfbewegung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Linke Bildhälfte instabil, vor allem horizontale Verzeichnung (4.X; 5.X)</li> <li>• Rechte Bildhälfte stabil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Linke Bildhälfte instabil, horizontale u. vertikale Verzeichnung (4.X; 5.X)</li> <li>• Rechte Bildhälfte stabil</li> </ul>		
	Vertikale Kopfbewegung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untere Bildhälfte instabil, vor allem vertikale Verzeichnung (4.X; 5.X)</li> <li>• Obere Bildhälfte stabil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamtes Bild instabil, vor allem vertikale Verzeichnung (4.X; 5.X)</li> <li>• Ecke links oben leichte horizontale u. vertikale Verzeichnung (4.X; 5.X)</li> <li>• Restliches Bild stabil</li> </ul>		
Quantitativ	Gesamtbild nach Likert Skala	4	2	5	
	Quadranten nach Likert Skala	4	2	3	5
		3	3	4	5

Die Bewertung des Gesamtbildes und der einzelnen Quadranten erfolgt unabhängig voneinander. Die Bewertung des Gesamtbildes findet dabei immer als erstes statt. WSS B erhält die schlechteste Bewertung für das Gesamtbild und die einzelnen Quadranten. Grund dafür sind die stark ausgeprägten Abbildungsfehler, welche zu einer *nicht kundentauglichen* Einstufung des virtuellen Bildes durch die Expert:innen führt und für das Gesamtbild lediglich 2 von 5 Punkten erhält. Die Qualität innerhalb des virtuellen Bildes ist für WSS B weitestgehend homogen, wobei die oberen beiden Quadranten eine etwas schlechtere Bewertung erhalten.

WSS A liefert ein deutlich besseres virtuelles Bild als WSS B und erhält die Einstufung *bedingt Kundentauglich*. Die bessere Einstufung ist auch der quantitativen Bewertung zu entnehmen. Während das Gesamtbild bereits 4 von 5 Punkten auf der definierten Likert Skala erhält, gibt es eine etwas stärker wahrnehmbare Heterogenität der Qualität innerhalb des virtuellen Bildes im Vergleich zu WSS B. Daher erhalten die beiden unteren Quadranten der WSS A jeweils nur 3 von 5 Punkten auf der Likert Skala.

WSS C schneidet im direkten Vergleich am besten ab. Entsprechend erfolgt eine *Kundentaugliche Einstufung* durch die Expert:innen. Obwohl die Heterogenität innerhalb des virtuellen Bildes am stärksten ausgeprägt ist, die unterschiedlichen Quadranten also unterschiedliche Qualitäten innerhalb des virtuellen Bildes aufweisen, bewerten die Expert:innen das Gesamtbild mit 5 von 5 Punkten. Die Bewertung der einzelnen Quadranten fällt im Vergleich zum Gesamtbild wie angesprochen überraschend heterogen aus. Als einzige der drei WSS beträgt bei WSS C das Delta zwischen den Quadranten 2 Punkte. Die Erklärung der Expert:innen hierfür lautet, dass der rechte Bereich des virtuellen Bildes für WSS C nahezu keine Abbildungsfehler aufweist und daher die auftretenden Abbildungsfehler im linken Bildbereich stärker auffallen.

In Abb. 4.15 sind erneut die Bezeichnungen der drei ausgewählten WSS zu sehen. Die drei WSS entstammen drei unterschiedlichen Produktionsläufen. Die Produktionsläufe sind aufsteigend nummeriert. Zeitlich betrachtet ist WSS A am ältesten, entstammt dem dritten Produktionslauf und erhält schlussendlich eine *gelbe Bewertung*. In diese gesamtheitliche letzte Bewertung fließen alle Beobachtungen der Expert:innen ein. Vor dem siebten Produktionslauf fand eine Überarbeitung des Biegewerkzeugs statt um die allgemeine Windschutzscheibenqualität zu verbessern. WSS B wurde im siebten Produktionslauf gefertigt und damit im ersten Produktionslauf nach der Werkzeugüberarbeitung. Die Expertenuntersuchung für WSS B ergibt eine *rote Bewertung*. WSS C war zum Zeitpunkt der Windschutzscheibenauswahl dem neuesten, zehnten Produktionslauf zuzuordnen und erhält eine *grüne Bewertung*. Die Anordnung der WSS von links nach rechts entspricht ihrer chronologischen Zuordnung zu den verschiedenen Produktionsläufen für die Entwicklungs- und Aufbauphasen von Prototypen Fahrzeugen: A-Fahrzeug, B-Fahrzeug und C-Fahrzeug. Wie Abb. 4.15 ebenfalls zu entnehmen ist erfüllt keine der drei WSS die definierten Toleranzgrenzwerte der IQN.

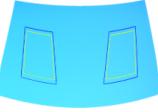
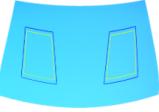
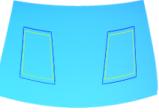
	A-Fahrzeug	B-Fahrzeug	C-Fahrzeug
WSS A	Überarbeitung Biegewerkzeug	WSS B	WSS C
			
Produktionslauf	3	7	10
IQN Bewertung	rot	rot	rot
Subjektive Bewertung	gelb	rot	grün

Abb. 4.15: Übersicht ausgewählter Versuchsobjekte (WSS) inklusive IQN und subjektiver Bewertung

Die Einteilung der drei WSS A, B und C in die unterschiedlichen Reifegradkategorien ist auf die Änderung des Biegewerkzeugs sowie unterschiedliche Prozessparameter für die drei Produktionsläufe der WSS zurückzuführen. Diese Änderungen wirken sich im Ergebnis auf die Windschutzscheibengeometrien aus. Die unterschiedlichen Windschutzscheibengeometrien der WSS A, B und C beeinflussen entsprechend die virtuellen Bildqualitäten. Auch in den IQN Messwerten sind Unterschiede zwischen den WSS zu finden. Auf diese Unterschiede wird in den Ergebnissen tiefer eingegangen (siehe Abschnitt 4.3.4).

Mit Hilfe der makroskopischen Untersuchung können außerdem die Hypothesen hinsichtlich der Qualitätsunterschiede der drei Versuchsobjekte formuliert werden. Diese basieren auf den Erkenntnissen der drei Expert:innen.

Sie konnten feststellen, dass die subjektiv wahrgenommene virtuelle Bildqualität zwischen den WSS unterschiedlich ist. Es gilt zu überprüfen ob selbige Beobachtung auch durch die Proband:innen feststellbar und ebenfalls in den Messwerten der IQN wiederzufinden ist. Außerdem war erkenntlich, dass bestimmte Bildbereiche innerhalb eines virtuellen Bildes, und damit innerhalb des Reflektionsbereichs einer einzigen WSS, unterschiedliche Qualitäten aufweisen. Dies ist insofern interessant, da die messtechnische Erfassung von Qualitätsunterschieden innerhalb eines virtuellen Bildes bisher nur begrenzt über die IQN 2.1 bis 2.6 verfolgt wird. Die sich daraus ergebenden Hypothesen wurden bereits zu Beginn des Kapitels 4 benannt und sind folgend erneut aufgeführt:

*Hypothese 1: Unterschiede in der Formgenauigkeit von Windschutzscheiben, und damit in ihrer Qualität, haben keinen Einfluss auf die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes.*

*Hypothese 2: Die Qualitätskennzahlen des virtuellen Bildes, die IQN, stehen im Einklang mit der subjektiv wahrgenommenen Qualität.*

*Hypothese 3: Alle Bereiche eines virtuellen Bildes werden in gleicher Qualität subjektiv wahrgenommen.*

Mit Hilfe des aufgezeigten Auswahlverfahrens und der letztendlichen Auswahl der WSS ist sichergestellt, dass die Versuchsobjekte heterogene virtuelle Bildqualitäten aufweisen. Das zusätzliche Aufstellen der Hypothesen liefert einen Rahmen für die weitere Planung der Probandenstudie. Die Definition der Hypothesen ist essentiell um mit der Probandenstudie die Forschungsfragen (A), (B), (C) und (D) zu beantworten. Die in Abschnitt 4.2.4 beschriebene Erstellung der Testbilder und des Fragebogens basiert auf den Erkenntnissen der Expertenbewertung für die drei ausgewählten WSS.

#### 4.2.3. Auswahl der Versuchssubjekte (Proband:innen)

Das Versuchssubjekt der Studie ist die Proband:in. Die Gesamtheit der Proband:innen wird als Probandenkollektiv oder Stichprobe bezeichnet. Die Quantität und Qualität des Probandenkollektivs haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Aussagekraft der Studie und nehmen daher eine zentrale Rolle im Studiendesign ein. Über die Quantität der Stichprobe, also die Anzahl der Proband:innen, kann die statistische Signifikanz der Studie erhöht werden, da etwaige Ausreißer an Gewicht verlieren. Dabei sinken im Regelfall Varianz und Standardabweichung. Die Qualität des Probandenkollektivs beeinflusst primär die Repräsentanz möglicher Kund:innen. Die sinnvolle Festlegung von Kriterien zur Auswahl von Proband:innen ermöglicht ein repräsentatives Probandenkollektiv, welches den durchschnittlichen Kundenanspruch wiedergibt. Die Auswahlkriterien und der Auswahlprozess der Studie werden folgend dargelegt.

Die Auswahl und Akquise der Proband:innen erfolgt mit der Unterstützung des Probandenmanagements der Mercedes-Benz AG. Hinsichtlich Prozess und Methodik unterstützt das Probandenmanagement die Fachabteilungen außerdem bei der Terminvergabe und dem vertraulichen Umgang mit personenbezogenen Daten. Dabei gelten die Vorgaben und Regeln der Mercedes-Benz AG für den Umgang mit Proband:innen, inklusive einer Selbstbeurteilung hinsichtlich ethischer Freigabe (*ethical clearing*), sowie Kontrolle der Regelungen durch das Probandenmanagement. Dieser definierte und standardisierte Prozess der Mercedes-Benz AG stellt sicher, dass:

- eine schriftliche Einverständniserklärung der Proband:innen vorliegt,
- die Proband:innen freiwillig an der Studie teilnehmen,
- die Studie der Verschwiegenheitspflicht unterliegt,
- die Durchführung der Studie und Erhebung der Daten anonym erfolgt,
- ausschließlich relevante Daten erhoben werden und
- Menschen, Tieren und Umwelt kein Schaden zugefügt wird.

Neben diesen Mindestanforderungen muss darüber hinaus im Rahmen der Selbstbeurteilung ausgeschlossen werden, dass:

- minderjährige oder vulnerable Personen in die Studie involviert sind,
- menschliche Körperspenden, inkl. Leichen(-teile), Zellen, Gewebe oder embryonale Zellen, Embryos, Föten bzw. deren Gewebe, Verwendung finden,
- Forschungsergebnisse für militärische, kriminelle oder terroristische Zwecke missbraucht werden,
- eine Beeinflussung des politischen oder öffentlichen Meinungsbildes stattfindet,
- Vorwürfe der Diskriminierung auftreten,
- eine Einschränkung der Persönlichkeitsrechte Einzelner erfolgt und
- die Objektivität der Ausführenden der Studie eingeschränkt ist oder Interessenskonflikte bestehen.

Auf diese Weise ist die ethisch und rechtlich korrekte Durchführung der Studie im Hinblick auf das Probandenmanagement sichergestellt.

Unter Berücksichtigung der zeitlichen Ressourcen sollen insgesamt 54 Proband:innen an der Studie teilnehmen. Die gewählte Stichprobengröße stellt eine ausreichende Quantität dar und ermöglicht das Feststellen potentieller statistischer Signifikanzen. Die Mercedes-Benz AG besitzt eine Datenbank mit Informationen zu Proband:innen im niedrigen fünfstelligen Bereich. Anhand im Vorfeld bestimmter Auswahlkriterien können potentielle Proband:innen für eine Studienteilnahme ausgewählt und angefragt werden. Die Definition der Auswahlkriterien muss vorab erfolgen.

Wie zuvor beschrieben beeinflussen die Auswahlkriterien die Repräsentanz des Probandenkollektivs maßgeblich. Die Auswahlkriterien müssen so gewählt werden, dass diese die Kund:innen der Mercedes-Benz AG für Fahrzeugmodelle der Oberklasse abbilden, da der

Einsatz des AR HUD zum Zeitpunkt der Studienplanung nur in Baureihen des oberen Fahrzeugsegmentes vorgesehen ist.

Da sich die Struktur von Kund:innen der Mercedes-Benz S-Klasse in den letzten Jahren stark verändert hat, müssen die Proband:innen ein heterogenes und gleichzeitig ausgewogenes Probandenkollektiv repräsentieren. Die typischen Kund:innen von Oberklassefahrzeugen der Mercedes-Benz AG entsprachen in der Vergangenheit einer älteren Klientel, welches sich in den letzten Jahren stetig verjüngt. Treiber dieser Veränderung ist der asiatische Raum, insbesondere der chinesische Markt, welcher aktuell bereits die Hälfte aller produzierten Mercedes-Benz S-Klassen nachfragt. Die chinesischen Kund:innen sind im Schnitt etwa 20 Jahre jünger als in den restlichen Märkten. Außerdem kaufen 10 % der Mercedes-Benz S-Klasse Kund:innen in China zum ersten Mal ein Fahrzeug. Diese Daten unterstreichen, dass ein möglichst heterogenes Probandenkollektiv ausgewählt und entsprechend bei der Definition der Auswahlkriterien berücksichtigt werden muss. Das Alter der potentiellen Kund:innen ist für diese Arbeit von besonderer Bedeutung, da das menschliche visuelle Sehvermögen mit ansteigendem Alter abnimmt und folglich Abbildungsfehler im virtuellen Bild weniger ausgeprägt oder gar nicht wahrgenommen werden (siehe Abschnitt 2.1).

Im Mittelpunkt der Studie steht die subjektive Wahrnehmung und Bewertung der virtuellen Bildqualität eines AR HUD durch die Proband:innen. Aus diesem Grund ist es zwingend notwendig, dass die Versuchssubjekte bereits Erfahrung mit HUD Systemen sammeln konnten. Hintergrund dieser Entscheidung ist, dass das HUD zum Zeitpunkt der Studie hauptsächlich in Fahrzeugen der Premiumhersteller als Sonderausstattung angeboten wird. Die entsprechend geringe Marktabdeckung könnte dazu führen, dass Versuchssubjekte noch nicht die Möglichkeit hatten ein Fahrzeug mit HUD zu fahren. Folglich entsteht das Risiko, dass potentielle Versuchssubjekte, welche zum ersten Mal ein HUD erleben, von einem AR HUD überwältigt sind und daher keine repräsentative subjektive Bewertung der virtuellen Bildqualität durchführen können. Da mit der Gewöhnung an ein System auch der Anspruch an dieses steigt, ist die einzige zwingende Vorgabe für die Teilnahme der externen Proband:innen als Versuchssubjekt, dass diese Erfahrung mit einem HUD haben.

Um darüber hinaus ein heterogenes und gleichzeitiges ausgewogenes Probandenkollektiv abzubilden, erfolgen zudem Vorgaben zu den Verteilungsquoten folgender Faktoren: Alter, Geschlecht, Größe und Sehhilfe. In Tabelle 4 sind die Anforderungen sowie die Verteilungsquoten an das Probandenkollektiv aufgeführt. Gemäß der Verpflichtung

ausschließlich relevante Daten zu dokumentieren, findet außer den genannten Faktoren keine Einteilung der Versuchssubjekte nach sonstigen Faktoren und entsprechend auch keine weitere Datenerfassung statt. Einziges Ausschlusskriterium der Studie ist die Firmenzugehörigkeit zur Daimler AG.

**Tabelle 4: Anforderungen, Faktoren und Verteilungsquoten für das Probandenkollektiv**

Faktoren	Anforderungen und Verteilungsquoten
Firmenzugehörigkeit	Ausschließlich externe Proband:innen
Altersverteilung	Jeweils 25 %; mindestens aber 15 % je Altersgruppe: 18 - 30 Jahre 31 - 40 Jahre 41 - 50 Jahre 51 - 60 Jahre
Geschlechterverteilung	Jeweils 50 % männlich/weiblich Maximale Differenz 20 %
Sehhilfe	Jeweils 50% mit Sehhilfe/ohne Sehhilfe Mindestens 30% ohne Sehhilfe
Größenverteilung	Jeweils 33 %; mindestens aber 20 % je Größenkategorie: ≤ 170 cm 171 - 180 cm ≥ 181 cm
Besondere Anforderungen	Erfahrung mit Head-up Display

Auf dieser Definitionsbasis für die Versuchssubjekte werden insgesamt 54 Proband:innen rekrutiert. Die tatsächliche Verteilung des Probandenkollektivs ist Tabelle 12 in Abschnitt 4.3.2 zu entnehmen. Damit erfolgt die Zusammenstellung eines repräsentativen Probandenkollektivs für die Studie.

#### 4.2.4. Erstellung der Testbilder und des Fragebogens

Die Erstellung der Testbilder und des Fragebogens findet in einem gemeinsamen iterativen Prozess statt, da beide jeweils aufeinander abgestimmt sein müssen. Deren Ausarbeitung greift teilweise den in Abschnitt 4.2.5 beschriebenen Aufbau und Ablauf der Studie vor. Die Testbilder und der Fragebogen basieren auf der Untersuchung zur Auswahl der Versuchsobjekte durch die Expertengruppe. Bei der Auswahl der WSS (siehe Abschnitt 4.2.2) wurde bereits festgestellt welche Abbildungsfehler im virtuellen Bild wahrnehmbar sind und dass deren Ausprägung im virtuellen Bild in Abhängigkeit der verschiedenen WSS variiert.

Das gesamte Studiendesign orientiert sich an den Forschungsfragen (A), (B), (C) und (D), sowie den drei Forschungshypothesen zum Einfluss der WSS auf die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes und der möglichen Konvergenz mit den IQN. Das Design der

Testbilder und des Fragebogens soll die Untersuchung der Forschungsfragen und Hypothesen ermöglichen.

Forschungsfrage (A) befasst sich mit den möglichen Abbildungsfehlern im virtuellen Bild eines AR HUD und dem Einfluss der WSS auf die Abbildungsfehler. Forschungsfrage (B) und (C) befassen sich mit der subjektiven Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität und Forschungsfrage (D) mit der Konvergenz von eben benannter subjektiven Wahrnehmung mit den definierten IQN. Die aus den Forschungsfragen abgeleiteten und zu untersuchenden Hypothesen besagen, dass:

- die Unterschiede zwischen den WSS die subjektiv wahrgenommene virtuelle Bildqualität beeinflussen (H1),
- die IQN für die unterschiedlichen WSS mit den subjektiven Wahrnehmungen der virtuellen Bildqualität übereinstimmen (H2) und,
- alle Bereiche innerhalb eines virtuellen Bildes einer WSS in gleicher Qualität wahrgenommen werden (H3).

Entsprechend müssen die Testbilder so gestaltet werden, dass es möglich ist alle auftretenden Abbildungsfehler im virtuellen Bild zu erkennen. Es ist weder nötig noch gewünscht, dass alle Abbildungsfehler in einem einzigen Testbild erkenntlich sind. Treten verschiedene Abbildungsfehler gleichzeitig auf, kann dies zu einer Überreizung der Proband:innen führen, sodass es den Proband:innen, für welche das AR HUD System gänzlich neu ist, schwer fällt die unterschiedlichen Abbildungsfehler isoliert voneinander zu bewerten. Unter anderem zielt die Studie genau darauf ab zu untersuchen in welchem Maße die einzelnen Abbildungsfehler die Proband:innen stören. Aus diesem Grund sollen die virtuellen Bildinhalte zu Beginn der Studie möglichst einfach, und mit Fortschreiten der Studie komplexer, gestaltet werden. So kann eine schrittweise Heranführung der Proband:innen an das AR HUD System umgesetzt und die Überreizung der Proband:innen verhindert werden. Dabei sollen sich die Testbilder grundsätzlich am tatsächlichen UI Design des AR HUD orientieren. Die beschriebene Vorgehensweise zur Gestaltung der Testbilder stellt sicher, dass die gezeigten virtuellen Bildinhalte und darin auftretenden Abbildungsfehler die Realität wiedergeben sowie die Abbildungsfehler einzeln bewertet und den IQN zugewiesen werden können.

Auch die Erstellung des Fragebogens muss dazu beitragen, die korrekte Untersuchung der Forschungsfragen und Hypothesen sicherzustellen. Daher soll der Fragebogen ebenfalls alle beobachteten Abbildungsfehler der Expertenuntersuchung (siehe Abschnitt 4.2.2) abdecken.

Die Erstellung des Fragebogens orientiert sich an Porst [76]. Grundsätzlich müssen die Fragen für die Proband:innen klar verständlich sein. Das bedeutet, dass weder die Formulierungen der Fragen kompliziert oder umständlich sein, noch Fachtermini Verwendung finden dürfen. Aus diesem Grund werden für jede Frage zwei Fragetypen, *Typ A* und *Typ B*, erstellt. Dabei stellt *Typ A* die Frage dar, welche technisch präzise die Ausprägung von Abbildungsfehlern und IQN erfragt. *Fragentyp B* gibt die Frage des *Typs A* in einer für die Proband:innen verständlichen Ausdrucksweise wieder. Die meisten Fragen des *Typs B* werden als Aussagen dargestellt, welche Anhand einer Skala bewertet werden. Auf diese Weise wird die präzise Bewertung der virtuellen Bildqualität sichergestellt und die Beantwortung der Fragen für die Proband:innen möglichst einfach gestaltet.

Die Beantwortung der Fragen bzw. Bewertung der Aussagen durch die Proband:innen erfolgt anhand einer fünfstufigen Likert Skala mit den Werten 1 bis 5. Die Likert Skala eignet sich gut um die differenzierte Wahrnehmung der Proband:innen zu erfassen und anschließend zu analysieren. Im vorliegenden Fall findet eine *endpunktbenannte* Skala Einsatz [76]. Dabei entspricht der Wert 1 einer Ablehnung der Aussage mit dem Äquivalent „stimmt nicht“ und der Wert 5 einer Zustimmung der Aussage mit dem Äquivalent „stimmt“. Eine höhere Punktzahl entspricht damit einer besseren Bewertung des virtuellen Bildes. Die fünfstufige Likert Skala ermöglicht so die Bewertung der Ausprägung der Abbildungsfehler zwischen den WSS und ist in Abb. 4.16 zu sehen.

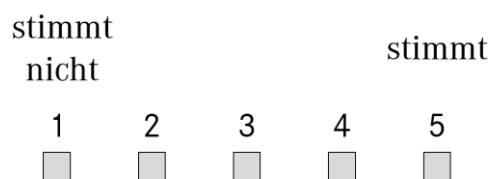


Abb. 4.16: Fünfstufige Likert Skala zur Bewertung der Aussagen bzgl. der Qualität virtueller Testbilder

Analog zur Erstellung der Testbilder, nimmt der Detaillierungsgrad und damit die Komplexität der Fragen mit Fortschreiten der Studie zu. Auf diese Weise unterstützen auch die Fragen und deren spezifische aufeinander aufbauende Reihenfolge bei der schrittweisen Heranführung der Proband:innen an das AR HUD System, um so eine Überforderung der Proband:innen zu verhindern. Zusätzlich müssen die Fragen alle möglichen Abbildungsfehler der virtuellen Bilder der verschiedenen WSS abdecken. Daher soll eine Zuordnung der Fragen zu den Abbildungsfehlern und IQN möglich sein, welche über die präzise Formulierung der Fragen umgesetzt ist.

Wie zuvor erwähnt erfolgt die Erstellung der Testbilder und des Fragebogens gemeinsam. Insgesamt gibt es jeweils drei Darstellungs- und drei Bewertungskategorien. Sie sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Testbilder sind angelehnt an die tatsächlichen Bildinhalte des AR HUD und enthalten Symbole, Text oder tatsächliches UI Design. Die Bewertungskategorien stellen sicher, dass alle Fehlerarten der Abbildungsfehler abgedeckt sind (siehe Abschnitt 2.4) und lassen die Proband:innen die virtuellen Bilder mit statischer oder dynamischer Kopfposition betrachten. Die dritte Bewertungskategorie wird durch dynamische Bildinhalte dargestellt. Die Kopfposition ist dabei statisch. Die Darstellungskategorien werden über die Testbilder bestimmt. Die Bewertungskategorie ist durch die Fragestellung und entsprechende Aufforderung an die Proband:innen durch die Interviewer:in umgesetzt. Die Interviewer:in weist die Proband:innen explizit an den Kopf ruhig zu halten (statische Kopfposition) bzw. den Kopf horizontal oder vertikal zu bewegen (dynamische Kopfposition). Die horizontale und vertikale Kopfbewegung entspricht dabei einem Kopfschütteln oder –nicken und repräsentiert die relative Kopfbewegung der Fahrer:in zum virtuellen Bild während dem Fahren.

**Tabelle 5: Darstellungs- und Bewertungskategorien für Testbilder und Fragen**

Darstellungskategorien der Testbilder	Bewertungskategorien der Fragen
Symbolik	Statische Kopfposition
Text	Dynamische Kopfposition (horizontal/vertikal)
UI Design	Dynamische Bildinhalte

In Tabelle 6 sind zwei Beispiele aus dem Fragebogen aufgeführt. Darunter ist in Abb. 4.17 das zugehörige Testbild zu finden. Zur Verdeutlichung der eben beschriebenen Vorgehensweise zur Erstellung der Testbilder und des Fragebogens sind in Tabelle 6 beide Fragetypen A und B enthalten. Wie zuvor erklärt, erfragt Fragentyp A die technisch präzise Ausprägung von Abbildungsfehlern und IQN, während Fragentyp B die davon abgeleitete verständliche Formulierung für die Proband:innen darstellt. Fragentyp B wird dabei immer als Aussage und nicht tatsächliche Frage ausgeführt. Die Proband:in muss die Aussagen, also Fragentyp B, jeweils anhand der fünfstufigen Likert Skala bewerten. In der letzten Spalte sind die zu den Fragen und Testbildern passend zugeordneten IQN aufgeführt. In den ersten beiden Spalten sind die Darstellungs- und Bewertungskategorie aufgelistet. Für beide Fragen wird der in Abb. 4.17 zu sehende Mercedesstern als Testbild verwendet. Entsprechend ist die Darstellungskategorie für beide Fragen eine *Symbolik*. Die Bewertungskategorie ist ebenfalls für beide Fragen dieselbe, in diesem Fall die *Statische Kopfposition*, bei welcher die Proband:innen den Kopf ruhig in einer Position halten sollen.

Das erste Fragenbeispiel in Tabelle 6 fordert die Proband:innen auf die Rundheit und Plastizität der Symbolik anhand der fünfstufigen Likert Skala zu bewerten. Auf diese Weise soll eine Bewertung der virtuellen Bildverzeichnung erfolgen. Entsprechend können dieser Frage die IQN 1.5 und 1.6 sowie die IQN 2.1 bis 2.6 zugeordnet werden. Die IQN 1.5 und 1.6 beschreiben die mittlere horizontale und vertikale Bildverzeichnung. Die IQN 2.1 bis 2.6 beschreiben die Standardabweichung für den horizontalen und vertikalen Versatz, die horizontale und vertikale Verkippung sowie die maximale horizontale und vertikale Abweichung von Messpunkten. Damit repräsentieren diese IQN die Verzeichnung des virtuellen Bildes.

Stimmt die Proband:in der Aussage zu und bewertet diese mit 5 Punkten, nimmt die Proband:in keine Verzeichnung des virtuellen Bildes wahr. Stimmt die Proband:in der Aussage nicht zu und bewertet diese mit 1 Punkt, nimmt die Proband:in eine starke Verzeichnung des virtuellen Bildes wahr und empfindet diese auch als sehr störend. Folglich entspricht eine Bewertung der Aussage mit 3 Punkten der subjektiven Wahrnehmung einer mittleren Bildverzeichnung und einer störenden Empfindung. Schließlich ermöglicht der Vergleich zwischen den Punktebewertungen durch die Proband:innen mit den gemessenen IQN am Prüfstand für die drei WSS die Analyse der möglichen Konvergenz zwischen subjektiver Wahrnehmung und IQN.

Das zweite Beispiel in Tabelle 6 bezieht sich auf die klare und scharfe Darstellung der angezeigten Symbolik im virtuellen Bild. Diese Frage fordert eine genauere Betrachtung des virtuellen Testbildes durch die Proband:innen, da nicht ausschließlich eine Bewertung der Form stattfindet. Dieses Fragenbeispiel zielt auf die Bewertung des Ghost und möglicher horizontaler und vertikaler Divergenzen ab, da beide Abbildungsfehler Ursache für eine unscharfe Wahrnehmung des virtuellen Bildes sein können. Entsprechend werden der Doppelbildfehler sowie die IQN 3.1 und 3.2 dieser Frage zugeordnet. Die Abfolge der beiden Fragen deutet auch auf die steigende Komplexität im Studienverlauf hin. Beginnend mit leicht verständlichen Fragen hinsichtlich dem bloßen Erkennen vom Symboliken und etwaigen Verzeichnungen der Darstellungen bei statischer Betrachtung, erfolgt mit Fortschreiten der Studie eine Erhöhung der Komplexität durch präziseres Erfragen verschiedener Wahrnehmungen. Die weitere Steigerung der Komplexität erfolgt zudem durch die dynamischen Bewertungskategorien sowie anspruchsvollere Darstellungen in Textform oder UI Design.

**Tabelle 6: Beispiele für Fragen an die Proband:innen, inklusive Kategorisierung der Darstellung und Bewertung, Aufzeigen der Fragetypen A und B, sowie Zuordnung der Fragen zu den IQN**

Darstellung	Bewertung	Fragentyp A	Fragentyp B	IQN
Symbolik 03_MB_Stern_mittig	Statische Kopfposition	Ist eine Verzeichnung (Verzerrung) vorhanden?	Die Abbildung ist kreisrund und plastisch zu erkennen.	1.5 / 1.6 2.X
Symbolik 03_MB_Stern_mittig	Statische Kopfposition	Ist ein Ghost zu sehen? Ist horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Die Kanten der Darstellung sind scharf und eindeutig zu erkennen.	Ghost 3.1/3.2



**Abb. 4.17: Mercedes-Stern als Testbild (Input) und virtuelles Bild (Output) des Versuchsträgers**

Das virtuelle Bild des AR HUD Systems in der Baureihe W223 liegt in zehn Metern Entfernung und hat dort die Fläche eines 77 Zoll Bildschirmes. Aufgrund dieser Größe und dem damit verbundenen großen Reflektionsbereich auf der WSS können theoretisch unterschiedliche Qualitäten innerhalb des virtuellen Bildes entstehen. Im Rahmen der Hypothese H3 findet die Untersuchung dieser möglichen Qualitätsunterschiede innerhalb des virtuellen Bildes statt. Daher werden Testbilder designt, welche den gleichen Inhalt mehrfach enthalten. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 4.18 zu sehen. Das Testbild ist in vier Quadranten aufgeteilt und enthält jeweils einen einfachen Schriftzug. Über den Vergleich der Qualität der vier Bereiche innerhalb des Testbildes kann die Untersuchung der Hypothese H3 erfolgen.



**Abb. 4.18: Mercedes-Schriftzug in vier Quadranten als Testbild (Input) und virtuelles Bild (Output) des Versuchsträgers**

Die Beispiele zeigen, dass die Erstellung der Testbilder und des Fragebogens gemeinsam stattfinden muss. Gleichzeitig gibt sie bereits einen Rahmen für den Ablauf und Aufbau der Studie vor. Die Vorgehensweise mit zwei Fragetypen, die genaue Formulierung der Fragen und

die synchrone Erstellung der Testbilder stellen die Untersuchung der Forschungsfragen und Hypothesen sicher.

In Tabelle 7 ist die Gesamtheit aller Fragen, inklusive beider Fragentypen A und B, den Darstellungs- und Bewertungskategorien sowie die Zuordnung der IQN, aufgelistet. Der gesamte Fragebogen, inklusive gezeigter Testbilder, ist unter Anhang unten zu finden. Zusätzlich zu den erläuterten Gestaltungsrichtlinien wurde auf eine konsistente Formulierung der Fragen geachtet. Diese erleichtert die Befragung für die Proband:innen und hat den Vorteil bestimmte Schlagworte konsequent denselben IQN zuordnen zu können. Außerdem finden nur Fragen Verwendung, welche einen expliziten Mehrwert für die Studie darstellen.

Neben den gezielten Fragen zur Bewertung der virtuellen Testbilder haben die Proband:innen bei jedem Testbild die Möglichkeit qualitative Kommentare abzugeben. Diese weitere Option der Bewertung ermöglicht es zusätzliches Feedback potentieller Kund:innen einzufangen und möglicherweise neue störende Abbildungsfehler in virtuellen Bildern zu erfassen. Bei Bedarf kann im Nachgang der Studie eine Auswertung der qualitativen Kommentare erfolgen.

**Tabelle 7: Fragenkatalog – Inklusive Darstellungs- und Bewertungskategorien, Fragentypen A und B, IQN-Zuordnung**

#	Darstellung	Bewertung	Fragentyp A	Fragentyp B	IQN
1	Symbolik 02_Kacheln_sw	Statische Kopfposition	Ist die Wahrnehmung durch Abbildungsfehler beeinträchtigt?	Eine Kacheldarstellung ist zu erkennen.	1.X 2.X 3.X
2	Symbolik 02_Kacheln_sw	Statische Kopfposition	Ist eine Positionsabweichung vorhanden?	Das Bild liegt mittig in meinem Sichtfeld.	1.1/1.2
3	Symbolik 02_Kacheln_sw	Statische Kopfposition	Ist eine Verkippung vorhanden?	Das Bild liegt waagerecht in meinem Sichtfeld.	1.3/1.4
4	Symbolik 02_Kacheln_sw	Statische Kopfposition	Ist eine Verzeichnung vorhanden?	Alle Kacheln sind gleichermaßen gut und ohne Verzerrung zu erkennen.	1.5/1.6 2.X
5	Symbolik 03_MB_Stern_mittig	Statische Kopfposition	Ist die Wahrnehmung durch Abbildungsfehler beeinträchtigt?	Das Bild ist gut sichtbar und deutlich zu erkennen.	1.X 2.X 3.X
6	Symbolik 03_MB_Stern_mittig	Statische Kopfposition	Ist eine Verzeichnung vorhanden?	Die Abbildung ist kreisrund und plastisch zu erkennen.	1.5/1.6 2.X
7	Symbolik 03_MB_Stern_mittig	Statische Kopfposition	Ist ein Ghost zu sehen? Ist horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Die Kanten der Darstellung sind scharf und eindeutig zu erkennen.	Ghost 3.1/3.2
8	Symbolik 03_MB_Stern_mittig	Statische Kopfposition	Ist horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Das Bild ist angenehm wahrnehmbar.	3.1/3.2
9	Symbolik 03_MB_Stern_mittig	Statische Kopfposition	Ist eine Positionsabweichung vorhanden?	Die Bildposition empfinde ich als angenehm.	1.1/1.2
10.1	Symbolik 04_MB_Stern_4	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Darstellung 1 ist klar und deutlich zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X
10.2	Symbolik 04_MB_Stern_4	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Darstellung 2 ist klar und deutlich zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X

## Einfluss der Windschutzscheibe auf die subjektive Wahrnehmung eines AR HUD

10.3	Symbolik 04_MB_Stern_4	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Darstellung 3 ist klar und deutlich zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X
10.4	Symbolik 04_MB_Stern_4	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Darstellung 4 ist klar und deutlich zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X
11.1	Symbolik 04_MB_Stern_4	Dynamische Kopfposition horizontal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Darstellung 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
11.2	Symbolik 04_MB_Stern_4	Dynamische Kopfposition horizontal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Darstellung 2 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
11.3	Symbolik 04_MB_Stern_4	Dynamische Kopfposition horizontal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Darstellung 3 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
11.4	Symbolik 04_MB_Stern_4	Dynamische Kopfposition horizontal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Darstellung 4 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
12.1	Symbolik 04_MB_Stern_4	Dynamische Kopfposition vertikal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Darstellung 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
12.2	Symbolik 04_MB_Stern_4	Dynamische Kopfposition vertikal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Darstellung 2 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
12.3	Symbolik 04_MB_Stern_4	Dynamische Kopfposition vertikal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Darstellung 3 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
12.4	Symbolik 04_MB_Stern_4	Dynamische Kopfposition vertikal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Darstellung 4 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
13	Text 05_Service	Statische Kopfposition	Ist die Wahrnehmung durch Abbildungsfehler beeinträchtigt?	Der Text ist gut sichtbar und deutlich zu erkennen.	1.X 2.X 3.X
14	Text 05_Service	Statische Kopfposition	Ist eine Verzeichnung vorhanden?	Der Text ist ohne Verzerrung zu erkennen.	1.5/1.6 2.X
15	Text 05_Service	Statische Kopfposition	Ist ein Ghost zu sehen? Ist horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Die Buchstaben sind scharf und eindeutig zu erkennen.	Ghost 3.1/3.2
16	Text 05_Service	Statische Kopfposition	Ist horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Der Text ist angenehm wahrnehmbar.	3.1/3.2
17	Text 05_Service	Statische Kopfposition	Ist eine Positionsabweichung vorhanden?	Die Textposition empfinde ich als angenehm.	1.1/1.2
18.1	Text 06_MB_Schriftzug	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Schriftzug 1 ist klar und deutlich zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X
18.2	Text 06_MB_Schriftzug	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Schriftzug 2 ist klar und deutlich zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X
18.3	Text 06_MB_Schriftzug	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Schriftzug 3 ist klar und deutlich zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X
18.4	Text 06_MB_Schriftzug	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Schriftzug 4 ist klar und deutlich zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X
19.1	Text 06_MB_Schriftzug	Dynamische Kopfposition horizontal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Schriftzug 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X

## Einfluss der Windschutzscheibe auf die subjektive Wahrnehmung eines AR HUD

19.2	Text 06_MB_Schriftzug	Dynamische Kopfposition horizontal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Schriftzug 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
19.3	Text 06_MB_Schriftzug	Dynamische Kopfposition horizontal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Schriftzug 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
19.4	Text 06_MB_Schriftzug	Dynamische Kopfposition horizontal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Schriftzug 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
20.1	Text 06_MB_Schriftzug	Dynamische Kopfposition vertikal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Schriftzug 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
20.2	Text 06_MB_Schriftzug	Dynamische Kopfposition vertikal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Schriftzug 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
20.3	Text 06_MB_Schriftzug	Dynamische Kopfposition vertikal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Schriftzug 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
20.4	Text 06_MB_Schriftzug	Dynamische Kopfposition vertikal	Ist eine Verzeichnung bei dynamischer Kopfposition vorhanden?	Schriftzug 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	2.X 5.X
21	Text 08_HUD_Schriftzug	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Alle 3 Schriftzüge sind gut sichtbar und deutlich zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X
22.1	Text 08_HUD_Schriftzug	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Der obere Schriftzug ist gut lesbar.	Ghost 2.X 3.X
22.2	Text 08_HUD_Schriftzug	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Der mittlere Schriftzug ist gut lesbar.	Ghost 2.X 3.X
22.3	Text 08_HUD_Schriftzug	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Der untere Schriftzug ist gut lesbar.	Ghost 2.X 3.X
23	Text 07_Textnachricht	Statische Kopfposition	Ist die Wahrnehmung durch Abbildungsfehler beeinträchtigt?	Die Textnachricht ist gut lesbar.	1.X 2.X 3.X
24	Text 07_Textnachricht	Statische Kopfposition	Ist horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Das Lesen der Nachricht gelingt ohne Anstrengung.	3.1/3.2
25.1	Text 07_Textnachricht	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Die oberen Zeilen sind gut zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X
25.2	Text 07_Textnachricht	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Die mittleren Zeilen sind gut zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X
25.3	Text 07_Textnachricht	Statische Kopfposition	Sind Verzeichnung, Ghost oder horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Die unteren Zeilen sind gut zu erkennen.	Ghost 2.X 3.X
26	UI Design Animation_Navi	Dynamische Bildinhalte	Ist die Darstellung allgemein verständlich?	Die Unterstützung des Abbiegevorgangs durch die Animation empfinde ich als angemessen.	1.X 2.X 3.X 4.X
27	UI Design Animation_Navi	Dynamische Bildinhalte	Ist die Wahrnehmung durch Abbildungsfehler beeinträchtigt?	Die Animation ist gut wahrnehmbar.	1.X 2.X 3.X
28	UI Design Animation_Navi	Dynamische Bildinhalte	Ist horizontale/vertikale Divergenz vorhanden?	Die Animation ist angenehmer wahrnehmbar als die bereits gezeigten, statischen Bildinhalte.	3.1/3.2
29	UI Design 09_Vielen_Dank	Statische Kopfposition	Ist die Wahrnehmung durch Abbildungsfehler beeinträchtigt?	Die gezeigten Darstellungen waren angenehm wahrnehmbar.	Alle

G	UI Design 09_Vielen_Dank	Statische Kopfposition	Ist die Wahrnehmung durch Abbildungsfehler beeinträchtigt?	Das AR HUD System hat mich begeistert.	Alle
F	UI Design 09_Vielen_Dank	Statische Kopfposition	Ist die Wahrnehmung durch Abbildungsfehler beeinträchtigt?	Ich würde ein solches System im Fahrzeug nutzen.	Alle
N	UI Design 09_Vielen_Dank	Statische Kopfposition	Ist die Wahrnehmung durch Abbildungsfehler beeinträchtigt?	Die Nutzung eines HUD finde ich sinnvoll.	Alle

Im Folgenden Abschnitt sind der technische Aufbau sowie der genaue Ablauf der Studie beschrieben.

#### 4.2.5. Aufbau und Ablauf der Studien

Im letzten Schritt der Studienplanung erfolgt die detaillierte Festlegung des letztendlichen Aufbaus und Ablaufs der Studie. Dies ist nun möglich, da alle Rahmenbedingungen der Studie festgelegt sind. Diesen Rahmen bilden der ausgestaltete Versuchsträger, die ausgewählten Versuchsobjekte (WSS) und Versuchssubjekte (Proband:innen) sowie die festgelegten Testbilder und Fragen.

#### Aufbau der Studie

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, soll die Studie eine möglichst reale Fahrsituation imitieren. Um dies zu erreichen wurde das Interieur des Versuchsträgers mit Ausnahme von Displays und Mittelkonsole, aus Gründen der Geheimhaltung, weitgehend ausgestattet. Damit sich die Proband:innen vor allem auf die virtuellen Bildinhalte konzentrieren, wird davon abgesehen eine bewegliche Fahrsituation, bspw. unter Einsatz eines animierten Bildschirms, darzustellen. Um dennoch eine möglichst reale Fahrsituation zu imitieren, findet eine bedruckte Leinwand Verwendung, welche eine reale Verkehrssituation darstellt. Die Leinwand ist 4,20 m breit und 2,80 m hoch. Die Leinwand dient als Hintergrund für die dargestellten Testbilder des AR HUD Systems im Versuchsträger und ist in Abb. 4.19 zu sehen.



Abb. 4.19: Leinwand mit Verkehrssituation vor dem Versuchsträger

Da das eingesetzte AR HUD System der Baureihe W223 eine Projektionsdistanz von 10 m besitzt, soll auch die Entfernung der Leinwand 10 m betragen. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass eine kontaktanaloge Registrierung der virtuellen Bildinhalte in abgebildeter Verkehrssituation auf der Leinwand möglich ist (vgl. Abschnitt 2.1.3). Ein Beispiel für die kontaktanaloge Registrierung ist in folgender Abb. 4.20 zu sehen. Der animierte Abbiegepfeil, welcher ebenfalls im Rahmen der Studie für die Proband:innen zu sehen und zu bewerten ist, bewegt sich auf die Kreuzung zu und lässt sich schlussendlich in selber Entfernung wie die zu sehende Querstraße registrieren. Damit gibt der animierte Abbiegepfeil der Beobachter:in zu verstehen an der Kreuzung rechts abzubiegen.



Abb. 4.20: Navigationshilfe des AR HUD - Abbiegepfeil auf der Leinwand aus perspektivischer Sicht der Proband:in

Die benannte benötigte Entfernung von 10 m zwischen Versuchsträger (Sitzkiste) und Leinwand ist eine erste Anforderung an die Räumlichkeiten der Studie. Zudem muss eine Möglichkeit zur Befestigung der Leinwand vorhanden sein. Die Leinwand hat eine Breite von 4,20 m und eine Höhe von 2,80 m. Neben Leinwand und Versuchsträger muss auch Platz für die Interviewer:in und entsprechende Technik, inkl. Verkabelung und Stromversorgung, zur Verfügung stehen. Da die Proband:innen zeitlich getaktet jeweils in Zweiergruppen am Studienort erscheinen sollen, muss neben der reinen Studienfläche auch eine Aufenthaltsfläche zur Verfügung stehen. Diese ist nötig, da jeweils nur eine Proband:in gleichzeitig im Versuchsträger Platz nehmen und damit befragt werden kann. Damit keine Beeinflussung der wartenden Proband:in stattfinden kann, ist ein Sicht- und Schallschutz zwischen der Studien- und Aufenthaltsfläche nötig. Dies kann bspw. über einen zusätzlichen Aufenthaltsraum realisiert werden.

Für die Studie findet schlussendlich eine Halle innerhalb des Mercedes-Benz Technology Centers Verwendung. Die Maße der Halle betragen in ihrer Breite ca. 10 m und in ihrer Länge 30 m. Da sich in dieser Halle eine begehbar Hebebühne befindet, beträgt die tatsächliche zur Verfügung stehende Nutzfläche für die Studie in ihrer Breite weiterhin 10 m und in ihrer Länge 25 m. Diese Maße sind ausreichend für die Durchführung der Studie in diesen Räumlichkeiten.

Ein Vorteil der begehbar Hebebühne ist die Möglichkeit die Leinwand, welche die zuvor beschriebene Verkehrssituation abbildet, an dieser Hebebühne zu befestigen und hinsichtlich ihrer Höhe positionieren zu können. In Abb. 4.21 ist eine Skizze der Halle inklusive des Aufbaus für die Studie zu sehen. Darin ist zu erkennen, dass die zur Verfügung stehende Halle ausreichend Platz für einen Aufenthaltsbereich für die jeweils wartende Proband:in bietet. Die Trennung zwischen tatsächlicher Studienfläche und dem Aufenthaltsbereich erfolgt über den Einsatz von mobilen Sicht- und Schallschutzwänden. Der Raum steht insgesamt 5 Tage zur Verfügung. Ein Tag wird dabei für den Auf- und Abbau benötigt.

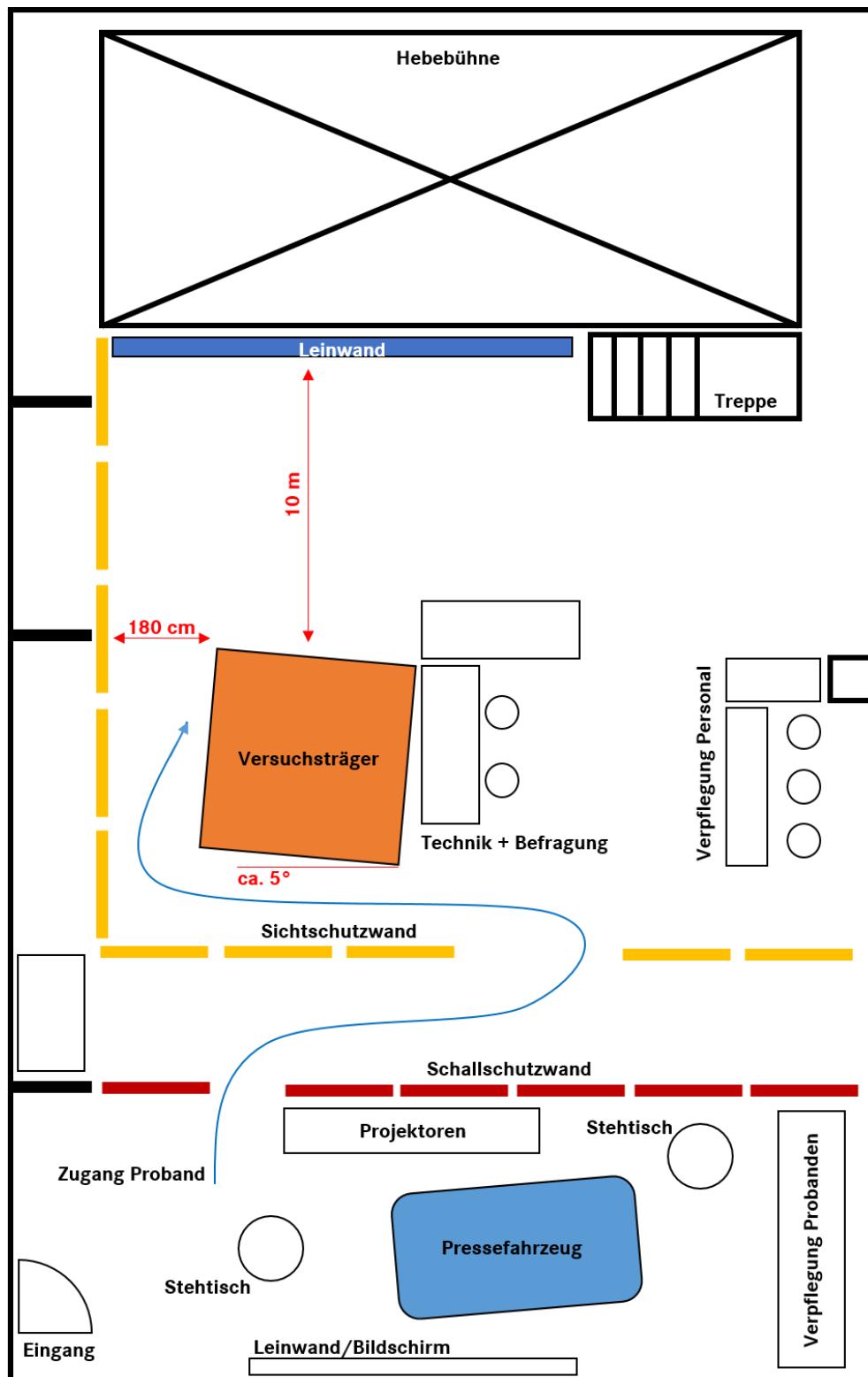
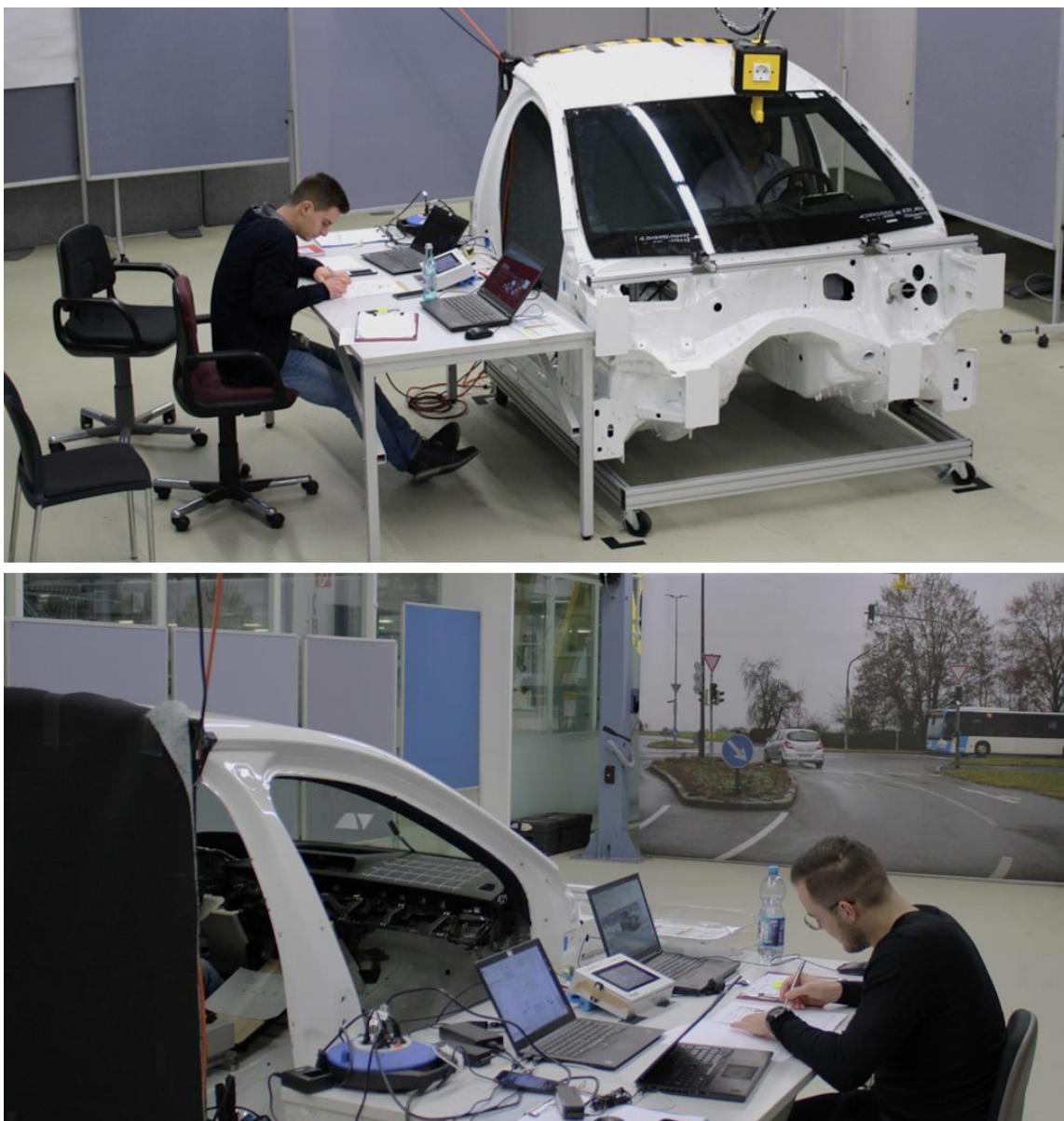


Abb. 4.21: Skizze des Aufbauplans für die Studie

Die Ausrichtung des Versuchsträger wird in Bezug auf die Leinwand vorgenommen. Über eine leichte Rotation des Versuchsträgers um ca. 5° kann so sichergestellt werden, dass die virtuellen Bildinhalte in der dargestellten Verkehrssituation richtig positioniert sind. Die entsprechende

perspektivische Sicht einer in dem Versuchsträger sitzenden Proband:in auf das virtuelle Bild und die Leinwand war bereits in Abb. 4.20 zu sehen.

Die Ansteuerung und Bildgebung des AR HUD Projektors erfolgen wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben mit Hilfe einer Restbussimulation. Die anzuzeigenden Testbilder für die Proband:innen können mittels Image Box an den AR HUD Projektor übertragen werden. Das spezifische Warping für den verwendeten AR HUD Projektor erfolgt ebenfalls über die Image Box. Während der Studie kann die Interviewer:in die jeweils anzuzeigenden Testbilder über das Touch-Display der Image Box auswählen. In Abb. 4.22 ist der finale Gesamtaufbau der Studie mit Versuchsträger und Leinwand während der Befragung von Proband:innen durch die Interviewer:in zu sehen.



**Abb. 4.22: Interviewer während der Befragung von Proband:innen im finalen Gesamtaufbau der Studie mit Versuchsträger und Leinwand**

## Ablauf der Studie

Der prinzipielle Ablauf der Studie ist über alle Versuchsstufen und –subjekte standardisiert und folgt dem gleichen Schema. Bei Ankunft einer Proband:in füllt diese zunächst vorab einen kurzen Fragebogen aus, welcher auch die in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Kriterien hinsichtlich Alters-, Geschlechter- und Größengruppe abfragt. Zudem sind Angaben zur Verwendung von Sehhilfen, sowie zur Nutzungshäufigkeit von HUD zu machen. Bzgl. der Angabe zur Nutzung von HUD stehen den Proband:innen die Auswahlmöglichkeiten *selten*, *häufig* und *immer* zur Verfügung. Die Option *keine Nutzung* eines HUD wird bewusst nicht angeboten, da ein explizites Kriterium zur Auswahl der Proband:innen die Erfahrung mit HUD ist. Die Erfassung dieser Informationen dient einer späteren Analyse möglicher ungewollter Einflusskriterien. So könnte bspw. der Einsatz von Sehhilfen einen Störfaktor darstellen. Die Analyse möglicher Störfaktoren ist in Abschnitt 4.3.2 zu finden.

Des Weiteren sollen die Proband:innen bereits vor Beginn der eigentlichen Studie und Befragung an den verwendeten Bewertungsstil herangeführt werden. Dafür werden den Proband:innen drei Beispiele zur Bewertung anhand der fünfstufigen Likert Skala vorgelegt und anhand dieser Beispiele das Bewertungsschema erläutert.

Anschließend wird die Proband:in zum Versuchsträger begleitet und kann darin Platz nehmen. Die Proband:in wird darum gebeten eine für Sie angenehme Position von Sitz und Lenkrad einzunehmen, welche es der Proband:in ermöglicht das Fahrzeug (Versuchsträger) zu steuern. Die Positionsfindung ist über die elektrische Einstellung von Sitz und Lenkrad möglich (vgl. Abschnitt 4.2.1). Wenn die Proband:in die Positionseinstellung abgeschlossen hat, bittet die Interviewer:in die Proband:in den Blick auf das HUD zu richten und den Kopf möglichst nur bei Aufforderung durch die Interviewer:in zu bewegen. Zuletzt werden vor Beginn der tatsächlichen Befragung drei Kontrollfragen an die Proband:in gestellt. Diese sollen sicherstellen, dass die Proband:in eine Position gefunden hat, von der aus die Proband:in das komplette virtuelle Bild ohne Bildbeschnitt sehen kann. Die Kontrollfragen bzw. –aussagen sind folgend aufgelistet:

- Ich habe eine Sitzposition gefunden, in der ich das Fahrzeug steuern könnte.
- Ich habe einen guten Blick auf die Leinwand.
- Alle vier Rahmeneckpunkte des Bildes sind für mich sichtbar.

In Abb. 4.23 ist das entsprechende Testbild mit angedeutetem Rahmen zu sehen. Nur wenn die Proband:in alle drei Kontrollaussagen mit 5 von 5 Punkten auf der Likert Skala bewertet und

entsprechend das virtuelle Bild ohne Bildbeschnitt wahrnehmen kann, befindet sich die Kopfposition der Proband:in innerhalb der zulässigen Eyebox. Ist dies nicht der Fall, muss die Proband:in ihre Sitzposition erneut einstellen, mit dem Hinweis, dass vier Ecken im virtuellen Bild zu erkennen sind.



**Abb. 4.23: Sicht der Proband:in aus dem Versuchsträger auf das virtuelle Testbild mit vier Rahmeneckpunkten zur Kontrolle der richtigen Sitzposition**

Anschließend erfolgt die Dokumentation der Augposition der Proband:in, um diese bei Bedarf mit den Kameramesspositionen am Prüfstand vergleichen zu können. Dokumentiert werden dabei sowohl die vertikale und auch horizontale Kopfposition anhand von zwei Skalen, wobei die vertikale Skala von oben nach unten in aufsteigender Reihenfolge die Buchstaben A bis J verwendet und die horizontale Skala von links nach rechts die aufsteigenden Zahlen 1 bis 10 verwendet (siehe Abb. 4.24). Hintergrund ist, dass die vertikale Augposition einer Fahrer:in Auswirkungen auf den Strahlengang des optischen Systems und damit die letztendlich verwendete Reflektionsfläche der WSS besitzt. In Abhängigkeit der Flächentoleranzen der WSS können sich dadurch unterschiedliche virtuelle Bildabhängigkeiten ergeben. Daher ersetzt die vertikale Kopfposition der Proband:innen in der Analyse der Störfaktoren deren Größe (siehe Abschnitt 4.3.2).



**Abb. 4.24: Ablesen der Augposition eines Probanden zum Abgleich mit Kamerapositionen am HUD Prüfstand**

Abschließend erläutert die Interviewer:in der Proband:in den weiteren Ablauf der Studie. Dazu gehören vor allem das Beachten der Anweisungen hinsichtlich der Kopfposition sowie die erneute Erläuterung und Nachfrage zum Verständnis des Bewertungsschemas anhand der fünfstufigen Likert Skala. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass die Bewertungen durch die Proband:innen repräsentativ sind. Zusätzlich erklärt die Interviewer:in, dass nacheinander unterschiedliche Testbilder über das HUD in das Sichtfeld der Proband:in projiziert werden und diese in einem ersten Schritt mit Hilfe bereits formulierter Aussagen und der fünfstufigen Likert Skala bewertet werden sollen. Für jedes gezeigte Testbild besteht für die Proband:innen nach der festgelegten quantitativen Bewertung auch die Möglichkeit eine freie qualitative Bewertung vorzunehmen. In diesem zweiten Bewertungsschritt dürfen die Proband:innen jegliche positiven als auch negativen Auffälligkeiten benennen und beschreiben. Die Interviewer:in dokumentiert diese qualitativen Kommentare der Proband:innen sorgfältig.

Nach erfolgter Einweisung der Proband:in startet die tatsächliche Befragung im Interviewformat. Bei jedem neuen Testbild erhält die Proband:in einen kurzen Moment zur Betrachtung des virtuellen Testbildes, bevor die jeweilige Bewertung beginnt. Die Bewertungsaussage wird immer durch die Interviewer:in vorgetragen. Die Proband:in hat keinen Einblick in den Fragebogen. Die Punktebewertung der Proband:in wird entsprechend durch die Interviewer:in notiert. Jedes Testbild darf nur einmal betrachtet und Bewertungen im Nachhinein nicht angepasst werden. Entsprechend ist die Reihenfolge der Testbilder einzuhalten. Auf diese Weise wird die Proband:in durch die Studie geführt.

Besonderheiten in der Bewertung beginnen bei Frage 10 mit der ersten Darstellung der gleichen Symbolik (Mercedes-Stern) in den vier Quadranten des Testbildes (siehe Abb. 4.18). Bei diesem Testbild und den dazugehörigen Fragen 10.1 bis 10.4 erfolgt der explizite Hinweis an die Proband:in auf Unterschiede zwischen den Darstellungen zu achten und diese in die Bewertungen einfließen zu lassen. Eine besondere Anweisung erhält die Proband:in zudem für die Bewertung virtueller Testbilder mit dynamischer Kopfposition (bspw. Fragen 11.1 bis 12.4). Neben der Beschreibung zum entsprechenden Kopfnicken und –schütteln kann die Interviewer:in die korrekte Ausführung kontrollieren bzw. wenn nötig auch die gewünschte Kopfbewegung demonstrieren. Der gesamte Fragebogen, inkl. weiterer Anweisungen für die Proband:innen zu bestimmten Testbildern, ist in Anhang unten zu finden.

Die gesamte Durchlaufzeit beträgt je Proband:in, inklusive Einweisung, ca. 25 Minuten. Daher werden für jede Proband:in 30 Minuten Belegung des Versuchsträgers eingeplant. Das Probandenkollektiv wird in drei Gruppen eingeteilt. Jede Gruppe bewertet jeweils eine der drei Versuchsobjekte WSS A, WSS B oder WSS C. Die Proband:in weiß nicht, dass sie mit ihrer Bewertung der virtuellen Bildqualität vor allem die WSS bewertet. Zudem weiß die Proband:in nicht, dass mehrere WSS, mit unterschiedlichen Qualitäten, der Untersuchungsgegenstand der Studie sind. Jede WSS erhält die Bewertung von jeweils 18 Proband:innen. Entsprechend erfolgt nach jeweils 18 Proband:innen ein Austausch der WSS auf dem Versuchsträger.

Die Vorgehensweise entspricht folglich dem *Between-Subjects-Design*, da jede Proband:in nur ein Versuchsobjekt, also eine WSS bewertet. Die Entscheidung für ein *Between-Subjects-Design* basiert auf den folgenden Punkten. Zum einen bildet diese Vorgehensweise die Realität am besten ab, da Kund:innen nicht die Möglichkeit besitzen verschiedene Fahrzeuge mit einem AR HUD in unterschiedlicher Qualität direkt hintereinander zu fahren und damit zu vergleichen. In der Regel steht einer Kund:in auch nur ein Fahrzeug des gleichen AR HUD Systems zur Verfügung. Des Weiteren würde das häufige Tauschen der WSS, welches nötig wäre um jeder Proband:in alle drei WSS zur Bewertung vorlegen zu können, einen zusätzlichen Störfaktor durch das jeweils erneute Auflegen der WSS bedeuten. Zudem erhöht jeder Tausch der WSS das Risiko einer Beschädigung der empfindlichen WSS, welche die jeweilige WSS unbrauchbar für den Rest der Studie machen könnte. Zuletzt ist der Faktor Zeit an dieser Stelle limitiert. Da eine möglichst große Anzahl heterogener Proband:innen die Qualität des virtuellen Bildes in Abhängigkeit der WSS bewerten sollen, kann nicht jede Proband:in alle drei WSS bewerten. Ein solches Vorgehen würde eine Durchlaufzeit von 60 bis 90 Minuten je Proband:in in Anspruch nehmen und in Anbetracht zur Verfügung stehender Ressourcen die mögliche

Teilnehmerzahl von Proband:innen erheblich senken. Zusätzlich könnte die verdoppelte bis verdreifachte Durchlaufzeit je Proband:in zur Senkung des Konzentrationslevels und damit der Bewertungsqualität der Proband:innen führen. Aus diesen Gründen wird das *Between-Subjects-Design* dem *Within-Subjects-Design* (jede Proband:in bewertet jede WSS) bevorzugt. Wichtig ist außerdem, dass die Auswahl der Proband:innen und deren Zuordnung zu den Gruppen randomisiert stattfindet, da eine Randomisierung den Einfluss nicht erfasster Störfaktoren reduziert.

Wie zu Beginn von Kapitel 4 erläutert, hat die Probandenstudie das Ziel die definierten Kundenansprüche an die virtuelle Bildqualität eines AR HUD zu verifizieren bzw. Diskrepanzen aufzudecken. Dabei orientiert sich das gesamte Studiendesign an den Forschungsfragen (A), (B), (C) und (D). Diese Forschungsfragen beschäftigen sich mit (A) den grundsätzlich auftretenden Abbildungsfehlern im virtuellen Bild eines HUD und deren Abhängigkeiten zur WSS, (B) & (C) mit der subjektiven Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität durch Kund:innen und (D) mit der Übereinstimmung von subjektiver Wahrnehmung und IQN. Daraus ergeben sich drei Hypothesen welche die Probandenstudie explizit untersuchen soll. Diese sind folgend erneut aufgelistet:

*Hypothese 1: Unterschiede in der Formgenauigkeit von Windschutzscheiben, und damit in ihrer Qualität, haben keinen Einfluss auf die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes.*

*Hypothese 2: Die Qualitätskennzahlen des virtuellen Bildes, die IQN, stehen im Einklang mit der subjektiv wahrgenommenen Qualität.*

*Hypothese 3: Alle Bereiche eines virtuellen Bildes werden in gleicher Qualität subjektiv wahrgenommen.*

Die Auswahl der Versuchsobjekte, also der WSS für die Studie, durch die Expert:innen in Abschnitt 4.2.2, sowie die darin festgestellten Erkenntnisse während der Bewertung verschiedener WSS, sind die Basis für die Formulierung der Hypothesen. Die benannten Erkenntnisse und das allgemein definierte Studiendesign in Abschnitt 4.2 liefern zudem schon erste Hinweise bzgl. Forschungsfrage (A) sowie den Hypothesen 1 und 3. Zum einen zeigt die Zuordnung der Bewertungsaussagen im Fragebogen zu den IQN, dass die gewählten Testbilder alle IQN abdecken (Forschungsfrage A). Die Bewertung der WSS durch die Expert:innen fällt eindeutig unterschiedlich aus. Diese Erkenntnis spricht für eine Ablehnung der Hypothese H1. Außerdem stellen die Expert:innen fest, dass die Qualität innerhalb eines virtuellen Bildes

unterschiedlich ausfallen kann. Basierend auf dieser Erkenntnis fließt die Bewertung von vier Quadranten innerhalb eines virtuellen Bildes in den Fragebogen und damit die Probandenstudie ein. Entsprechend ist dies ein Hinweis bzgl. einer möglichen Ablehnung von Hypothese H3.

In den beiden vorausgehenden Abschnitten 4.1 und 4.2 erfolgte damit eine genaue Detaillierung der Studie um die nachfolgenden Ergebnisse einordnen, bewerten und interpretieren zu können. Die Vorbereitungen und getroffenen Maßnahmen stellen zum einen sicher, dass die Ergebnisse repräsentativ für die Bewertung der virtuellen Bildqualität eines AR HUD sind. Grund hierfür ist vor allem die Verwendung eines tatsächlichen optischen HUD Systems mit entsprechender Hardware und Aufbau eines Versuchsträgers. Zum anderen ermöglicht das gewählte Studiendesign die statistische Analyse der Studienergebnisse und damit die wissenschaftliche Beantwortung sowie Bearbeitung der Forschungsfragen und Hypothesen.

## **4.3. Ergebnisse**

In diesem Abschnitt erfolgt die Dokumentation und Analyse der Studienergebnisse. Die subjektiven Bewertungen der virtuellen Bildqualität in Abhängigkeit der jeweiligen WSS durch die Proband:innen stellen dabei die Ergebnisse dar. Die Proband:innen bewerteten die virtuelle Bildqualität anhand der quantitativen fünfstufigen Likert Skala sowie anhand offener qualitativer Kommentare.

Im folgenden Abschnitt 4.3.1 sind die allgemeinen Ergebnisse der Probandenstudie dokumentiert. Anschließend findet sich in Abschnitt 4.3.2 die statistische Analyse der Störfaktoren statt. In Abschnitt 4.3.3 erfolgt die statistische Auswertung der quantitativen sowie die Analyse der qualitativen Ergebnisse. Zuletzt ist in Abschnitt 4.3.4 eine Kohärenzanalyse zwischen den quantitativen Bewertungen der Proband:innen und den IQN zu finden.

### **4.3.1. Allgemeine Ergebnisse**

Jede Proband:in bewertete explizit die virtuelle Bildqualität in Abhängigkeit der WSS anhand von 50 Fragestellungen. Entsprechend liegen 2700 Bewertungen für die virtuelle Bildqualität durch die Proband:innen vor. Diese quantitativen Bewertungen der Proband:innen werden zusätzlich von insgesamt 159 qualitativen Kommentaren ergänzt. Die gesammelten Informationen bilden die Basis der Analyse. Die Analyse der qualitativen Kommentare sowie der zusätzlichen allgemeinen fünf Fragestellungen (G; F; N) sind in Abschnitt 4.3.3.2 zu finden und fließen nicht in die Betrachtung der allgemeinen Ergebnisse ein.

In Abb. 4.25 ist ein Histogramm zu sehen, welches alle Antworten der Proband:innen bzgl. der subjektiv wahrgenommenen Bildqualität abbildet. Das Histogramm enthält dabei die 2700 Antworten für alle drei verwendeten WSS der Probandenstudie.

Die Proband:innen haben die virtuellen Bilder wie folgend aufgelistet bewertet:

- 1526 Bewertungen mit *5 Punkten*
- 696 Bewertungen mit *4 Punkten*
- 312 Bewertungen mit *3 Punkten*
- 128 Bewertungen mit *2 Punkten*
- 38 Bewertungen mit *1 Punkt*

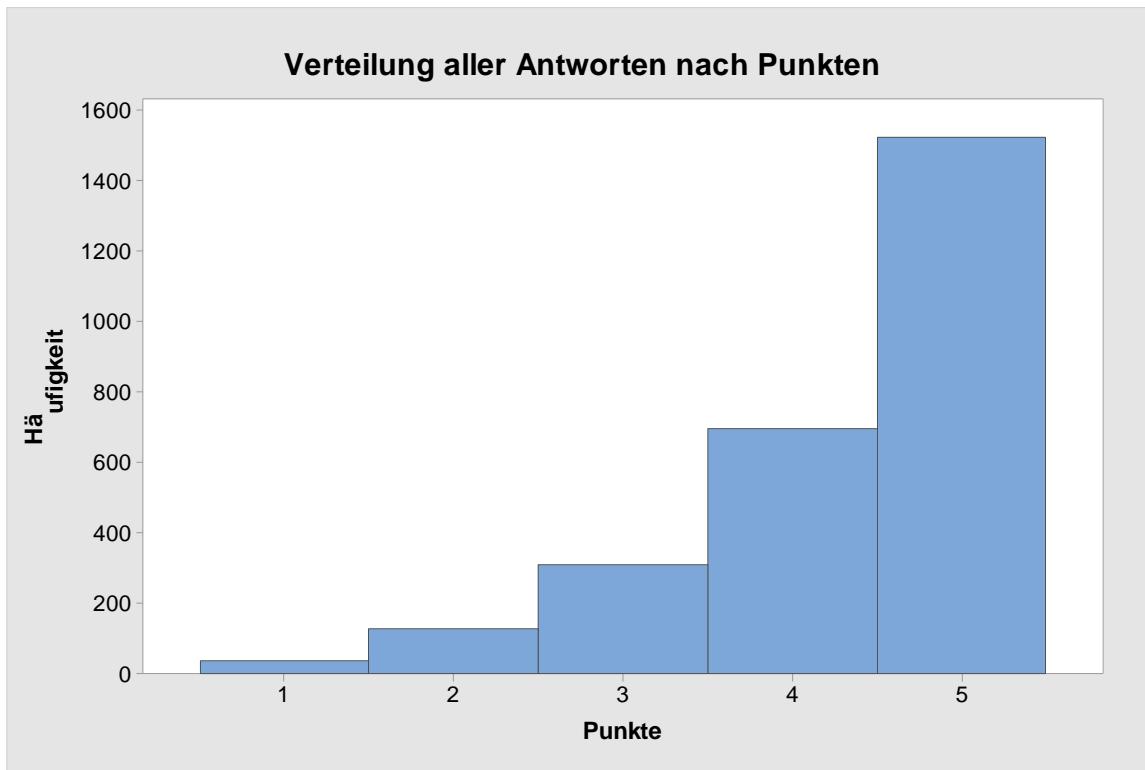


Abb. 4.25: Histogramm zur Verteilung aller Antworten bzgl. der virtuellen Bildqualität nach Punkten

Die virtuelle Bildqualität wurde 2222 Mal mit vier oder mehr Punkten bewertet. Dies entspricht etwa 82 % der Bewertungen. Daraus lässt sich die Annahme ableiten, dass die grundsätzliche virtuelle Bildqualität über die verschiedenen WSS hinweg eine positive Bewertung von den Proband:innen erhält. Dem gegenüber stehen 166 Bewertungen von zwei Punkten oder weniger, was in etwa 6 % der Bewertungen entspricht. Bei den Bewertungen mit zwei oder weniger Punkten ist eindeutig davon auszugehen, dass Proband:innen unzufrieden mit der wahrgenommenen virtuellen Bildqualität sind. Die restlichen 312 Bewertungen erhalten drei Punkte und entsprechen ca. 12 % der Antworten. Vor allem die Bewertungen mit drei oder

weniger Punkten sind im weiteren Verlauf der Ergebnisanalyse genauer zu untersuchen. Dabei gilt es statistische signifikante Einflussfaktoren ausfindig zu machen und diese zu bewerten.

Der Gesamtmittelwert der Studie über alle Proband:innen und WSS hinweg beträgt 4,31 Punkte und bestätigt damit die Annahme hinsichtlich der grundsätzlich positiven Bewertung der virtuellen Bildqualität. Folgend sind die Mittelwerte je verwendeter WSS aufgezählt und in Abb. 4.26 visualisiert:

- WSS A: 4,26 Punkte
- WSS B: 4,39 Punkte
- WSS C: 4,29 Punkte

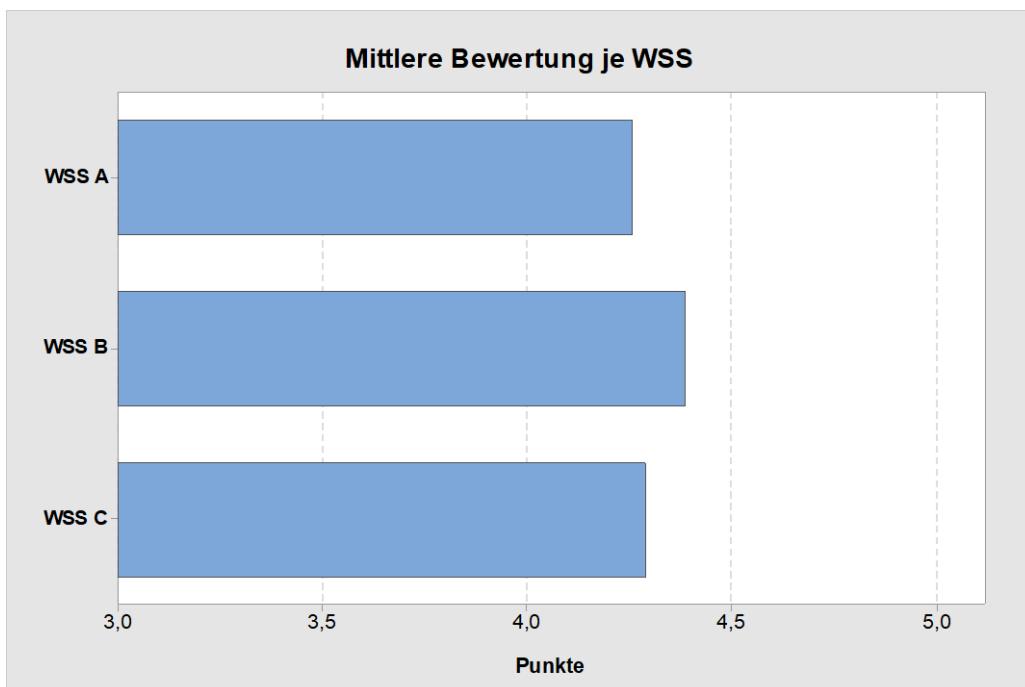


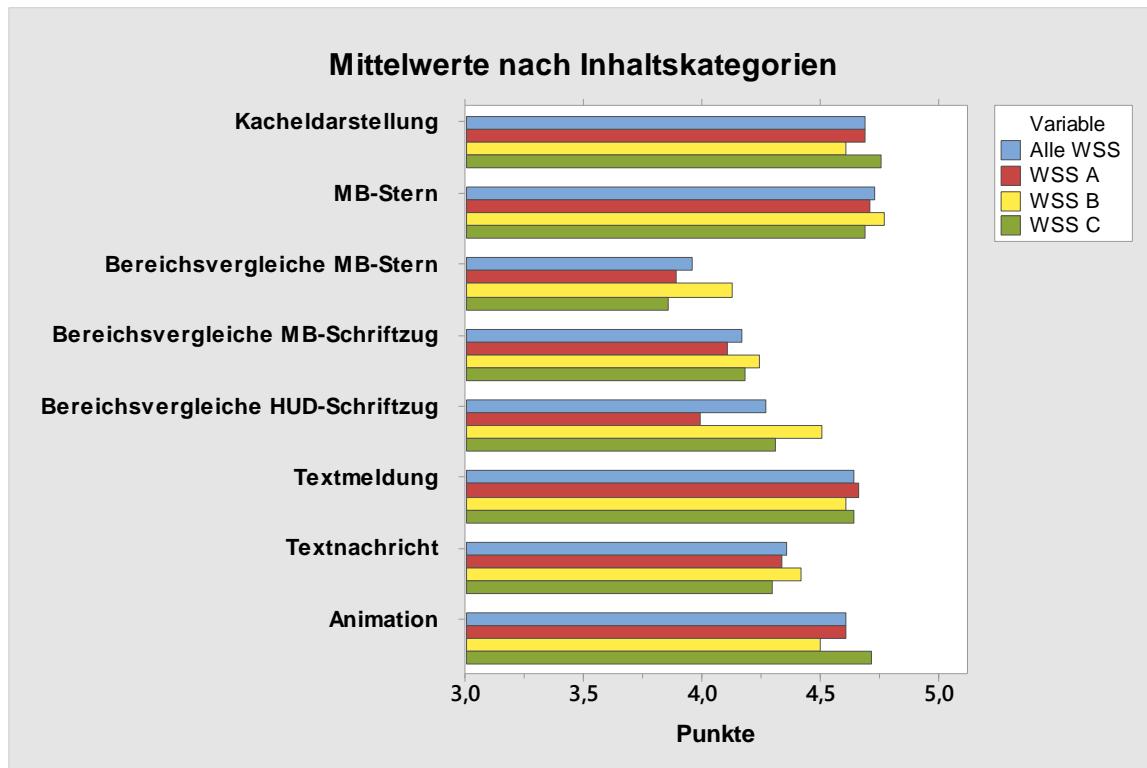
Abb. 4.26: Balkendiagramm mit der mittleren Punktbewertung je WSS

Auf den ersten Blick scheint kein großer Unterschied in der subjektiven Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität zwischen den Versuchsobjekten vorzuliegen, da der Unterschied zwischen durchschnittlich bester und schlechtester WSS lediglich bei 0,13 Punkten liegt. Diese Beobachtung widerspricht klar der Expertenbewertung in Abschnitt 4.2.2, welche eindeutig wahrnehmbare Unterschiede bzgl. der virtuellen Bildqualität zwischen den Versuchsobjekten feststellen konnte. Zudem ist auffällig, dass das Ranking der WSS ein anderes ist. Während die Expert:innen WSS A gesamtheitlich mit *gelb*, WSS B mit *rot* und WSS C mit *grün* bewerten, erhält WSS B nun die beste durchschnittliche Bewertung durch die Proband:innen. Diese Feststellung zeigt eine eindeutige, unerwartete Diskrepanz zwischen der Expertenbewertung und Probandenstudie auf.

In Tabelle 8 und Abb. 4.27 sind die durchschnittlichen Bewertungen anhand der Inhaltskategorien im virtuellen Bild und der drei verwendeten WSS aufgelistet. Für die meisten Inhalte liegen die Bewertungen der verschiedenen WSS für denselben Inhaltstyp mit einer maximalen Differenz von 0,27 Punkten nah beieinander.

**Tabelle 8: Mittelwerte nach Inhaltskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C**

Inhaltskategorie	Alle WSS	WSS A	WSS B	WSS C
Kacheldarstellung (Fragen 1 - 4)	4,69	4,69	4,61	4,76
MB-Stern (Fragen 5 - 9)	4,73	4,71	4,77	4,69
Bereichsvergleiche MB-Stern (Fragen 10.1 - 12.4)	3,96	3,89	4,13	3,86
Bereichsvergleiche MB-Schriftzug (Fragen 18.1 - 20.4)	4,17	4,11	4,24	4,18
Bereichsvergleiche HUD-Schriftzug (Fragen 21 - 22.3)	4,27	3,99	4,51	4,31
Textmeldung (Fragen 13 - 17)	4,64	4,66	4,61	4,64
Textnachricht (Fragen 23 - 25.3)	4,36	4,34	4,42	4,30
Animation (Fragen 27 - 28)	4,61	4,61	4,5	4,72



**Abb. 4.27: Balkendiagramme mit Mittelwerten nach Inhaltskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C**

Ausnahme bildet lediglich der Bereichsvergleich mit HUD-Schriftzug unter Verwendung des Testbilds *08\_MB\_Schriftzug\_3\_vertikal* und den dazugehörigen Fragen 21 – 22.3. Hier liegt die Differenz zwischen WSS mit bester Bewertung (WSS B – 4,51 Punkte) und WSS mit schlechtester Bewertung (WSS A – 3,99 Punkte) bei 0,51 Punkten. Die tabellarischen und

grafischen Darstellungen bestätigen, dass WSS B durch die Proband:innen am besten bewertet wird. Zuletzt fällt auf, dass die drei Inhaltstypen mit Bereichsvergleichen die schlechtesten Bewertungen erhalten. Daraus kann sich schließen lassen, dass die Proband:innen Qualitätsunterschiede innerhalb der WSS wahrnehmen.

Des Weiteren ist eine Aufteilung nach den verschiedenen Bewertungskategorien möglich. Diese ist in Tabelle 9 und Abb. 4.28 dargestellt. Anhand dieser Datenaufbereitung ist zu erkennen, dass die Bewertungskategorien mit dynamischen Kopfpositionen die bisher schlechtesten Bewertungen erhalten: 3,94 Punkte für horizontale Kopfbewegungen bzw. 3,78 Punkte für vertikale Kopfbewegungen. *Dynamische Bildinhalte* erhalten dagegen sehr gute Bewertungen mit durchschnittlich 4,61 Punkten. Die durchschnittlichen Bewertungen bei *dynamischen Kopfpositionen* mit teilweise deutlich unter vier Punkten bestätigen diese Annahme. Es ist eindeutig zu erkennen, dass bei dynamischer Kopfposition schlechtere Ergebnisse erreicht werden als bei statischer Kopfposition. Diese Beobachtung ist für alle WSS gültig. Vor allem bei vertikaler Kopfbewegung scheinen die Proband:innen Verluste hinsichtlich der virtuellen Bildqualität wahrzunehmen. Bspw. ergibt sich bei WSS C ein Delta von 0,87 Punkten zwischen *statischer* und *dynamisch vertikaler Kopfposition* bei *statischen Bildinhalten* bzw. ein Delta von 1,05 Punkten zwischen *statischer Kopfposition mit dynamischen Bildinhalten* und *dynamischer Kopfposition mit statischen Inhalten*. Da die Bewertungskategorien mit dynamischen Kopfpositionen ausschließlich bei Bereichsvergleichen Anwendung finden, können ebenfalls die unterschiedlichen Qualitäten innerhalb des virtuellen Bildes Grund für die schlechteren Ergebnisse sein. Entsprechend ist an dieser Stelle eine weitere Detaillierung der Ergebnisse notwendig.

**Tabelle 9: Mittelwerte nach Bewertungskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C**

Bewertungskategorie	Alle WSS	WSS A	WSS B	WSS C
Statische Kopfposition (Fragen 1 - 10.4; 13 - 18.4; 21 - 25.3)	4,53	4,45	4,59	4,54
Dynamische Kopfposition horizontal (Fragen 11.1 - 11.4; 19.1 - 19.4)	3,94	4,03	3,92	3,86
Dynamische Kopfposition vertikal (Fragen 12.1 - 12.4; 20.1 - 20.4)	3,78	3,65	4,01	3,67
Dynamische Bildinhalte (Fragen 27 - 28)	4,61	4,61	4,5	4,72

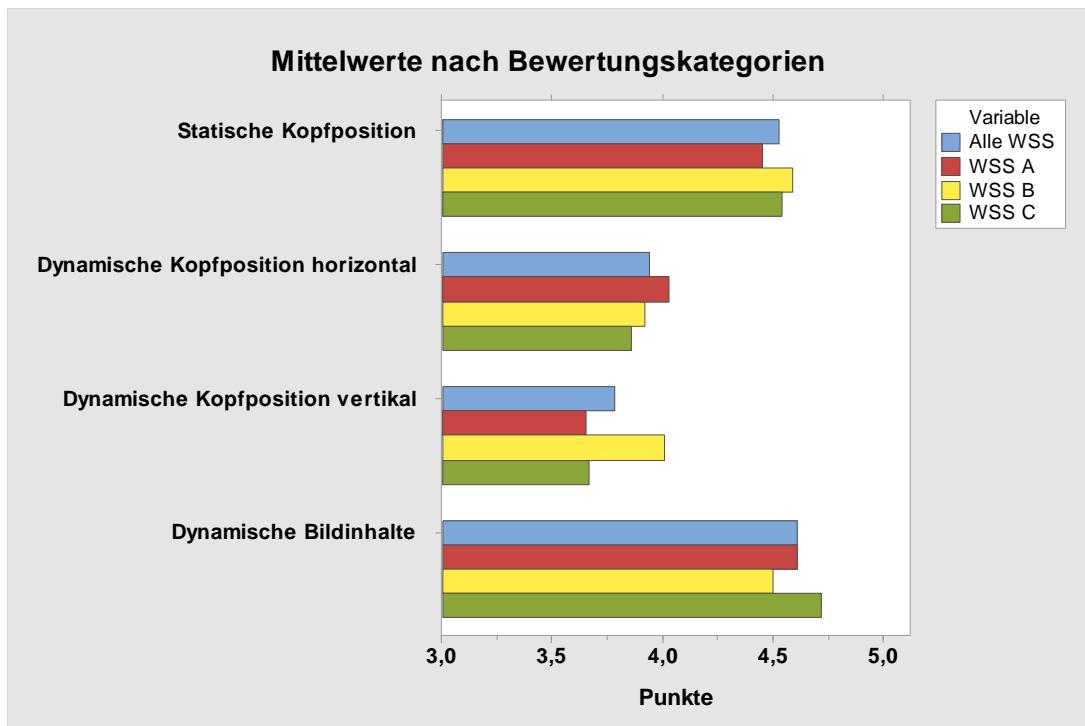


Abb. 4.28: Balkendiagramme mit Mittelwerten nach Bewertungskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C

Aus diesem Grund sind in Tabelle 10 und Abb. 4.29 erneut die Bewertungen bei dynamischer Kopfposition in horizontaler und vertikaler Richtung aufgelistet, sowie zum Vergleich dieselben Inhaltskategorien bei statischer Kopfposition. Für die statische Kopfposition liegt mit 4,49 Punkten eine deutlich bessere Bewertung vor als für die dynamischen Kopfpositionen. Entsprechend scheint vor allem die Kopfbewegung der Proband:innen negative Auswirkungen auf die wahrgenommene virtuelle Bildqualität zu besitzen.

Tabelle 10: Mittelwerte nach Inhalts- und Bewertungskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C

Inhalts- und Bewertungskategorie	Alle WSS	WSS A	WSS B	WSS C
Quadrantendarstellung bei statischer Kopfposition (Fragen 10.1 - 10.4; 18.1 - 18.4)	4,49	4,32	4,61	4,54
Quadrantendarstellung bei dyn. Kopfposition horizontal (Fragen 11.1 - 11.4; 19.1 - 19.4)	3,94	4,03	3,92	3,86
Quadrantendarstellung bei dyn. Kopfposition vertikal (Fragen 12.1 - 12.4; 20.1 - 20.4)	3,78	3,65	4,01	3,67

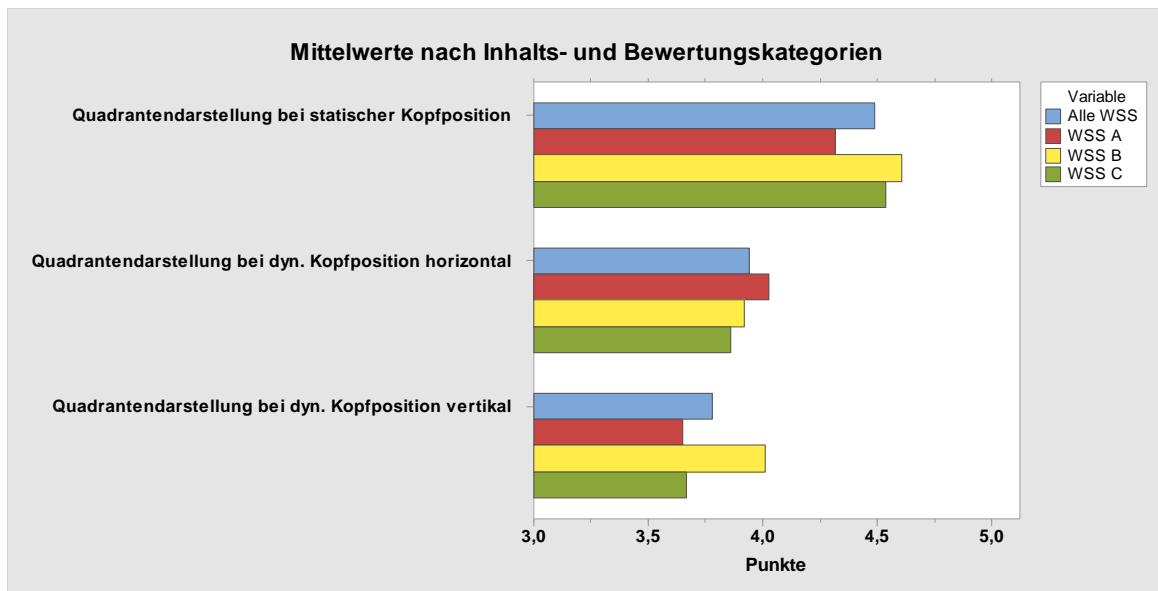


Abb. 4.29: Balkendiagramme mit Mittelwerten nach Inhalts- und Bewertungskategorien für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C

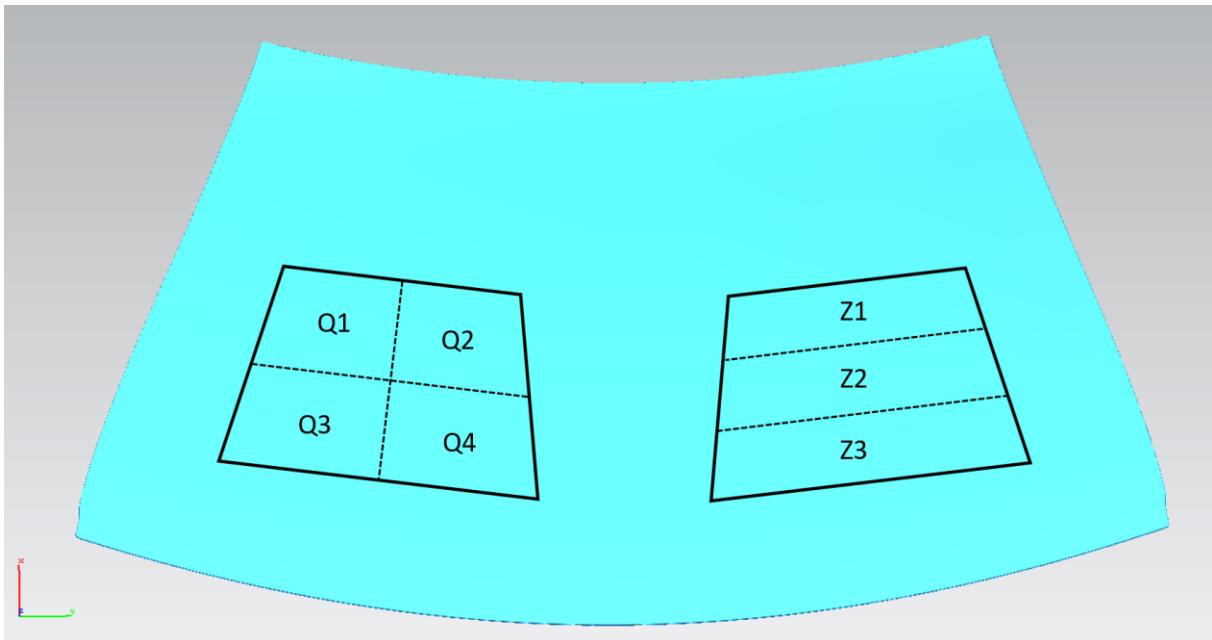
Aus der bisherigen Ergebnisbetrachtung lässt sich schließen, dass die Proband:innen die Bereichsvergleiche bei dynamischer Kopfposition am schlechtesten bewerten. Daher soll zuletzt in dieser allgemeinen Ergebnisbetrachtung ein Vergleich der unterschiedlichen Bildbereiche innerhalb der verwendeten WSS stattfinden. Da aus den bisherigen Betrachtungen klar ist, dass ein Unterschied zwischen statischer und dynamischer Kopfposition besteht, erfolgt erneut eine gesonderte Betrachtung zwischen diesen Kategorien. Zur Erinnerung ist in Abb. 4.30 beispielhaft der Bereichsvergleich anhand des Schriftzugs *Mercedes Benz* (Testbild 06\_MB\_Schriftzug\_4) dargestellt.



Abb. 4.30: Mercedes-Schriftzug in vier Quadranten als Testbild (Input) und virtuelles Bild (Output) des Versuchsträgers

Überträgt man das Prinzip der Quadrantendarstellung der Testbilder 04\_MB\_Stern\_4 und 06\_MB\_Schriftzug\_4 aus Abb. 4.30 auf die Reflektionsfläche der WSS, ergeben sich daraus die in Abb. 4.31 schematisch dargestellten Reflektionsbereiche Q1 – Q4 auf der WSS. Für die Zeilendarstellung der Testbilder 08\_MB\_Schriftzug\_3\_vertikal und 07\_Textnachricht\_vollflaechig kann analog dazu ein oberer Z1, mittlerer Z2 und unterer Z3

Reflektionsbereich auf der WSS definiert werden. Die Reflektionsflächen auf der WSS für ein AR HUD eines Linksslenker- und Rechtslenker-Fahrzeugs sind, abgesehen von einer Spiegelung um die X-Achse des Fahrzeugs, identisch und entsprechend in Abb. 4.31 dargestellt. Bei einer Veränderung der Kopfposition bewegen sich die Reflektionsbereiche der Quadranten bzw. Zeilen auf der WSS in horizontaler und vertikaler Richtung.



**Abb. 4.31: Schematische Darstellung der Reflektionsbereiche Q1-Q4 und Z1-Z3 auf der WSS**

In Tabelle 11 sowie den Abb. 4.32 und Abb. 4.33 sind die Bewertungen der einzelnen Quadranten Q1 – Q4 und Zeilen Z1 – Z3 aufgelistet. Tabelle 11 folgt dabei der Logik von voriger Abb. 4.31. Dabei sind für jede WSS jeweils die Ergebnisse der vier Quadranten und drei Zeilen des Bereichsvergleichs aufgelistet. Am Beispiel der Quadrantendarstellung bei dynamisch vertikaler Kopfposition für WSS C erklärt, erhält *Q1* 3,94 Punkte, *Q2* 3,94 Punkte, *Q3* 3,39 Punkte und *Q4* 3,42 Punkte.

Anhand von Tabelle 11 sowie den Abb. 4.32 und Abb. 4.33 verdeutlichen sich die bisherigen Annahmen. Zum einen bestätigen sie, dass die Bewertungen der Proband:innen bei dynamischer Kopfposition am schlechtesten ausfallen. Zum anderen zeigt sich vor allem anhand der Grafiken in Abb. 4.32 und Abb. 4.33, dass die Bildqualität innerhalb des virtuellen Bildes und damit innerhalb einer WSS deutlich unterschiedliche Bewertungen erhält. Die deutlichsten Beispiele stellt WSS A bei der Quadrantenbefragung mit dynamisch horizontaler Kopfposition und Zeilenbefragung mit statischer Kopfposition dar. Bei der Quadrantenbefragung bewerten die Proband:innen die virtuelle Bildqualität im Bereich Q1 mit 3,61 Punkten und Bereich Q4 mit 4,33 Punkten. Bei der Zeilenbefragung bewerten die

Proband:innen den Bereich Z1 mit 3,81 Punkten und den Bereich Z2 mit 4,56 Punkten. Dies entspricht jeweils einem Delta von 0,72 Punkten bzw. 0,75 Punkten.

**Tabelle 11: Mittelwerte nach Inhalts- und Bewertungskategorien für die Quadranten und Zeilen aller WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C**

Inhalts- und Bewertungskategorie	Alle WSS		WSS A		WSS B		WSS C	
Quadrantendarstellung bei statischer Kopfposition (Fragen 10.1 - 10.4; 18.1 - 18.4)	4,35	4,68	3,92	4,53	4,56	4,69	4,58	4,81
	4,38	4,56	4,22	4,61	4,61	4,58	4,31	4,47
Quadrantendarstellung bei dyn. Kopfposition horizontal (Fragen 11.1 - 11.4; 19.1 - 19.4)	3,75	4,05	3,61	4,22	3,97	3,97	3,67	3,94
	3,78	4,05	3,94	4,33	3,64	4,11	3,75	4,08
Quadrantendarstellung bei dyn. Kopfposition vertikal (Fragen 12.1 - 12.4; 20.1 - 20.4)	3,94	3,98	3,58	3,81	4,31	4,19	3,94	3,94
	3,56	3,63	3,56	3,67	3,72	3,81	3,39	3,42
Zeilendarstellung bei statischer Kopfposition (Fragen 22.1 - 22.3; 25.1 - 25.3)			4,13	3,81		4,31	4,28	
			4,62	4,56		4,75	4,56	
			4,28	4,25		4,36	4,22	

Des Weiteren fällt auf, dass bei Bewertung mit dynamisch horizontaler Kopfposition die Bereiche Q1 und Q3 schlechter abschneiden als die Bereiche Q2 und Q4. Im Gegensatz dazu erhalten bei der Bewertung mit dynamisch vertikaler Kopfposition die Bereiche Q3 und Q4 schlechtere Ergebnisse. Währenddessen scheint bei der Quadrantenbewertung mit statischer Kopfposition kein eindeutig schlechterer Bereich zu bestehen. Es zeichnet sich lediglich eine Tendenz zur schlechteren Bewertung der Bereiche Q1 und Q3 ab. Für die Zeilenbefragung schneidet der mittlere Bereich Z2 immer am besten ab.

Eine Erklärung für schlechtere Ergebnisse bei dynamischer Kopfposition sind inhomogene Verläufe der WSS-Radien. Bei horizontaler Kopfbewegung verändert sich auch der verwendete Reflektionsbereich der WSS in horizontaler Richtung. Ausgehend von der Nominalfläche der WSS ist anzunehmen, dass die horizontalen WSS-Radien im Bereich der A-Säule stärkere Gradienten aufweisen. Grund hierfür ist der Übergang zur A-Säule, um die Designanforderungen hinsichtlich der Fahrzeugsilhouette zu erfüllen. Einen Teil der dadurch entstehenden dynamischen Abbildungsfehler im virtuellen Bild können die asphärischen Spiegel des HUD Projektors nicht korrigieren. Im Produktionsprozess der WSS sind die nominalen Radien und Gradienten nur mit Toleranzen umzusetzen. Die bereits nominal vorhandenen Gradienten sowie die hinzukommenden Toleranzen der WSS-Produktion führen vor allem im Bereich der A-Säule zu Abweichungen der horizontalen WSS-Radien und verursachen entsprechend schlechtere virtuelle Bildqualitäten in den Bereichen Q1 und Q3.

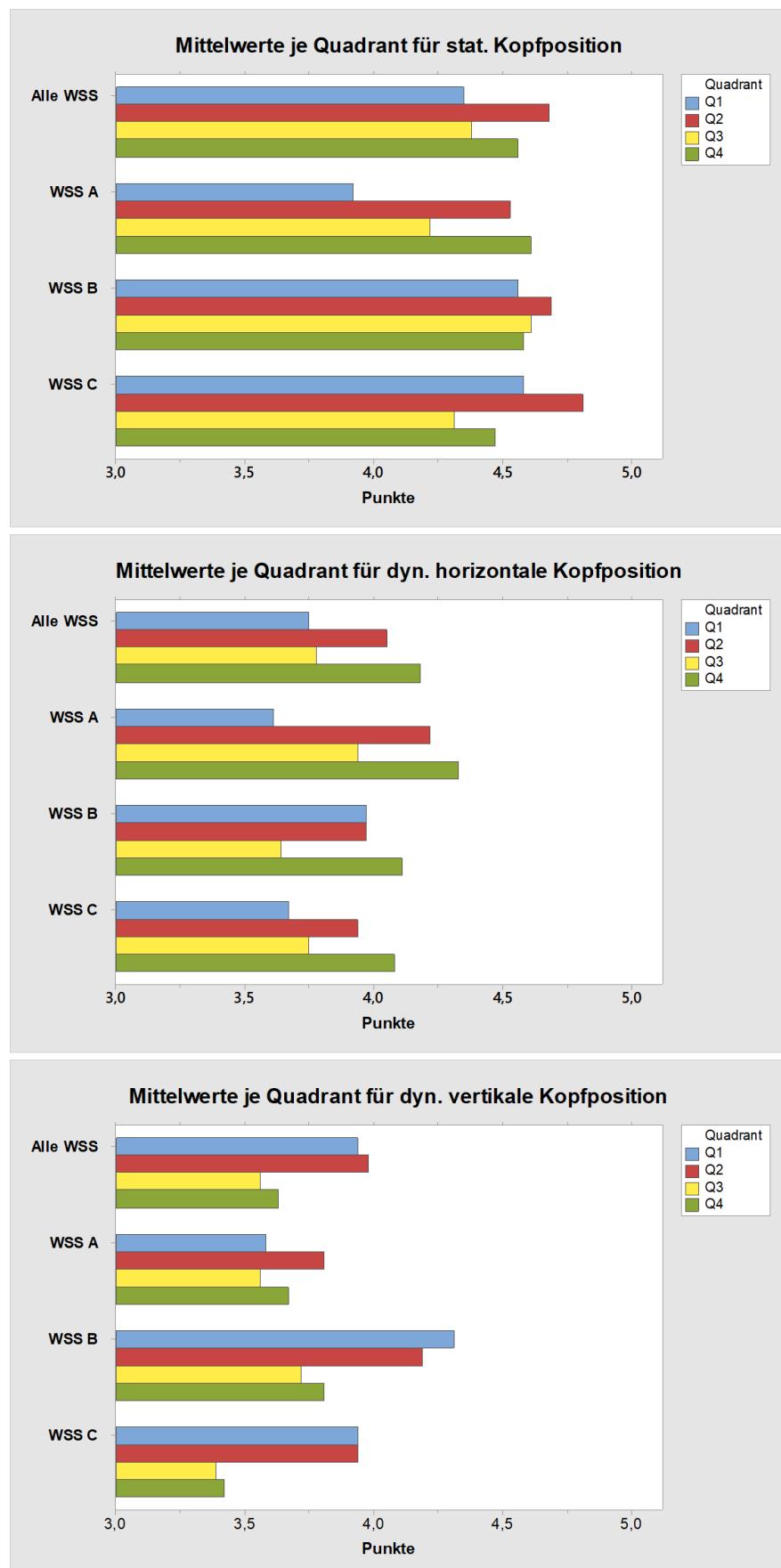
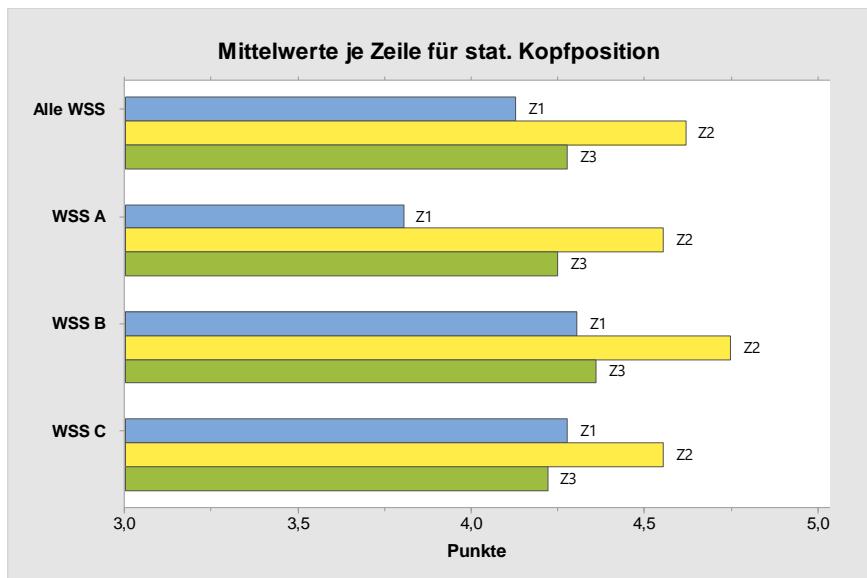


Abb. 4.32: Balkendiagramme mit Mittelwerten je Quadrant nach statischer, dynamisch horizontaler und dynamisch vertikaler Kopfposition für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C



**Abb. 4.33:** Balkendiagramm mit Mittelwerten je Zeile bei statischer Kopfposition für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C

Analog dazu scheinen auch inhomogene vertikale Verläufe der WSS-Radien zu bestehen. Die vertikalen WSS-Radien im Reflektionsbereich sind ebenfalls Radienänderungen und damit Gradienten ausgesetzt. Vor allem außerhalb des Reflektionsbereichs weisen WSS auch nominal größere Gradienten auf. Im oberen Bereich der WSS ist vor allem ein ästhetischer Übergang in das Fahrzeugdach sicherzustellen bzw. im unteren Bereich der Form des WSS-Querträgers und der sich daran orientierenden Stirnwand und dem Fahrzeuginterieur zu folgen. Entsprechend lassen sich die schlechter bewerteten Bildqualitäten im jeweils unteren Bereich des virtuellen Bildes (Q3 u. Q4) durch nominale Gradienten und auftretenden Toleranzen im Produktionsprozess erklären. Die gleiche Erklärung ist auch für die schlechtere Bewertung der Bereiche Z1 und Z3 im Rahmen der Zeilenbefragung gültig. Die jeweils äußeren Bereiche des Reflektionsbereichs erfahren größere Abweichungen und damit stärker wahrnehmbare Abbildungsfehler im virtuellen Bild.

Um die ersten Annahmen der allgemeinen Ergebnisse zu verifizieren bzw. zu widerlegen, findet im Folgenden eine Zusammenfassung der Erkenntnisse statt. Anschließend erfolgt die Zusammenführung mit den allgemeinen Untersuchungshypothesen der Studie aus den Abschnitten 4.2.2 und 4.2.4. Dies ist die Basis zur statistischen Analyse der Ergebnisse um tatsächliche Signifikanzen festzustellen. Die statistische Analyse der Ergebnisse ist in Abschnitt 4.3.3.1 dokumentiert.

Grundsätzlich zeigt die erste allgemeine Ergebnisbetrachtung, dass alle WSS eine generell gute Bewertung durch die Proband:innen erhalten. Dabei scheinen unterschiedliche Bildinhalte (Symbole oder Text) keinen Einfluss auf die subjektiv wahrgenommene Bildqualität zu haben.

Dynamisch bewegte virtuelle Bildinhalte werden durch die Proband:innen am besten bewertet und sind entsprechend am wenigsten anfällig für die Wahrnehmung von Abbildungsfehlern. Zudem ergeben die geringen Unterschiede zwischen den WSS im Hinblick auf die virtuelle Bildqualität ein anderes Ranking als das der Expertenbewertung (siehe Abschnitt 4.2.2). Diese Erkenntnisse deuten auf die Annahme von Hypothese H1:

*Hypothese 1: Unterschiede in der Formgenauigkeit von Windschutzscheiben, und damit in ihrer Qualität, haben keinen Einfluss auf die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes.*

Entsprechend ist die Hypothese H1 vorläufig anzunehmen. Die statistische Prüfung auf Signifikanz erfolgt in Abschnitt 4.3.3.1. Daraus lässt sich schließen, dass die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität davon abhängt, ob einer Betrachter:in nur eine einzelne WSS zur Bewertung vorliegt oder mehrere WSS im direkten Vergleich zur Verfügung stehen.

Eine weitere Erkenntnis der ersten Ergebnisbetrachtung ist, dass Kopfbewegungen der Proband:innen zu einer schlechteren Bewertung der virtuellen Bildqualität führen. Dies ist gleichermaßen für horizontale und vertikale Kopfbewegungen gültig, wobei Letztere zu den durchschnittlich schlechtesten Bewertungen führte. Diese Erkenntnis lag für die Formulierung der Untersuchungshypothesen nicht vor. Aus diesem Grund wurde nicht explizit zwischen der Bewertung mit statischer oder dynamischer Kopfposition unterschieden. Daher ist folgend eine zusätzliche Hypothese H4 formuliert:

*Hypothese 4: Die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes ist nicht abhängig von einer statischen oder dynamischen Kopfposition.*

Entsprechend der bisherigen Erkenntnisse ist Hypothese H4 abzulehnen, da die Bildqualität in Abhängigkeit zur statischen oder dynamischen Kopfbewegung zu stehen scheint. Die Überprüfung der statistischen Signifikanz erfolgt ebenfalls in Abschnitt 4.3.3.1.

Zuletzt geben die Ergebnisse Aufschluss über die subjektiv wahrgenommene Qualität verschiedener Bereiche innerhalb des virtuellen Bildes. Die verschiedenen Bereiche des virtuellen Bildes erhalten unterschiedliche Bewertungen durch die Proband:innen. Folglich widersprechen diese Erkenntnisse der Hypothese H3:

*Hypothese 3: Alle Bereiche innerhalb eines virtuellen Bildes einer Windschutzscheibe werden in gleicher Qualität wahrgenommen.*

Die IQN zur Feststellung und Quantifizierung von Abbildungsfehlern im virtuellen Bild bewerten nur teilweise die Unterschiede zwischen Bereichen innerhalb eines Bildes. Da jedoch gerade hier unterschiedliche Qualitäten durch die Proband:innen wahrgenommen werden, könnte bei tatsächlicher statistischer Signifikanz eine Erweiterung der IQN an dieser Stelle sinnvoll sein.

Bevor im Abschnitt 4.3.3 die statistische Analyse der quantitativen Studienergebnisse sowie der qualitativen Kommentare stattfindet, ist im folgenden Abschnitt die statistische Analyse möglicher Störfaktoren dokumentiert.

#### 4.3.2. Analyse der Störfaktoren

Vor der Analyse der Studienergebnisse erfolgt in diesem Abschnitt die Analyse der Störfaktoren. Die Analyse soll Informationen über mögliche Einflüsse auf die Studienergebnisse durch das Probandenkollektiv ergeben. Die Analyse umfasst wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben die Störfaktoren Alter, Geschlecht, Größe, Sehhilfe sowie HUD Erfahrung. Die tatsächliche Verteilung der Proband:innen anhand dieser Faktoren ist Tabelle 12 zu entnehmen.

**Tabelle 12: Verteilung der Proband:innen nach den Stufen der Faktoren (Auswahlkriterien) der Versuchssubjekte**

	Alter [Jahre]				Größe [cm]			Geschlecht		Sehhilfe		HUD Erfahrung		
	18 - 30	31 - 40	41 - 50	51 - 60	≤160	171 - 180	181 - ≥190	männlich	weiblich	Ja	nein	selten	häufig	immer
<b>IST</b>	12	11	11	20	19	22	13	31	23	31	23	26	10	18
<b>SOLL (ideal)</b>	13	13	14	14	18	18	18	27	27	27	27			
<b>SOLL (min.)</b>		8				11		22		22				
<b>DELTA (Soll ideal)</b>	-1	-2	-3	6	1	4	-5	4	-4	4	-4			

Die Analyse der möglichen Störfaktoren stellt sicher, dass sich keine ungewollten Einflüsse auf die Beurteilung der WSS auswirken. Alle untersuchten Faktoren erreichen die festgelegten Verteilerschlüssel. Ausnahme bildet dabei lediglich der Störfaktor *HUD Erfahrung*, welcher keinen definierten Verteilerschlüssel besitzt. Grund hierfür ist, dass diese Anforderung an das Probandenkollektiv der limitierende Faktor ist, da gesamtheitlich betrachtet noch wenige

Autofahrer:innen Erfahrungen mit einem HUD haben. Wie in Abschnitt 4.2.3 erläutert, ist die *HUD Erfahrung* dennoch eine zwingende Voraussetzung für die Teilnahme an der Studie.

In Tabelle 13 sind die Mittelwerte anhand der verschiedenen Stufen für die Faktoren des Probandenkollektivs aufgeschlüsselt. Dabei erfolgt eine Unterscheidung je Faktorstufe für den Mittelwert aller WSS, sowie für WSS A, WSS B und WSS C. Die in Tabelle 12 aufgeführte Größe der Proband:innen wurde durch deren Augposition ersetzt (oben / unten). Weitere Details zur Augposition der Proband:innen und deren Abgleich mit den tatsächlich gemessenen IQN aus verschiedenen Kamerapositionen befinden sich in den Abschnitten 4.3.4 und 4.4.

Beim Betrachten von Tabelle 13 ist positiv festzustellen, dass für alle Stufen der verschiedenen Faktoren Ergebnisse vorliegen. Dadurch ist grundsätzlich von einer homogenen Distribution der Proband:innen auszugehen. Dies bestätigen die in Tabelle 12 aufgeschlüsselten Faktorstufen der Proband:innen. Entsprechend greift die vorliegende Studie gemäß den Vorgaben auf ein möglichst repräsentatives Probandenkollektiv zurück.

**Tabelle 13: Mittelwerte nach Stufen der Faktoren für das Probandenkollektiv für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C**

Faktorstufen	Alle WSS	WSS A	WSS B	WSS C
<i>Alter</i>				
18 – 30 Jahre	4,09	4,49	4,13	3,57
31 – 40 Jahre	4,03	3,77	4,26	3,96
41 – 50 Jahre	4,27	3,61	4,38	4,49
51 – 60 Jahre	4,59	4,52	4,70	4,60
<i>Geschlecht</i>				
Weiblich	4,35	4,37	4,48	4,14
Männlich	4,26	3,98	4,32	4,33
<i>Sehhilfe</i>				
Ja	4,44	4,53	4,45	4,36
Nein	4,11	3,88	4,30	4,12
<i>HUD Erfahrung</i>				
Immer	4,43	4,37	4,46	4,46
Häufig	4,39	3,91	4,60	4,60
Selten	4,17	4,27	4,18	4,07
<i>Augposition</i>				
Oben	4,30	4,16	4,37	4,31
Unten	4,30	4,26	4,38	4,24

Die Stufen je Faktor weisen für die Gesamtmittelwerte über alle WSS eher geringe Unterschiede aus. Lediglich beim Faktor *Alter* besteht zwischen den Stufen ein maximales Delta von 0,56 Punkten. Tendenziell bewerten ältere Proband:innen die virtuelle Bildqualität besser als jüngere Proband:innen. Des Weiteren fällt auf, dass für einzelne Faktorstufen deutlich unterschiedliche Bewertungen der WSS vorliegen. Dies trifft für den Faktor *Alter* bei den Stufen *18 – 30 Jahre* und *41 – 50 Jahre* sowie den Faktor *HUD Erfahrung* bei Stufe *häufig* zu. Innerhalb der genannten Faktoren bestätigen die anderen Stufen diese Beobachtungen nicht oder weisen zum Teil gar andere Tendenzen auf. Entsprechend werden diese Unterschiede nicht weiter untersucht. Da ansonsten keine weiteren Auffälligkeiten bestehen ist im Folgenden die Analyse der Störfaktoren auf statistische Signifikanzen beschrieben.

Die Einflussanalyse der Störfaktoren findet in der Statistiksoftware *Minitab®* unter Verwendung der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) statt. Mit Hilfe einer ANOVA kann eine Feststellung statistisch signifikanter Unterschiede zwischen den Mittelwerten verschiedener unabhängiger Gruppen oder Stichproben erfolgen [13].

Vorliegend stellen die unterschiedlichen Stufen innerhalb eines Störfaktors jeweils die unabhängigen Gruppen und damit die unabhängigen Variablen dar. Folglich wird für alle fünf Störfaktoren eine eigene ANOVA durchgeführt. Die ANOVA untersucht sowohl die Varianzen der abhängigen Variablen innerhalb einer unabhängigen Gruppe, als auch die Varianzen zwischen den unabhängigen Gruppen. Entsprechend erhält die einfaktorielle Varianzanalyse ihren Namen. Die ANOVA basiert auf dem statistischen t-Test unabhängiger Stichproben zum Vergleich von Faktorstufen.

Für diese Untersuchung soll keine Prüfung von Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Faktoren stattfinden. Daher findet die mehrfaktorielle ANOVA hier keine Anwendung. Bei der Durchführung einer ANOVA wird eine Normalverteilung der Daten empfohlen [10,40]. Die Prüfung auf Normalverteilung erfolgt mit Hilfe des Anderson-Darling-Tests und Darstellung der jeweiligen Datenpunkte einer Faktorstufe in Wahrscheinlichkeitsnetzen. Die Wahrscheinlichkeitsnetze sind in Anhang XLIV dargestellt. Die dort aufgeführten Grafiken enthalten jeweils den p-Wert zur Bestätigung oder Ablehnung der Nullhypothese. In diesem Anwendungsfall zur Prüfung der Normalverteilung lautet die Nullhypothese  $H_{0Nv}$ : *Die Daten entsprechen einer Normalverteilung*. Das Alpha-Niveau beträgt  $\alpha = 0,05$  und entspricht damit einem 95 % Konfidenzniveau. Die Nullhypothese wird abgelehnt, wenn  $p \leq 0,05$  ist. Trifft dies zu, liegt keine Normalverteilung vor.

Da teilweise nur wenige Datenpunkte je Faktorstufe vorliegen, ist zu erwarten, dass nicht allen Faktorstufen normalverteilte Daten zugrunde liegen. Bspw. enthält die Stufe *41 – 50 Jahre* des Faktors *Alter* elf Datenpunkte, welche keiner Normalverteilung entsprechen. Andererseits enthält die Stufe *häufig* des Faktors *HUD Erfahrung* lediglich zehn Datenpunkte, welche dennoch einer Normalverteilung entsprechen. Trotz der zum Teil nicht normalverteilten Daten einzelner Faktorstufen (*41 – 50 Jahre; Unten; Weiblich; Sehhilfe Ja*) soll die ANOVA an dieser Stelle Anwendung finden. Dieser Entscheidung liegen vier Argumente zugrunde. Zum Ersten weisen die Wahrscheinlichkeitsnetze aller Stufen über alle Faktoren hinweg eine vollwertige oder zumindest annähernde grafische Normalverteilung aus. Diese sind in Anhang

A.3 Statistische Kennzahlen und Grafiken unter den Abb. A - 2 bis Abb. A - 6 dokumentiert. Zum Zweiten sind die Abweichungen einzelner Faktorstufen auf die geringen Anzahlen von Datenpunkten und einzelne Ausreißer zurückzuführen. Bspw. sind Ausreißer im unteren Datenbereich für die Faktorstufen *41 – 50 Jahre* oder *Sehhilfe Ja* in den Wahrscheinlichkeitsnetzen unter Anhang A.3 in Abb. A - 2 und Abb. A - 6 zu finden. Zum Dritten soll an dieser Stelle ausschließlich der mögliche Einfluss der Störfaktoren (Faktorstufen) auf die abhängige Variable (Bewertung der Proband:innen) festgestellt werden. Und zum Vierten erfolgte bereits an vielen Stellen die Bestätigung, dass die ANOVA durchaus robust ggü. Verletzungen der Normalverteilung ist [10,40]. Daher wird an dieser Stelle von einer Transformation der Daten zur Verbesserung der Normalverteilung abgesehen.

Im Weiteren erfolgt die Beschreibung der ANOVA zur Untersuchung möglicher Einflüsse der Störfaktoren. Die Nullhypothese der ANOVA  $H0_{ANOVA}$  lautet im vorliegenden Fall: *Alle Mittelwerte sind gleich*. Die Ablehnung der Nullhypothese kann über den F-Wert oder den p-Wert der Varianzanalyse erfolgen. Analog zur Prüfung auf Normalverteilung beträgt das Alpha-Niveau  $\alpha = 0,05$  und entspricht einem Konfidenzniveau von 95 %. Dementsprechend erfolgt eine Ablehnung der Nullhypothese, wenn  $p \leq 0,05$  ist. Die Prüfung des F-Wertes vollzieht sich anhand zweier Kennzahlen der statistischen *Fisher Verteilung*. Diese sind der aus der Teststatistik berechnete *empirische F-Wert*  $F_{emp}$  sowie der *kritische F-Wert*  $F_{krit}$ . Dabei ist  $F_{emp}$  der mathematische Quotient der *Varianz zwischen den Gruppen*  $\sigma_{zws}^2$  und der *Varianz innerhalb der Gruppen*  $\sigma_{inn}^2$ .  $F_{krit}$  lässt sich anhand der Freiheitsgrade des statistischen Modells sowie dem Modell der F-Verteilung bestimmen. Um ein Alpha-Niveau von  $\alpha = 0,05$  abzubilden, findet das entsprechende Modell der F-Verteilung für das 95 % Konfidenzintervall Verwendung. Ist  $F_{emp} > F_{krit}$  erfolgt die Ablehnung der Nullhypothese  $H0_{ANOVA}$ . Erfolgt eine Ablehnung der Nullhypothese über den F- oder p-Wert, liegt ein statistisch signifikanter Einfluss eines Störfaktors auf die abhängige Variable und damit auf die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität vor. Weitere Details zur verwendeten Statistik sind in [29] zu finden.

Schlussendlich kann für die Störfaktoren *Alter* und *Sehhilfe* eine Feststellung statistischer Signifikanzen hinsichtlich Einfluss auf die abhängige Variable stattfinden. Im Folgenden ist die verwendete Methodik und anschließende Interpretation am Beispiel des Störfaktors *Alter* beschrieben.

Die Durchführung der ANOVA findet in der Software Minitab® statt. Das gewählte Konfidenzniveau beträgt 95 % und dessen Konfidenzintervall ist beidseitig berücksichtigt. Für die Varianzanalyse werden gleiche Varianzen der einzelnen Faktorstufen angenommen. Zusätzlich zu den Ergebnissen der Varianzanalyse lassen sich in Minitab die Vergleichsverfahren nach Tukey und Fisher durchführen. Diese ermöglichen detailliertere Einblicke in die Analyse der Mittelwertunterschiede. Vor allem geben die generierten Grafiken Aufschluss über die Abweichungen zwischen den Mittelwerten der einzelnen Faktorstufen und damit Ihres Einflusses auf die abhängige Variable. Die Mittelwerte je Proband:in sind die Berechnungsbasis der ANOVA. Das heißt, dass alle subjektiven Bewertungen der virtuellen Bildqualität einer Proband:in jeweils eine Antwortvariable darstellen. Die Antwortvariable einer Proband:in kann dann für jeden Faktor jeweils einer Stufe zugeordnet werden. Die Zuordnung der Antwortvariablen ist unter Anhang

### A.3 Statistische Kennzahlen und Grafiken in Tabelle 40 zu finden.

In Tabelle 14 sind zunächst auf der linken Seite die Mittelwerte, Standardabweichungen und Anzahl der Datenpunkte für die Faktorstufen des Störfaktors *Alter* aufgelistet. Auf der rechten Seite von Tabelle 14 finden sich die Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor *Alter*. Bereits die Betrachtung der Mittelwerte zeigt, dass die Proband:innen höheren Alters die virtuelle Bildqualität besser bewerten. Die Altersgruppe von *51 – 60 Jahren* sticht dabei besonders hervor. Anhand des p-Wertes  $p = 0,001$  lässt sich die Nullhypothese  $H0_{ANOVA}$  eindeutig ablehnen. Entsprechend unterscheiden sich die Mittelwerte der verschiedenen Faktorstufen statistisch signifikant voneinander. Diese Annahme bestätigt sich durch den empirischen F-Wert  $F_{emp} = 6,85$ . Dieser ist größer als der aus dem Modell der F-Verteilung entnommene *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 2,79$ . Die Bestimmung des *kritischen F-Wertes*  $F_{krit}$  erfolgt auf Basis der Freiheitsgrade zwischen den Faktorstufen, welche dem Wert 3 entsprechen sowie der Freiheitsgrade innerhalb der Faktorstufen, welche dem Wert 50 entsprechen. Die Freiheitsgrade sind jeweils der Spalte *DF* aus Tabelle 14 zu entnehmen.

**Tabelle 14: Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor Alter**

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
18-30	12	4,090	0,481	(3,867; 4,313)	Faktor	3	6,85	0,001
31-40	11	4,026	0,436	(3,793; 4,259)	Fehler	50		
41-50	11	4,269	0,464	(4,036; 4,502)	Gesamt	53		
51-60	20	4,590	0,207	(4,417; 4,763)				

Zusammengefasste StdAbw = 0,384958

In den Abb. 4.34, Abb. 4.35 und Abb. 4.36 sind die 95 % Konfidenzintervalle als standardisiertes Fehlerbalkendiagramm, sowie als simultan ermittelte Konfidenzintervalle nach Tukey bzw. individuell ermittelte Konfidenzintervalle nach Fisher dargestellt. Das Fehlerbalkendiagramm sowie die Vergleichsverfahren nach Tukey und Fisher veranschaulichen das Ergebnis unterschiedlicher Mittelwerte der verschiedenen Faktorstufen. Das Standardverfahren sowie das Vergleichsverfahren nach Fisher stellen signifikante Mittelwertunterschiede zwischen der Stufe *51 – 60 Jahre* und allen anderen Stufen fest. Das Vergleichsverfahren nach Tukey stellt die Mittelwertunterschiede zwischen der Stufe *51 – 60 Jahre* und *18 – 30 Jahre* sowie *31 – 40 Jahre* fest.

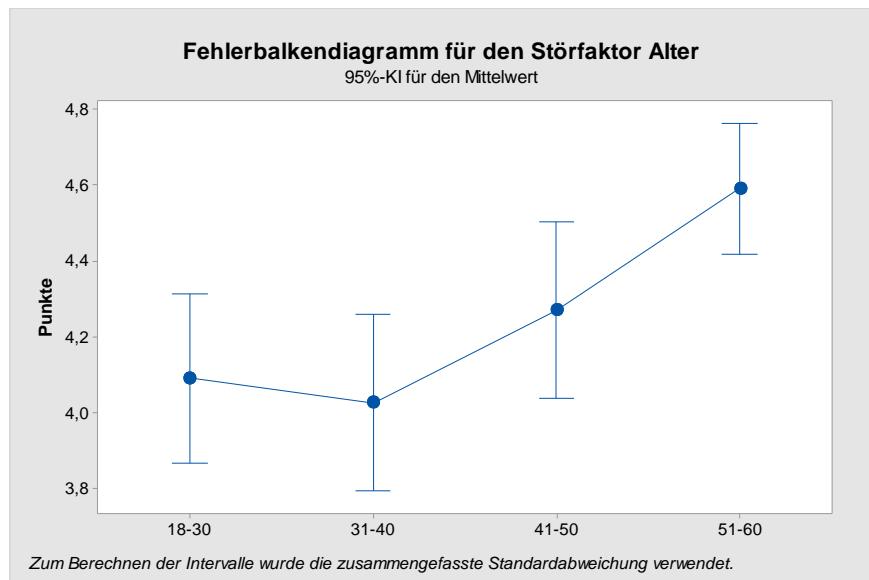


Abb. 4.34: Fehlerbalkendiagramm für die Stufen des Störfaktors Alter

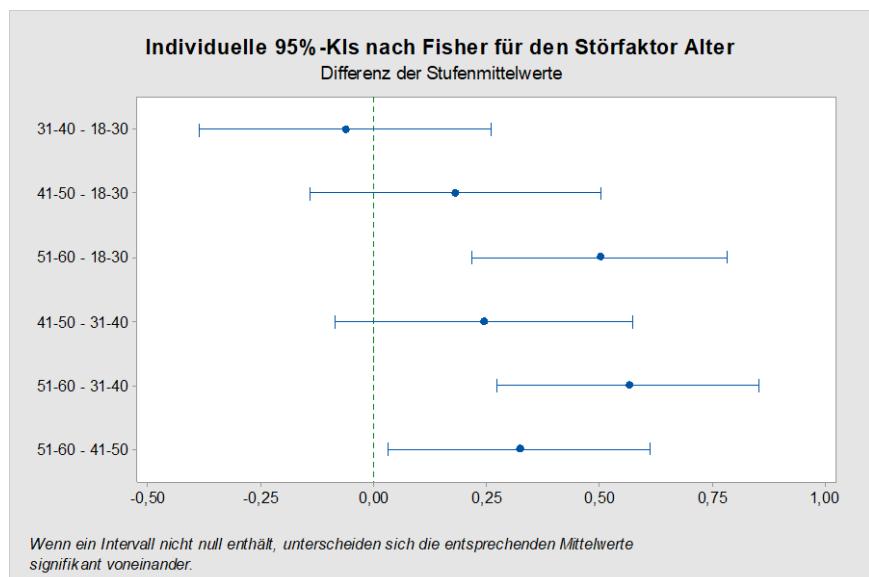
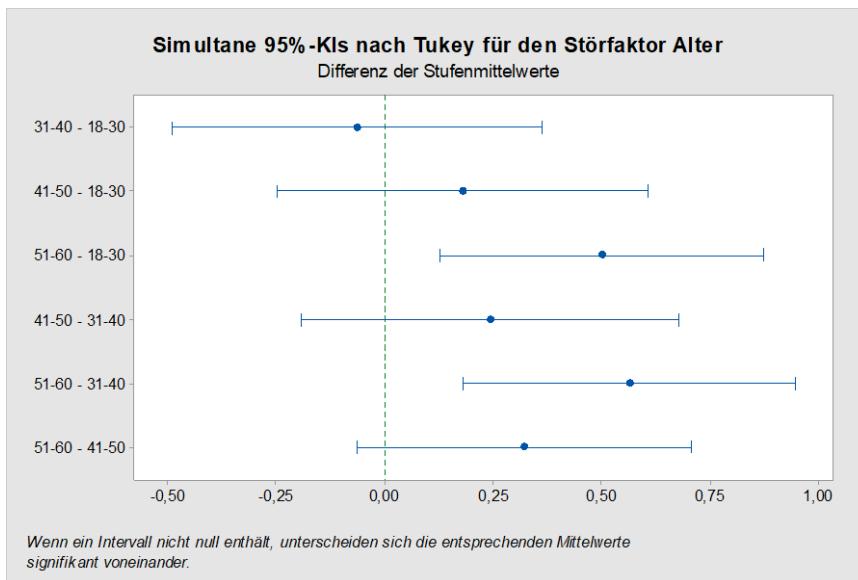


Abb. 4.35: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fisher für die Stufen des Störfaktors Alter



**Abb. 4.36: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des simultanen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey für die Stufen des Störfaktors Alter**

Damit bestätigt die ANOVA für den Störfaktor *Alter* die bereits in Tabelle 13 festgestellte Beobachtung, dass ältere Proband:innen die virtuelle Bildqualität des HUD tendenziell besser bewerten. Als Erklärung für diese Beobachtung könnte herangezogen werden, dass jüngere Proband:innen einen grundsätzlich höheren Anspruch bzgl. der virtuellen Bildqualität besitzen als ältere Proband:innen. Grund hierfür könnte sein, dass jüngere Proband:innen durch die häufigere Nutzung digitaler Medien und einer entsprechenden Affinität zu diesen, grundsätzliche höhere Bildqualitäten digitaler Medien gewöhnt sind und diese auch erwarten. Zudem ist davon auszugehen, dass die jüngeren Proband:innen eine höhere Sehkraft als die älteren Proband:innen besitzen und daher sensibler gegenüber Abbildungsfehlern sind. Letzteres kann daher auch eine Erklärung für die tendenziell bessere Bewertung der virtuellen Bildqualität durch Proband:innen sein, welche eine *Sehhilfe* verwenden. Mit steigendem Alter lässt die Sehkraft nach, wodurch die Verwendung von Sehhilfen zunimmt. Diese Annahme ist auch für das vorliegende Probandenkollektiv gültig. Während bei den jüngeren Proband:innen (*18 – 40 Jahre*) nur 35 % eine Sehhilfe verwenden, liegt dieser Wert bei den älteren Proband:innen (*41 – 60 Jahre*) bei 74 %. Auch wenn es sich hierbei um zwei unabhängige Störfaktoren handelt (*Alter* und *Sehhilfe*), kann eine Korrelation angenommen werden.

Da statistisch signifikante Einflüsse einzelner Faktorstufen auf die wahrgenommene Bildqualität bestehen, müssen diese in der weiteren Analyse berücksichtigt werden. Über die grundsätzliche Randomisierung der Versuchssubjekte (Proband:innen) bzgl. der Versuchsobjekte (WSS) hat keine gezielt gleichmäßige Aufteilung der Proband:innen nach *Alter* oder *Sehhilfe* stattgefunden. Bei den nun festgestellten signifikanten Einflüssen des *Alters*

und der *Sehhilfe* kann es bei ungleichmäßiger Aufteilung der Faktorstufen auf die Versuchsstoffe zu einer ungewollten Verzerrung der Studienergebnisse kommen. Aus diesem Grund ist in Tabelle 15 die jeweilige Anzahl der Proband:innen je WSS anhand der Faktorstufen aufgeschlüsselt.

**Tabelle 15: Anzahl Proband:innen je WSS anhand der Faktorstufen für Alter und Sehhilfe**

		WSS A	WSS B	WSS C
<i>Alter</i>	18 - 30	5	3	4
	31 - 40	4	5	2
	41 - 50	2	6	3
	51 - 60	7	4	9
<i>Sehhilfe</i>	Ja	10	9	12
	Nein	8	9	6

Für WSS A und WSS B sind die Verteilungen zwischen jungen und älteren Proband:innen sowie mit und ohne Sehhilfe ausreichend balanciert. Dahingegen ist bei WSS C die Anzahl älterer Proband:innen sowie Proband:innen mit Sehhilfe doppelt so hoch als die Anzahl jüngerer Proband:innen oder Proband:innen ohne Sehhilfe. Daher ist zu erwarten, dass WSS C im Durchschnitt tendenziell etwas bessere Bewertungen erhalten hat, als wenn auch hier eine balancierte Verteilung der signifikanten Faktoren vorgelegen hätte.

Der Mittelwertunterschied über alle WSS liegt zwischen jüngeren und älteren Proband:innen bei 0,37 Punkten und bei Proband:innen mit und ohne Sehhilfe bei 0,34 Punkten. Für WSS C haben jeweils doppelt so viele ältere als jüngere Proband:innen bzw. doppelt so viele Proband:innen mit als ohne Sehhilfe Bewertungen abgegeben. Daraus lässt sich lediglich eine theoretische überproportional positive Bewertung der virtuellen Bildqualität von ca. 0,18 Punkten ableiten. Diese theoretisch überproportional positive Bewertung wird in den nachfolgenden Analysen berücksichtigt, allerdings nur dann explizit genannt, wenn sie die Analyseergebnisse beeinflusst.

Schlussendlich sind die festgestellten Einflüsse der Störfaktoren im nachfolgenden Abschnitt 4.3.3, bei der statistischen Analyse der subjektiven Bewertung der virtuellen Bildqualität anhand der WSS, weitestgehend zu vernachlässigen. Für alle anderen Störfaktoren sind keine statistisch signifikanten Einflüsse nachweisbar. Nach erfolgter Analyse der Störfaktoren kann

folgend die statistische Analyse der Antwortvariablen (subjektive Bewertung der Bildqualität) in Abhängigkeit der unabhängigen Variablen (WSS A, B und C) beginnen.

### 4.3.3. Analyse der subjektiven Bewertung unterschiedlicher Windschutzscheiben

In diesem Abschnitt findet zunächst die quantitative statistische Analyse der Untersuchungshypothesen *H1*, *H3* und *H4* unter Anwendung einfaktorieller Varianzanalysen statt. Anschließend erfolgt die qualitative Analyse der Probandenstudie unter Berücksichtigung der Kommentare der Proband:innen.

#### 4.3.3.1. Quantitative Analyse

##### ANOVA zu Hypothese H1

Zu Beginn erfolgt die statistische Analyse zu *Hypothese H1*:

*Unterschiede in der Formgenauigkeit von Windschutzscheiben, und damit in ihrer Qualität, haben keinen Einfluss auf die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes.*

*Hypothese H1* stellt den Kern der Probandenstudie dar. Sie unterstreicht die Annahme, dass die Proband:innen die Qualität von WSS, bezogen auf die virtuelle Bildqualität eines HUD, analog zur Expertenuntersuchung bewerten. Die Proband:innen und Expert:innen haben dieselben WSS untersucht und bewertet. Die Expertenuntersuchung (siehe Abschnitt 4.2.2) ergab zwei Feststellungen.

1. Es sind eindeutige Unterschiede in den virtuellen Bildqualitäten in Abhängigkeit der drei untersuchten WSS zu erkennen.
2. Die erkannten Unterschiede ermöglichen es, die drei untersuchten WSS als *nicht kundentauglich*, *bedingt kundentauglich* und *kundentauglich* zu kategorisieren.

Die Auswertung der allgemeinen Ergebnisse der Probandenstudie in Abschnitt 4.3.1 widerspricht bisher beiden Feststellungen der Expertenuntersuchung. Zum einen scheinen die Unterschiede in der Bewertung der virtuellen Bildqualität zwischen den durch die Proband:innen bewerteten WSS nur gering auszufallen. Folglich lässt sich zum anderen keine eindeutige Kategorisierung der WSS hinsichtlich der Kundentauglichkeit des jeweiligen virtuellen Bildes durchführen. Des Weiteren widerspricht das festgelegte Qualitätsranking der

Expert:innen dem Qualitätsranking der Proband:innen. Die Expert:innen und Proband:innen bewerten die WSS in absteigender Reihenfolge hinsichtlich virtueller Bildqualität wie folgt:

- |                |   |
|----------------|---|
| Expert:innen:  | 1. WSS C – 2. WSS A – 3. WSS B              |
| Proband:innen: | 1. WSS B – 2. WSS C – 3. WSS A <sup>1</sup> |

Folgend ist die einfache ANOVA zur statistischen Analyse von *Hypothese H1* beschrieben. Anhand der Feststellungen zu den allgemeinen Ergebnissen, sind keine signifikanten Unterschiede in den Bewertungen der drei WSS zu erwarten. Das beidseitig gewählte Konfidenzniveau der ANOVA beträgt 95 %. Die unabhängige Variable ist die jeweils bewertete WSS. Die Faktorstufen der unabhängigen Variable sind WSS A, WSS B und WSS C. Die abhängige Variable ist die durchschnittliche Punktbewertung der virtuellen Bildqualität durch die Proband:in. Jeweils 18 Proband:innen haben eine der drei WSS bewertet. Für die Untersuchung von *Hypothese H1* werden die Fragen 1 und 26 nicht berücksichtigt, da diese kaum Aussagekraft bzgl. der subjektiv wahrgenommenen Bildqualität besitzen. Für die Durchführung der ANOVA erfolgt die Annahme normalverteilter Daten sowie gleicher Varianzen. Die Prüfung auf Normalverteilung der Daten ist für WSS B und WSS C positiv, für WSS A negativ. Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, wird auch an dieser Stelle die Abweichung auf Normalverteilung akzeptiert. Die Prüfung auf gleiche Varianzen der drei WSS ist positiv. In Anhang LV sind die Wahrscheinlichkeitsnetze inkl. Ergebnisse des jeweiligen Anderson-Darling-Tests sowie der Test auf gleiche Varianzen dokumentiert. Beide Prüfungen berücksichtigen ebenfalls ein Konfidenzniveau von 95 %.

Die Auswertung der ANOVA für Hypothese *H1* erfolgt analog zur Auswertung der ANOVA für die Störfaktoren in Abschnitt 4.3.2. In Tabelle 16 sind auf der linken Seite die Mittelwerte, Standardabweichungen und Anzahl der Datenpunkte der unabhängigen Variable aufgelistet. Auf der rechten Seite finden sich die Ergebnisse der ANOVA für die Hypothese H1. Wie schon in Abschnitt 4.3.1 fällt bei Betrachtung der Mittelwerte auf, dass die Bewertungsunterschiede zwischen den WSS A, WSS B und WSS C nur gering ausfallen. Anhand des sehr hohen p-Wertes  $p = 0,668$  lässt sich die Nullhypothese  $H0_{ANOVA}$  eindeutig bestätigen. Entsprechend unterscheiden sich die Mittelwerte der verschiedenen WSS nicht statistisch signifikant

---

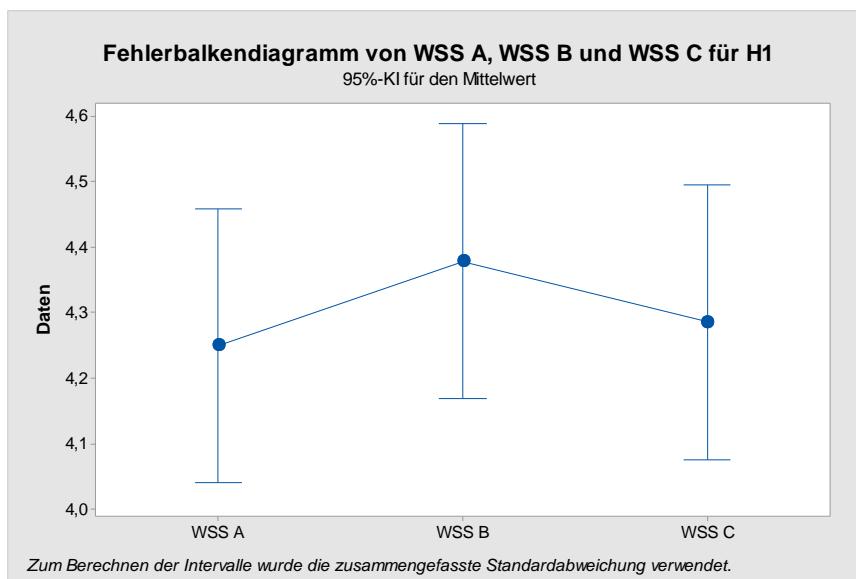
<sup>1</sup> Findet eine Bewertungskorrektur anhand der Störfaktorenanalyse Anwendung, lautet die Reihenfolge: 1. WSS B – 2. WSS A – 3. WSS C.

voneinander. Diese Annahme bestätigt sich durch den empirischen F-Wert  $F_{emp} = 0,41$ . Dieser ist eindeutig kleiner als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 3,18$ .

**Tabelle 16: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H1**

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
WSS A	18	4,249	0,484	(4,039; 4,458)	Faktor	2	0,41	0,668
WSS B	18	4,3778	0,3452	(4,1683; 4,5872)	Fehler	51		
WSS C	18	4,284	0,484	(4,075; 4,494)	Gesamt	53		

In Abb. 4.37 ist das 95 % Konfidenzintervall als standardisiertes Fehlerbalkendiagramm dargestellt. Das Fehlerbalkendiagramm veranschaulicht das Ergebnis unterschiedlicher Mittelwerte der verschiedenen Faktorstufen für die unabhängige Variable. Das deutliche Überlappen der Konfidenzintervalle unterstreicht die Feststellung fehlender statistischer Signifikanz hinsichtlich Unterschieden der Mittelwerte von WSS A, WSS B und WSS C. In Anhang LV sind zusätzlich die 95 % Konfidenzintervalle als simultan ermitteltes Konfidenzintervall nach Tukey bzw. individuell ermitteltes Konfidenzintervall nach Fisher dargestellt. Die Vergleichsverfahren nach Tukey und Fisher bestätigen die Annahme von Hypothese H1. Auch eine Korrektur der Punktebewertungen von WSS C nach Feststellung potentiell überdurchschnittlich positiver Bewertung um 0,18 Punkte liefert die gleichen Ergebnisse (siehe Abschnitt 4.3.2).



**Abb. 4.37: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die Stufen WSS A, WSS B und WSS C der unabhängigen Variable von H1**

Wie erwartet kann damit keine Feststellung signifikanter Unterschiede in den Bewertungen der drei WSS durch die Proband:innen erfolgen und Hypothese H1 wird bestätigt.

## **ANOVA zu Hypothese H3**

Als nächstes erfolgt die statistische Analyse der *Hypothese H3*:

*Alle Bereiche innerhalb eines virtuellen Bildes einer Windschutzscheibe werden in gleicher Qualität wahrgenommen.*

Die Ergebnisbetrachtung bzgl. Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität in unterschiedlichen Bildbereichen in Abschnitt 4.3.1 weist darauf hin, dass Hypothese H3 abzulehnen ist. Für WSS A fällt sowohl die Quadrantenbewertung bei dynamisch horizontaler Kopfbewegung als auch die Zeilenbewertung bei statischer Kopfposition am unterschiedlichsten aus. Daher soll die statistische Analyse von Hypothese H3 zunächst anhand dieser Bewertungen von WSS A für verschiedene Bildbereiche erfolgen. Falls für diese Bewertungstypen verschiedener Bildbereiche ein statistisch signifikanter Unterschied vorliegt, erfolgt die Untersuchung weiterer Bewertungstypen und WSS.

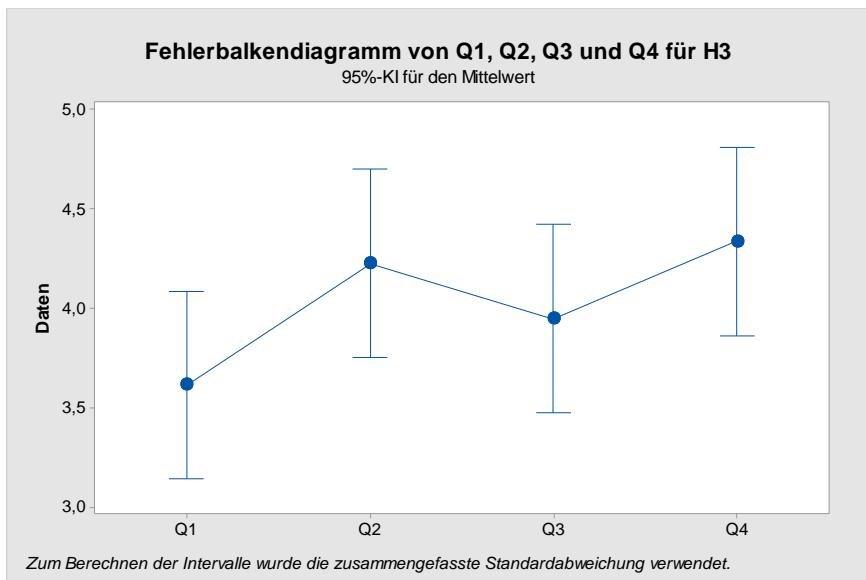
Im ersten Schritt erfolgt die Untersuchung der *Quadrantenbefragung* bei dynamisch horizontaler Kopfbewegung für WSS A. Das beidseitig gewählte Konfidenzniveau der ANOVA für Hypothese H3 beträgt 95 %. Die unabhängige Variable ist der Bildbereich einer WSS. Die abhängige Variable ist die durchschnittliche Punktbewertung der virtuellen Bildqualität durch die Proband:in. Insgesamt haben 18 Proband:innen WSS A und damit die vier zu untersuchenden Bildbereiche Q1 – Q4 bewertet. Da alle Proband:innen alle Faktorstufen der unabhängigen Variable, also alle vier Bildbereiche, bewertet haben, handelt es sich im Gegensatz zur gesamten Probandenstudie nicht um ein *Between-Subjects-Design* sondern ein *Within-Subjects-Design* (vgl. Abschnitt 4.2.5). Für die Untersuchung von *Hypothese H3* anhand der Quadrantenbefragung werden ausschließlich die Fragen 11.1 – 11.4 sowie 19.1 – 19.4 herangezogen, da diese die Bewertung der vier Bildbereiche Q1 – Q4 bei dynamisch horizontaler Kopfbewegung abbilden. Für die Durchführung der ANOVA erfolgt die Annahme normalverteilter Daten sowie gleicher Varianzen. Die Prüfung auf Normalverteilung der Daten ist nur für den Bildbereich Q1 positiv, für die Bereiche Q2 bis Q4 negativ. Die Abweichung auf Normalverteilung wird ebenso wie in den vorangegangenen Auswertungen akzeptiert. Die Prüfung auf gleiche Varianzen der vier Bildbereiche ist positiv. In Anhang LV sind die Wahrscheinlichkeitsnetze inkl. Ergebnisse des jeweiligen Anderson-Darling-Tests sowie der Test auf gleiche Varianzen dokumentiert. Die Prüfungen berücksichtigen ein Konfidenzniveau von 95 %.

Die Auswertung der ANOVA für Hypothese  $H3$  anhand der Quadrantenbefragung erfolgt analog zu den Auswertungen der vorangegangen ANOVAs. In Tabelle 17 sind auf der linken Seite die Mittelwerte, Standardabweichungen und Anzahl der Datenpunkte der unabhängigen Variable aufgelistet. Auf der rechten Seite finden sich die Ergebnisse der ANOVA für Hypothese  $H3$ . Wie schon in Abschnitt 4.3.1 fällt bei Betrachtung der Mittelwerte auf, dass die Bewertungsunterschiede zwischen den Bildbereichen deutlich ausfallen. Dennoch bestätigt der p-Wert  $p = 0,147$  unerwartet die Nullhypothese  $H0_{ANOVA}$  von Hypothese  $H3$ . Entsprechend unterscheiden sich die Mittelwerte der verschiedenen Bildbereiche Q1 – Q4 nicht statistisch signifikant voneinander. Diese Annahme bestätigt sich durch den empirischen F-Wert  $F_{emp} = 1,85$ . Dieser ist kleiner als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 2,74$ .

**Tabelle 17: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H3 anhand der Quadrantenbefragung**

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
Q1	18	3,611	1,243	(3,138; 4,084)	Faktor	3	1,85	0,147
Q2	18	4,222	1,003	(3,749; 4,695)	Fehler	68		
Q3	18	3,944	0,938	(3,471; 4,418)	Gesamt	71		
Q4	18	4,333	0,786	(3,860; 4,807)				

In Abb. 4.38 ist das 95 % Konfidenzintervall als standardisiertes Fehlerbalkendiagramm dargestellt. Das Überlappen der Konfidenzintervalle bestätigt die Feststellung fehlender statistischer Signifikanz hinsichtlich Unterschieden der Mittelwerte von Q1 bis Q4. Entgegen der Annahme auf Basis der allgemeinen Ergebnisbetrachtung in Abschnitt 4.3.1, nehmen die Proband:innen keine statistisch signifikanten Qualitätsunterschiede innerhalb des virtuellen Bildes einer WSS wahr.



**Abb. 4.38: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die Stufen Q1, Q2, Q3 und Q4 der unabhängigen Variable von Hypothese H3**

In Anhang LV sind zusätzlich die 95 % Konfidenzintervalle als simultan ermitteltes Konfidenzintervall nach Tukey bzw. individuell ermitteltes Konfidenzintervall nach Fisher dargestellt. Die Vergleichsverfahren nach Tukey und Fisher bestätigen die Annahme von Hypothese H3 im weitesten Maße. Ausnahme bildet das individuell ermittelte Konfidenzintervall nach Fischer für die Mittelwertsunterschiede zwischen Q1 und Q4. Die statistische Verfahrensweise zur Feststellung signifikanter Mittelwertsunterschiede nach Fischer weißt in diesem Fall einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen Q1 und Q4 mit einem p-Wert  $p = 0,035$  auf (siehe Abb. A - 32). Dieses Ergebnis weist zumindest in Teilen darauf hin, dass Proband:innen unterschiedliche Qualitäten innerhalb des virtuellen Bildes wahrnehmen. Da WSS B und WSS C kleinere Mittelwertsunterschiede als WSS A aufweisen, erfolgt keine weitere Untersuchung hinsichtlich unterschiedlich wahrgenommener Qualitäten zwischen den vier Bildbereichen Q1 – Q4. Entsprechend sind auch für die WSS B und WSS C keine statistischen Signifikanzen hinsichtlich Hypothese H3 vorhanden.

Im zweiten Schritt folgt die Untersuchung der *Zeilenbefragung* bei statischer Kopfposition für WSS A. Die Untersuchung entspricht mit Ausnahme der abhängigen Variable der ANOVA zur Quadrantenbefragung. Die abhängige Variable ist in diesem Fall die durchschnittliche Punktbewertung der virtuellen Bildqualität durch die Proband:in der drei zu untersuchenden Bildbereiche Z1 – Z3. Für die Untersuchung von *Hypothese H3* anhand der Zeilenbefragung werden ausschließlich die Fragen 22.1 – 22.3 sowie 25.1 – 25.3 herangezogen, da diese die Bewertung der drei Bildbereiche Z1 – Z3 bei statischer Kopfposition abbilden. Für die Durchführung der ANOVA erfolgt die Annahme normalverteilter Daten sowie gleicher

Varianzen. Die Prüfung auf Normalverteilung der Daten ist nur für den Bildbereich Z1 positiv, für die Bereiche Z2 und Z3 negativ. Die Abweichung auf Normalverteilung wird ebenso wie in den vorangegangenen Auswertungen akzeptiert. Die Prüfung auf gleiche Varianzen der drei Bildbereiche ist positiv. In Anhang LV sind die Wahrscheinlichkeitsnetze inkl. Ergebnisse des jeweiligen Anderson-Darling-Tests sowie der Test auf gleiche Varianzen dokumentiert. Die Prüfungen berücksichtigen ein Konfidenzniveau von 95 %.

Die Auswertung der ANOVA für Hypothese  $H_3$  anhand der Zeilenbefragung erfolgt analog zu den Auswertungen der vorangegangen ANOVAs. In Tabelle 18 sind auf der linken Seite die Mittelwerte, Standardabweichungen und Anzahl der Datenpunkte der unabhängigen Variable aufgelistet. Auf der rechten Seite finden sich die Ergebnisse der ANOVA für Hypothese  $H_3$ . Wie schon in Abschnitt 4.3.1 fällt bei Betrachtung der Mittelwerte auf, dass die Bewertungsunterschiede zwischen den Bildbereichen deutlich ausfallen. In diesem Fall kommt es durch einen p-Wert  $p = 0,010$  zur Ablehnung der Nullhypothese  $H_0\text{ANOVA}$  von Hypothese  $H_3$ . Entsprechend unterscheiden sich die Mittelwerte der verschiedenen Bildbereiche Z1 – Z3 statistisch signifikant voneinander. Die Ablehnung bestätigt sich durch den empirischen F-Wert  $F_{emp} = 5,00$ . Dieser ist größer als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 3,18$ .

**Tabelle 18: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H3 anhand der Zeilenbefragung**

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
Z1	18	3,806	0,860	(3,467; 4,144)	Faktor	2	5,00	0,010
Z2	18	4,556	0,616	(4,217; 4,894)	Fehler	51		
Z3	18	4,250	0,647	(3,911; 4,589)	Gesamt	53		

In Abb. 4.39 ist das 95 % Konfidenzintervall als standardisiertes Fehlerbalkendiagramm dargestellt. Das Fehlerbalkendiagramm veranschaulicht das Ergebnis unterschiedlicher Mittelwerte zwischen den Bildbereichen Z1 und Z2. Im Gegensatz zur Quadrantenbefragung kann für die Zeilenbefragung ein statistisch signifikanter Einfluss der unabhängigen Variable festgestellt werden. Dies entspricht wiederum der Annahme auf Basis der allgemeinen Ergebnisbetrachtung in Abschnitt 4.3.1, wonach die Proband:innen statistisch signifikante Qualitätsunterschiede innerhalb des virtuellen Bildes einer WSS wahrnehmen.

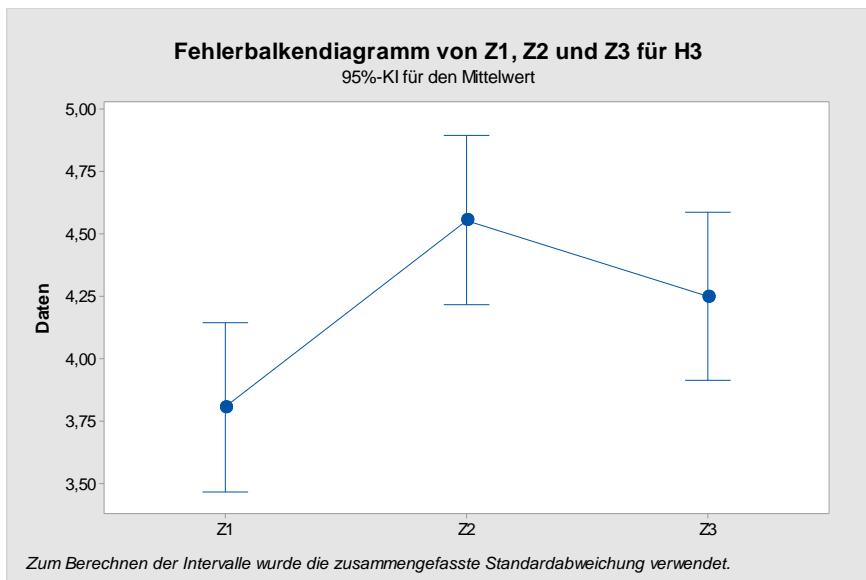


Abb. 4.39: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die Stufen Z1, Z2 und Z3 der unabhängigen Variable von H3

In Anhang LV sind zusätzlich die 95 % Konfidenzintervalle als simultan ermitteltes Konfidenzintervall nach Tukey bzw. individuell ermitteltes Konfidenzintervall nach Fisher dargestellt. Die Vergleichsverfahren nach Tukey und Fisher bestätigen die Ablehnung von Hypothese H3 anhand der Zeilenbefragung. Die statistische Verfahrensweise zur Feststellung signifikanter Mittelwertsunterschiede weißt nach beiden Verfahren einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen Z1 und Z2 (siehe Tabelle 59 und Tabelle 60 sowie Abb. A - 36 und Abb. A - 37) mit p-Werten  $p_{Fisher} = 0,003$  und  $p_{Tukey} = 0,008$  auf. Dieses Ergebnis bestätigt folglich, dass Proband:innen unterschiedliche Qualitäten innerhalb des virtuellen Bildes wahrnehmen. Die ANOVAs zur Hypothese H3 anhand der Zeilenbefragung für WSS B und WSS C liefern keine statistisch signifikanten Mittelwertunterschiede zwischen den drei Bildbereichen Z1, Z2 und Z3. Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, da die Mittelwertunterschiede zwischen den drei Bildbereichen der jeweiligen WSS  $\leq 0,44$  Punkte betragen. Diese sind damit kleiner oder gleich dem Mittelwertunterschied zwischen der Probandenbewertung für Z1 und Z3 von WSS A. Aus diesem Grund erfolgt keine weitere Untersuchung der WSS B und WSS C hinsichtlich unterschiedlich wahrgenommener Qualitäten zwischen den Bildbereichen der Zeilenbefragung.

Mit diesen Untersuchungen kann nur in einem Untersuchungsfall die Feststellung signifikanter Unterschiede in den Bewertungen der Bildbereiche von WSS A durch die Proband:innen erfolgen. Mit Ausnahme der ANOVA zur *Zeilenbefragung* bei statischer Kopfposition für WSS A wird Hypothese H3 damit immer bestätigt. Allerdings bestehen für alle durchgeführten Untersuchungen Hinweise und Tendenzen zu einer Ablehnung von Hypothese H3. Die nachgewiesene Signifikanz für Qualitätsunterschiede innerhalb eines virtuellen Bildes tritt bei

einer *statischen Kopfposition* auf. Das zeigt, dass nicht ausschließlich eine *dynamische Kopfbewegung* und eine entsprechend zu erwartende Verzerrung des virtuellen Bildes Grund für die schlechter wahrnehmende Qualität ist.

## **ANOVA zu Hypothese H4**

Im letzten Schritt der statistischen Analyse erfolgt die Untersuchung auf Signifikanz von *Hypothese H4*:

*Die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes ist unabhängig von einer statischen oder dynamischen Kopfposition.*

Die Ergebnisbetrachtung bzgl. Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität in Abhängigkeit einer statischen oder dynamischen Kopfposition in Abschnitt 4.3.1 weist darauf hin, dass Hypothese H4 abzulehnen ist. Die Bewertungskategorien mit dynamischen Kopfpositionen erhielten die schlechtesten Bewertungen der Proband:innen. Für alle drei WSS lagen die durchschnittlichen Bewertungen bei dynamischen Kopfpositionen unter vier Punkten (siehe Tabelle 9). Die Bewertungskategorie mit dynamischen Kopfpositionen findet ausschließlich bei den Bereichsvergleichen der Quadrantenbefragung Anwendung.

Alle WSS weisen Unterschiede zwischen ihrer Bewertung mit statischer oder dynamischer Kopfposition auf. Da sich die Bewertungen mit dynamisch horizontaler und dynamisch vertikaler Kopfposition voneinander unterscheiden erfolgt eine Unterteilung in die Kategorien *statische*, *dynamisch horizontale* und *dynamisch vertikale Kopfposition*. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Kategorien zu wahren, werden ausschließlich die Bewertungen der Quadrantenbefragung herangezogen. Auf diese Weise ist ein Vergleich der Kategorien mit den exakt selben Bildinhalten möglich. Folglich finden für die Untersuchung von *Hypothese H4* ausschließlich die Fragen 10.1 – 12.4 sowie 18.1 – 20.4 Verwendung. Dabei bilden die Fragen 10.1 – 10.4 und 18.1 – 18.4 die Datenbasis der *statischen Kopfposition*, die Fragen 11.1 – 11.4 und 19.1 – 19.4 die Datenbasis der *dynamisch horizontalen Kopfposition* sowie die Fragen 12.1 – 12.4 und 20.1 – 20.4 die Datenbasis der *dynamisch vertikalen Kopfposition*.

Die unabhängige Variable ist folglich die statische bzw. dynamische Kopfposition der Proband:in. Die Kategorien bilden dabei die Stufen der unabhängigen Variable. Die abhängige Variable ist die durchschnittliche Punktebewertung der virtuellen Bildqualität durch die Proband:in je zuvor beschriebener Stufe. Bspw. findet für die Stufe *dynamisch horizontale Kopfposition* die durchschnittliche Punktebewertung aus den Fragen 11.1 – 11.4 und 19.1 –

**19.4 Verwendung.** Da keine Unterscheidung zwischen den WSS stattfindet, erhält jede Stufe 54 Bewertungen durch die Proband:innen. Da alle Proband:innen alle Faktorstufen der unabhängigen Variable bewerten, also alle drei möglichen Kopfpositionen, handelt es sich im Gegensatz zur gesamten Probandenstudie nicht um ein *Between-Subjects-Design* sondern ein *Within-Subjects-Design* (analog zur statistischen Analyse von Hypothese H3). Die Antwortvariablen sind in Anhang LV dokumentiert.

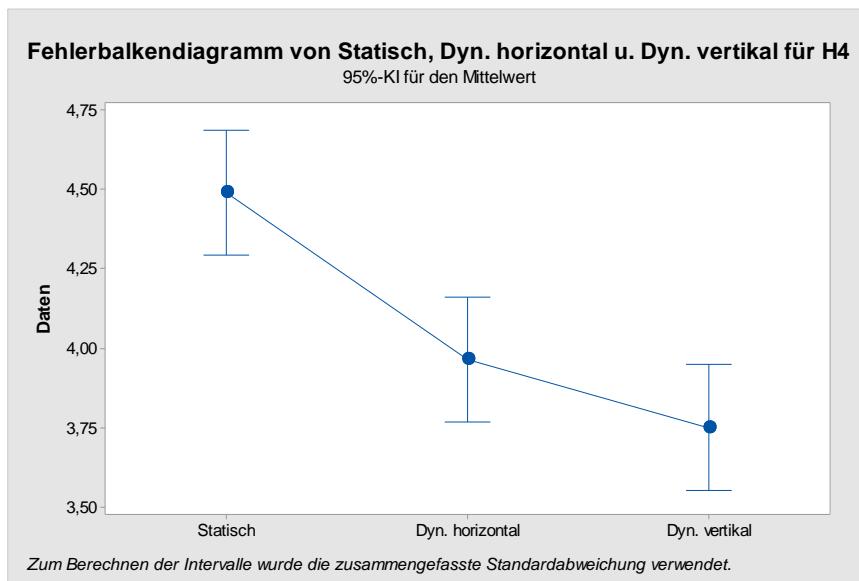
Das beidseitig gewählte Konfidenzniveau der ANOVA für Hypothese H4 beträgt 95 %. Für die Durchführung der ANOVA erfolgt die Annahme normalverteilter Daten sowie gleicher Varianzen. Die Prüfung auf Normalverteilung der Daten ist für alle drei Bewertungskategorien negativ. Die Abweichung auf Normalverteilung wird ebenso wie in den vorangegangenen Auswertungen akzeptiert. Die Prüfung auf gleiche Varianzen ist negativ, da sich die Varianz der statischen Kopfposition von den beiden Varianzen der dynamischen Kopfpositionen unterscheidet. In Anhang LV sind die Wahrscheinlichkeitsnetze inkl. Ergebnisse des jeweiligen Anderson-Darling-Tests sowie der Test auf gleiche Varianzen dokumentiert. Die Prüfungen berücksichtigen ein Konfidenzniveau von 95 %.

In Tabelle 19 sind auf der linken Seite die Mittelwerte, Standardabweichungen und Anzahl der Datenpunkte der unabhängigen Variable aufgelistet. Auf der rechten Seite finden sich die Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H4. Wie schon in Abschnitt 4.3.1 fällt bei Betrachtung der Mittelwerte auf, dass die Bewertungsunterschiede zwischen der statischen Kopfposition und den dynamischen Kopfpositionen deutlich ausfallen. Der niedrige p-Wert  $p = 0,000$  bestätigt die Ablehnung der Nullhypothese  $H0_{ANOVA}$  von Hypothese H4 eindeutig. Entsprechend unterscheiden sich die Mittelwerte der Bewertungskategorien statistisch signifikant voneinander. Diese Annahme bestätigt sich durch den empirischen F-Wert  $F_{emp} = 14,58$ . Dieser ist um ein Vielfaches höher als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 3,05$ . Damit kann Hypothese 4 wie erwartet abgelehnt werden.

**Tabelle 19: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H4**

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
Statisch	54	4,491	0,479	(4,294; 4,688)	Faktor	2	14,58	0,000
Dyn. horizontal	54	3,965	0,807	(3,768; 4,162)	Fehler	159		
Dyn. vertikal	54	3,750	0,856	(3,553; 3,947)	Gesamt	161		

In Abb. 4.40 ist das 95 % Konfidenzintervall als standardisiertes Fehlerbalkendiagramm dargestellt. Das Fehlerbalkendiagramm veranschaulicht das Ergebnis unterschiedlicher Mittelwerte für die statische bzw. dynamischen Kopfpositionen. Während sich die Konfidenzintervalle der dynamischen Kopfpositionen eindeutig gegenseitig enthalten, ist deutlich zu erkennen, dass dies für die statische Kopfposition nicht der Fall ist. Damit bestätigt das Fehlerbalkendiagramm die Feststellung eindeutig statistischer Signifikanz hinsichtlich Unterschieden der Mittelwerte für statische und dynamische Kopfpositionen über alle WSS hinweg. Gemäß der Annahme auf Basis der allgemeinen Ergebnisbetrachtung in Abschnitt 4.3.1, nehmen die Proband:innen statistisch signifikante Qualitätsunterschiede bei statischer oder dynamischer Kopfposition wahr.



**Abb. 4.40: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die Stufen Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal der unabhängigen Variable von H4**

In Anhang LV sind zusätzlich die 95 % Konfidenzintervalle als simultan ermitteltes Konfidenzintervall nach Tukey bzw. individuell ermitteltes Konfidenzintervall nach Fisher dargestellt. Die Vergleichsverfahren nach Tukey und Fisher bestätigen die Ablehnung von Hypothese H4.

Zum Abschluss von diesem Abschnitt 4.3.3.1 ist folgend eine Zusammenfassung der statistischen Analyse der Hypothesen *H1*, *H2* und *H3* auf Basis der quantitativen Bewertung der virtuellen Bildqualität in Abhängigkeit der untersuchten WSS beschrieben.

Die Annahme von Hypothese H1 bestätigt auch statistisch die allgemeine Ergebnisbetrachtung aus Abschnitt 4.3.1: die verschiedenen WSS haben keinen signifikanten Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität durch die Proband:innen. Diese Erkenntnis

steht im Widerspruch zu den antizipierten Ergebnissen auf Basis der Expertenbewertung in Abschnitt 4.2.2. Ein Grund für diese Diskrepanz könnte der Studienaufbau darstellen, da ein *Between-Subjects-Design* statt eines *Within-Subjects-Design* verwendet wurde. Eine Erkenntnis aus der Diskrepanz zwischen Probandenstudie und Expertenbewertung ist entsprechend, dass Unterschiede in der virtuellen Bildqualität eines HUD in Abhängigkeit der WSS nur dann zum Tragen kommen, wenn verschiedene WSS im direkten Vergleich bewertet werden können. Des Weiteren scheinen die Proband:innen vor allem eine homogene Bildqualität positiv wahrzunehmen. Die Expertenbewertung zeigt, dass WSS B nach Einschätzung der Expert:innen zwar die schlechteste aber gleichmäßigste virtuelle Bildqualität aufweist. Daraus lässt sich schließen, dass zukünftigen Kund:innen, mangels Vergleichsmöglichkeiten und Referenzqualität, primär eine homogene virtuelle Bildqualität wichtig ist. Zusätzlich ist nicht zu vernachlässigen, dass die Proband:innen einen Hang zur überproportional positiven Bewertung aufweisen könnten. Gründe hierfür sind, dass die Proband:innen noch kein vergleichbares HUD gesehen haben und daher fasziniert von der vorgestellten Technologie sind. Außerdem nehmen die Proband:innen freiwillig an der Studie Teil, erhalten eine monetäre Kompensation und sind entsprechend eher positiv ggü. dem Untersuchungsgestand eingestellt. Zuletzt kann auch eine Wahrnehmungsverzerrung auf Seiten der Expert:innen vorliegen, welche aufgrund Ihrer Expertise überproportional empfindlich ggü. Abbildungsfehlern sind.

Im Gegensatz dazu widerspricht die Annahme von Hypothese H3 der allgemeinen Ergebnisbetrachtung aus Abschnitt 4.3.1, dass die Proband:innen Qualitätsunterschiede innerhalb des virtuellen Bildes wahrnehmen. Es konnten zwar Tendenzen, aber keine statistisch signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Um die statistische Aussagekraft an dieser Stelle zu erhöhen könnte in zukünftigen Studien zum einen die Anzahl der Proband:innen und zum anderen die Detaillierung der Likert Skala erhöht werden. Vor allem die Ergänzung weiterer Bewertungsstufen der Likert Skala um weitere fünf Punkte auf insgesamt zehn Punkte würde den Proband:innen eine differenziertere Bewertung von Abbildungsfehlern ermöglichen.

Zuletzt ist die Ablehnung von Hypothese H4 erneut konform mit der allgemeinen Ergebnisbetrachtung aus Abschnitt 4.3.1: die Proband:innen nehmen statistisch signifikante Unterschiede in der Bildqualität bei statischer bzw. dynamischer Kopfposition wahr. Die eindeutig festgestellte Signifikanz zur Ablehnung von Hypothese H4 bestätigt den grundsätzlich sinnvollen und repräsentativen Aufbau und Ablauf der Studie.

Damit sind die statistischen Analysen zur Probandenstudie hinsichtlich des Einflusses der WSS auf die subjektiv wahrgenommene virtuelle Bildqualität eines HUD abgeschlossen. Während die statistischen Auswertungen der Hypothesen H1 und H4 die anfänglichen Annahmen der allgemeinen Ergebnisbetrachtung aus Abschnitt 4.3.1 bestätigen, ist dies für Hypothese H3 nicht der Fall.

#### **4.3.3.2. Qualitative Analyse**

In diesem Abschnitt erfolgt die Analyse der zusätzlichen allgemeinen Fragen zur Bewertung des Gesamtsystems AR HUD (G; F; N), sowie der freien qualitativen Kommentare der Proband:innen während der Studie. Zunächst findet die Betrachtung der allgemeinen Fragen zum gezeigten AR HUD System statt, beginnend mit den Aussagen G, F und N des Fragebogens:

- Aussage G: *Das AR HUD System hat mich begeistert.*
- Aussage F: *Ich würde ein solches System im Fahrzeug nutzen.*
- Aussage N: *Die Nutzung eines HUD finde ich sinnvoll.*

In Tabelle 20 sind die Bewertungen der Aussagen G, F, und N als Gesamtmittelwert und Mittelwert je WSS aufgelistet.

**Tabelle 20: Mittelwerte der allgemeinen Fragen für alle WSS sowie einzeln für WSS A, WSS B und WSS C**

Aussage	Alle WSS	WSS A	WSS B	WSS C
G: <i>Das AR HUD System hat mich begeistert.</i>	4,44	4,44	4,44	4,44
F: <i>Ich würde ein solches System im Fahrzeug nutzen.</i>	4,70	4,56	4,78	4,78
N: <i>Die Nutzung eines HUD finde ich sinnvoll.</i>	4,76	4,72	4,72	4,83

Die Proband:innen bewerten die Aussagen mit einem Gesamtmittelwert je Frage von  $\geq 4,44$  Punkten. Alle drei WSS erhalten ebenfalls Bewertungen  $\geq 4,44$  Punkten. Vor allem die hohen Bewertungen der Aussagen F und N zeigen, dass die Proband:innen die Nutzung eines HUD und auch eines AR HUD grundsätzlich stark befürworten. Die etwas schlechtere Bewertung der Aussage G im Vergleich dazu könnte darauf hinweisen, dass die Umsetzung des dargestellten AR HUD zwar positiv wahrgenommen wird aber noch Potential zur Verbesserung offenlässt. Dennoch ist die grundlegend positive Einstellung der Proband:innen eine Bestätigung hinsichtlich der Sinnhaftigkeit und Akzeptanz des Einsatzes eines AR HUD im Fahrzeug.

Neben der Beantwortung der Fragen des Interviewers wurden die Proband:innen explizit aufgefordert Ihre Eindrücke in Worten wiederzugeben und auf Auffälligkeiten in der subjektiven Wahrnehmung hinzuweisen. Diese Vorgehensweise soll den eingeschränkten Rahmen durch die vorgegebenen Fragen ausweiten und möglicherweise störende aber außer Acht gelassene Abbildungsfehler untersuchen.

Die Proband:innen haben die Möglichkeit zur freien Kommentierung der subjektiv wahrgenommenen Bildqualität mit insgesamt 159 Kommentaren häufig genutzt. Die Proband:innen äußerten sowohl positive als auch negative Kommentare. Davon weisen 103 Kommentare explizit auf die negative Wahrnehmung von Abbildungsfehlern hin. Folgend sind die genannten Abbildungsfehler der Proband:innen in absteigender Häufigkeit aufgelistet:

1. Verzerrung
2. Unschärfe
3. Verschwommenheit
4. Unangenehme Wahrnehmung
5. Anstrengende Wahrnehmung

Das sehr explizite und häufige Hinweisen auf negativ wahrgenommene Abbildungsfehler durch die Proband:innen steht im Widerspruch zu den durchschnittlich sehr guten Bewertungen der untersuchten WSS. Die Art und Anzahl der Kommentare zeigt, dass die Proband:innen durchaus Abbildungsfehler wahrnehmen und diese auch als störend empfinden. Trotzdem fällt die Punktebewertung sehr hoch aus.

Darüber hinaus beschreiben die Proband:innen in Ihren Kommentaren sehr genau in welchen Bildbereichen die Abbildungsfehler auftreten und entsprechend stören. Beispielhafte Kommentare lauten wie folgt:

- „Unten rechts gibt es eine Verzerrung des Bildes. In diesem Bereich schweift das Bild nach unten weg. Die Verzerrung ist deutlich zu erkennen und stört.“
- „Die obere Zeile ist ggü. dem restlichen Text deutlich unschärfer und dadurch schwerer zu Lesen.“
- „Die unteren Zeilen sind unangenehm wahrnehmbar. In diesem Bereich ist ein Flimmern bzw. eine Verschwommenheit wahrzunehmen. Das Lesen des Textes ist dadurch anstrengend.“

Die Beispiele verdeutlichen die Präzision der Proband:innen bei der Beschreibung wahrgenommener Abbildungsfehler. Nur in wenigen Fällen bemängeln die Proband:innen das gesamte virtuelle Bild. Folglich steht diese Erkenntnis im Widerspruch zur Annahme der Hypothese H3 im vorangegangenen Abschnitt, wonach keine statistische Signifikanz hinsichtlich Qualitätsunterschieden innerhalb des virtuellen Bildes wahrzunehmen ist. Die qualitativen Kommentare weisen sehr stark darauf hin, dass unterschiedliche Qualitäten innerhalb des virtuellen Bildes wahrgenommen werden. Trotz der fehlenden statistischen Signifikanz bestärkt diese Erkenntnis die festgestellte Tendenz zur Ablehnung von Hypothese H3 in Abschnitt 4.3.3.1.

Bei Zuordnung der negativen Kommentare hinsichtlich virtueller Bildqualität zu den einzelnen WSS fällt zudem auf, dass die Anzahl für WSS C deutlich geringer ist als für WSS A und WSS B. Folgend ist die Anzahl negativer Kommentare je WSS aufgelistet:

- WSS A: 44 negative Kommentare
- WSS B: 40 negative Kommentare
- WSS C: 19 negative Kommentare

Auf Basis dieser Kommentare ergibt sich ein neues Ranking der untersuchten WSS. WSS C erhält weniger als die Hälfte negativer Kommentare verglichen zu WSS A und WSS B. WSS A und WSS B liegen auf einem ähnlichen Niveau. Bzgl. der qualitativen Analyse erhält WSS C damit mit deutlichem Abstand die beste Bewertung in Form der wenigsten negativen Kommentare. Der deutliche Unterschied zwischen WSS C sowie den WSS A und WSS B widerspricht der statistischen Untersuchung von Hypothese H1. Anhand der quantitativen Punktbewertung ist keine statistische Signifikanz hinsichtlich der virtuellen Bildqualität in Abhängigkeit der untersuchten WSS festzustellen. Die qualitativen Bewertungen der Proband:innen weisen allerdings auf einen eindeutigen Unterschied hin. Diese Feststellung passt zur Einordnung der Expert:innen, wonach WSS C eine *grüne Bewertung* erhält. Allerdings stimmt das Ranking anhand der Anzahl qualitativer Kommentare zu WSS A und WSS B nicht mit der Expertenbewertung überein. Folglich ist keine Korrelation und damit auch keine Kausalität zwischen der qualitativen Bewertung der Proband:innen und der Expert:innen zu erkennen.

Damit steht die qualitative Bewertung im Widerspruch zur quantitativen statistischen Bewertung und teilweise auch zu der Expertenbewertung. Die fehlende Korrelation zwischen den Bewertungen weist darauf hin, dass ein Unterschied zwischen der Verwendung des *Within-*

oder *Between-Subjects-Design* bestehen könnte. Können die virtuellen Bilder mehrerer WSS begutachtet werden, ergibt sich eine andere Bewertung der jeweiligen Qualität, als bei Begutachtung von lediglich einer einzigen WSS. Dies zeichnet sich durch die verschiedenen Rankings der untersuchten WSS in den verschiedenen Bewertungen aus. Demnach sollte in zukünftigen Studien ein *Within-Subjects-Design* verwendet werden oder zumindest eine Referenz für die virtuelle Bildqualität zur Verfügung stehen. Des Weiteren kann die Untersuchung der qualitativen Kommentare aufzeigen, dass die Proband:innen trotz guter Punktebewertung Abbildungsfehler wahrnehmen, welche störend und unangenehm sind. Daher ist nicht auszuschließen, dass zukünftige Nutzer:innen des AR HUD gewisse Abbildungsfehler subjektiv wahrnehmen und diese als störend empfinden.

Das AR HUD findet bei Mercedes-Benz zunächst nur Verwendung im Oberklassesegment. Störende Abbildungsfehler sind in dieser Fahrzeugklasse nicht akzeptabel. Zudem erfolgt in dieser Fahrzeugklasse der Einsatz von 3D- und OLED-Displays höchster Auflösung im automobilen Bereich.<sup>2</sup> Ein zu großer Qualitätsabfall von Kombi- und Zentraldisplay zum AR HUD ist daher zu vermeiden.

Basierend auf dem Vergleich zwischen quantitativer und qualitativer Bewertung der Proband:innen sowie der Expertenbewertung soll abschließend eine erneute Einordnung der verwendeten Likert Skala erfolgen. Hintergrund ist die Feststellung explizit störender Abbildungsfehler bei gleichzeitiger hoher Punktebewertung der virtuellen Bildqualität. Entsprechend können auch bei hohen Punktzahlen bereits störende Abbildungsfehler auftreten. Die Einordnung verbindet die durchschnittlichen Punktebewertungen mit den definierten Kategorien hinsichtlich Kundentauglichkeit:

- 5 bis 4,5 Punkte entspricht einer *grünen Bewertung* (Kundentauglich)
- 4,5 bis 3,5 Punkte entspricht einer *gelben Bewertung* (bedingt Kundentauglich)
- Kleiner 3,5 Punkte entspricht einer *roten Bewertung* (nicht Kundentauglich)

Wie zu Beginn von Abschnitt 4.3.1 beschrieben haben die Proband:innen die virtuelle Bildqualität insgesamt 478 Mal mit 3 Punkten oder weniger bewertet. Diese Bewertungen entsprechen nach der neuen Einordnung der Punkte hinsichtlich Kundentauglichkeit einer *nicht Kundentauglichen* virtuellen Bildqualität und bestätigen die in Abschnitt 4.2.4 festgelegte

---

<sup>2</sup> Die Displays standen aus Gründen der Geheimhaltung nicht für die Probandenstudie zur Verfügung.

Einordnung der Punktebewertung. Die Anzahl der Bewertungen mit  $\leq 3$  Punkten entsprechen ca. 18 % der angegebenen Bewertungen. In Tabelle 21 ist die Aufteilung der Bewertungen mit  $\leq 3$  Punkten aufgelistet:

**Tabelle 21: Anzahl der Bewertungen  $\leq 3$  Punkte für WSS A, WSS B und WSS C**

Punktzahl	WSS A	WSS B	WSS C
3 Punkte	96	113	108
2 Punkte	39	57	34
1 Punkt	20	14	4
<b>Summe</b>	<b>155</b>	<b>184</b>	<b>146</b>

Ein Ranking der WSS basierend auf Tabelle 21 entspricht dem Ranking der Expertenbewertung. Am besten schneidet WSS C mit den wenigsten Bewertungen  $\leq 3$  Punkten ab, gefolgt von WSS A und zuletzt WSS B. Noch deutlicher wird diese Betrachtung, wenn nur Bewertungen  $\leq 2$  Punkten herangezogen werden. Trotz dieser scheinbaren Korrelation für diesen Betrachtungsfall, kann keine eindeutige Kausalität der Zusammenhänge festgestellt werden. Diese Betrachtung weist lediglich darauf hin, dass WSS B die meisten schlechten Punktebewertungen erhält und daher die meisten störenden Abbildungsfehler erzeugt.

Im nachfolgenden Abschnitt 4.3.4 erfolgt zuletzt die Untersuchung von Hypothese H2. Darin findet die Korrelationsanalyse zwischen der bisher analysierten subjektiven Bewertung der Proband:innen mit den IQN Messwerten Behandlung.

#### 4.3.4. Korrelationsanalyse zwischen subjektiver Bewertung und Image Quality Numbers

In diesem Abschnitt soll eine mögliche Korrelation der zuvor untersuchten subjektiven Bewertung der Proband:innen mit den gemessenen IQN stattfinden. Entsprechend spiegelt dieser Abschnitt die Untersuchung der *Hypothese H2* wieder:

*Die Qualitätskennzahlen des virtuellen Bildes, die IQN, stehen im Einklang mit der subjektiv wahrgenommenen Qualität.*

Wie in Abschnitt 4.2.1 unter *Integration eines Messsystems in den Versuchsträger* beschrieben ist, werden für die Korrelationsanalyse die Messwerte des HUD Prüfstands herangezogen. Grund hierfür ist zum einen, dass die IQN Messwerte des Prüfstands genauer sind, da die

Messmittelfähigkeit des HUD Prüfstands besser ist als die des Versuchsträgers. Zum anderen sollen lediglich die Qualitätsunterschiede der WSS in die Korrelationsanalyse einfließen und nicht die Verbautoleranzen der Komponenten im Versuchsträger. Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen IQN ist im Theorienteil unter Abschnitt 2.4 zu finden.

Im ersten Schritt erfolgt die grundsätzliche Betrachtung der IQN für die drei untersuchten WSS. Wie in Abschnitt 4.2.5 unter *Ablauf* beschrieben, muss ein Abgleich zwischen der Kopf- bzw. Augposition der Proband:innen sowie der Kameraposition des Messsystems stattfinden. Hintergrund dieses Abgleichs ist, dass sich in Abhängigkeit der vertikalen Augposition einer Proband:in der verwendete Reflektionsbereich einer WSS verändert und entsprechend verschiedene Bildqualitäten auftreten können. Die Dokumentation der Augpositionen der Proband:innen erfolgt jeweils durch den Interviewer zu Beginn der Befragung, nachdem die Proband:innen eine geeignete Sitzposition eingerichtet haben. Die dokumentierten Augpositionen erhalten auf der vertikalen Skala die Werte *E* bis *J*. Diese entsprechen den mittleren und unteren Kamerapositionen *C0*, *C3* und *C4*. Entsprechend befanden sich die Augpositionen der Proband:innen eher im unteren Bereich der HMB. Da 67 % der erfassten Augpositionen in vertikaler Richtung der Kameraposition *C3* zuzuordnen sind, sollen die IQN dieser Kamerareihe für die weitere Analyse herangezogen werden. Grund hierfür ist vor allem, dass bei Berücksichtigung aller Kamerapositionen 1400 Messwerte je WSS zur Verfügung stehen und hier schon vorab eine Einschränkung stattfinden muss. In Abb. 4.41 ist die gesamte HMB dargestellt. Darin sind die durch die Proband:innen hauptsächlich verwendeten Kamerapositionen grau hinterlegt. In grün markiert sind die nun zu betrachtenden Kamerapositionen der Kamerareihe *C3* zu finden.

	L8	L7	C2	R7	R9
	L5	L4	C1	R4	R6
	L2	L1	C0	R1	R3
	L11	L10	C3	R10	R12
	L14	L13	C4	R13	R15

**Abb. 4.41: Head-Motion-Box mit Kamerapositionen des HUD Prüfstands inkl. Abgleich zu den Augpositionen der Proband:innen**

In Tabelle 22 sind die IQN Messergebnisse für WSS A, WSS B und WSS C aufgetragen. Die aufgelisteten Messwerte sind als Mittelwert der Kamerareihe *C3* zu verstehen und enthalten

entsprechend die Kamerapositionen *L11*, *L10*, *C3*, *R10* und *R12*. Die Messwerte sind dabei nicht als absolute Zahlen, sondern als prozentuale Angaben dargestellt. Die Messwerte sind im Verhältnis zu ihrer verbrauchten Toleranz abgebildet. Ein Messwert von bspw. 0,32 mit einer Toleranz von 0,64 würde in der Tabelle mit 50 % dargestellt, da er die Hälfte seiner zur Verfügung stehenden Toleranz benötigt. Hätte derselbe Messwert von 0,32 eine Toleranz von 0,08 würde er in der Tabelle mit 400 % dargestellt werden.

**Tabelle 22: Prozentuale Abweichung zum Toleranzgrenzwert je IQN für WSS A, WSS B und WSS C**

		IQN													
		1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	3.1	3.2		
WSS															
		A	105%	270%	13%	13%	654%	913%	895%	678%	298%	723%	103%	35%	4701%
		B	73%	314%	21%	7%	996%	620%	689%	603%	250%	595%	259%	83%	4509%
		C	180%	307%	14%	16%	710%	1107%	868%	702%	274%	601%	136%	44%	4959%
		IQN													
		4.1	4.2	4.3	4.4	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6				
WSS															
		A	614%	1371%	43%	34%	232%	1097%	1429%	546%	657%	2498%			8521%
		B	613%	1097%	25%	25%	186%	933%	866%	343%	720%	2422%			7231%
		C	601%	1142%	35%	31%	197%	1410%	1383%	548%	748%	3165%			9258%

Außerdem findet in Tabelle 22 eine Unterscheidung zwischen statischen und dynamischen Abbildungsfehlern statt. In die Betrachtung der statischen Abbildungsfehler fließen die IQN 1.3 bis 3.2 ein. IQN 1.1 und 1.2 finden keine Berücksichtigung, da diese ausschließlich die gemittelte Position des virtuellen Bildes beurteilen, welche in den Fragestellungen und damit den Bewertungen der Proband:innen keine Rolle spielt. In der letzten Spalte ist die prozentuale Abweichung je WSS aufsummiert. Auf diese Weise ist eine Gesamtbewertung je WSS anhand der IQN möglich. Je höher dieser Wert ausfällt, desto schlechter ist die virtuelle Bildqualität einer WSS zu erwarten. Zusätzlich erhalten die Messwerte farbliche Markierungen. Die Färbung der einzelnen Zellen entspricht folgendem Schema:

- *Bis 80 %* der Toleranz: *grüne* Färbung
- *80 – 120 %* der Toleranz: *gelbe* Färbung
- *120 – 200 %* der Toleranz: *hellorange* Färbung
- *200 – 500 %* der Toleranz: *dunkelorange* Färbung
- *Größer 500 %* der Toleranz: *rote* Färbung

Anhand dieser Aufbereitung der Messdaten erfolgt eine erste Untersuchung möglicher Korrelationen mit der Probandenstudie. Bei oberflächlicher Betrachtung von Tabelle 22 fällt

auf, dass sich die farblichen Schemata der verschiedenen WSS bis auf wenige Ausnahmen gleichen. Diese Beobachtung unterstützt die Annahme von Hypothese H1 wonach kein signifikanter Unterschied zwischen den WSS festzustellen ist. Bei genauerer Betrachtung ist allerdings auffällig, dass bei manchen IQN die Unterschiede zwischen den IQN sehr groß sind. Bspw. ist die prozentuale Abweichung bei IQN 1.3 für WSS C mehr als doppelt so hoch im Vergleich zu WSS B. Auch bei IQN mit generell sehr hohen Abweichungen, wie bspw. IQN 2.2, treten prozentuale Abweichungen von bis zu 500 % zwischen den WSS auf.

Bildet man ein Ranking anhand der *Summe prozentualer Abweichungen* in der letzten Spalte schneidet WSS B immer am besten ab, gefolgt von WSS A und zuletzt WSS C. Dieses Ranking entspricht dem Ergebnis der Probandenstudie.<sup>3</sup> Für die statischen Abbildungsfehler schneidet WSS B um 4 % besser als WSS A und um 9 % besser als WSS C ab. Dieser Vergleich fällt für die dynamischen Abbildungsfehler noch deutlicher aus. Hier schneidet WSS B um 15 % besser als WSS A und um 22 % besser als WSS C ab. Auch bei der Aufteilung der summierten prozentualen Abweichungen nach den verschiedenen IQN Kategorien erreicht WSS B immer das beste Ergebnis. Ausnahme bilden lediglich die IQN 3.1 und 3.2 mit der horizontalen und vertikalen Divergenz. Hier schneidet WSS B mit deutlichem Abstand am schlechtesten ab.

Zuletzt können die WSS für jede IQN gerankt werden. Über die *Summe der einzelnen Rankings je IQN* entsteht analog der Summe prozentualer Abweichungen ein Gesamtranking. Desto weniger *Punkte* eine WSS auf diese Weise erhält, desto besser scheint ihre virtuelle Bildqualität zu sein. Auch nach dieser Bewertungsgrundlage erhält WSS B die beste Bewertung, gefolgt von WSS A und WSS C. Folgend sind in Tabelle 23 die Rankings je WSS nach eben beschriebener Methode aufgelistet.

**Tabelle 23: Anzahl der Rankings je WSS**

Rank	WSS A	WSS B	WSS C
1. Rank	6	15	1
2. Rank	7	2	13
3. Rank	9	5	8
<b>Summe</b>	<b>47</b>	<b>34</b>	<b>51</b>

---

<sup>3</sup> Unter Berücksichtigung der Punktekorrektur für WSS C; siehe Abschnitt 4.3.2.

Die Analyse der IQN lässt auf eine Korrelation zwischen den Messwerten und der subjektiven Bewertung durch die Proband:innen und damit auf die Annahme von Hypothese H2 schließen. Dafür sprechen die Auswertungen anhand der *Summe prozentualer Abweichungen* sowie der *Summe der einzelnen Rankings je IQN*. Entsprechend steht die scheinbare Korrelation zwischen IQN und Probandenstudie im Widerspruch zur Expertenbewertung und den qualitativen Kommentaren der Proband:innen, welche ein anderes Ranking der untersuchten WSS ergeben.

Die Beurteilung von Qualitätsunterschieden innerhalb des virtuellen Bildes ist anhand der IQN 2.X möglich, welche die Abbildungsfehler als Standardabweichungen der Bildpunkte des Testbildes wiedergeben. Außerdem ermöglichen die IQN 4.X Maximalwertanalysen, welche die größte Abweichung benachbarter Bildpunkte beschreiben. Die bestehenden IQN ermöglichen auf diese Weise eine erste Einschätzung hinsichtlich der grundsätzlichen Streuung der virtuellen Bildqualität und lokal auftretenden maximalen Abweichungen. Die Messwerte der IQN 2.X sowie 4.1 und 4.2 fallen im Verhältnis zu den aktuell gültigen Toleranzgrenzwerten sehr hoch aus. Da im Vergleich hierzu die Messwerte für die IQN 4.3 und 4.4 überraschenderweise sehr gering ausfallen und deutlich innerhalb der Toleranzgrenzen liegen, ist eine Überprüfung der hierfür gültigen Toleranzgrenzwerte nötig. Trotz der Annahme von Hypothese H3, bestätigen die hohen Messwerte der IQN die festgestellten Tendenzen der statistischen Analyse sowie die vielen qualitativen Kommentare der Proband:innen hinsichtlich Qualitätsunterschieden innerhalb des virtuellen Bildes. Wie zuvor erläutert, erhält WSS B am häufigsten die beste Bewertung anhand der Rankings je IQN. Dies ist auch für die IQN 2.X und 4.X der Fall. Diese Beobachtung widerspricht wiederum der qualitativen Bewertung der Proband:innen, wonach WSS B die meisten negativen Kommentare hinsichtlich lokalen Abbildungsfehlern erhält. Ein Grund hierfür könnte die virtuelle Bildgröße des AR HUD sein, welche 77 Zoll beträgt. Möglicherweise bleiben lokale Abbildungsfehler in den Berechnungen für die IQN unauffällig, da der Betrachtungsraum, also das virtuelle Bild, zu groß ist. Für jedes Testbild erfolgt die Auswertung von 231 Bildpunkten. Eventuell gehen Abweichungen daher im statistischen Rauschen unter. Dies könnte eine Erklärung sein, warum die Proband:innen die virtuelle Bildqualität als allgemein gut bewerten aber dennoch häufig lokal störende Abbildungsfehler bemängeln.

Die statistische Analyse der Hypothese H4 ergab für dynamische Kopfpositionen eine signifikant schlechter wahrgenommene virtuelle Bildqualität durch die Proband:innen. Die IQN 5.X sind die entsprechenden Messwerte zur Bewertung des virtuellen Bildes bei dynamischer Kopfposition. Vergleicht man die prozentualen Abweichungen der IQN 5.X mit ihren jeweils

statischen Pendants<sup>4</sup> ist festzustellen, dass diese im Durchschnitt deutlich höher ausfallen. Diese Beobachtung bestätigt die Ablehnung von Hypothese H4 und damit die in der Probandenstudie als schlechter wahrgenommen festgestellte virtuelle Bildqualität bei dynamischer Kopfposition. Eine Ausnahme bilden an dieser Stelle lediglich die IQN 5.1 und 5.4. Die Belastbarkeit dieser Feststellung ist daher nur bedingt gegeben. Die größte Verschlechterung zwischen statischer und dynamischer Betrachtung des virtuellen Bildes tritt für die Divergenzen auf. Während die statischen Divergenzen IQN 3.1 und 3.2 zum großen Teil noch innerhalb oder recht nah an den Toleranzgrenzwerten liegen, liegen die dynamischen Divergenzen IQN 5.5 und 5.6 mindestens um das 6-fache, bis hin zum 31-fachen, außerhalb ihrer Grenzwerte. Eine tiefere Analyse der horizontalen und vertikalen Divergenzen scheint an dieser Stelle sinnvoll, da vor allem diese zu einer *unangenehmen* Wahrnehmung des virtuellen Bildes führen können und daher unbedingt zu vermeiden sind. Die Analyse der Divergenzen ist im folgenden Abschnitt 4.4 zu finden.

Des Weiteren ist grundsätzlich auffällig, wie deutlich die IQN die Toleranzgrenzwerte übersteigen. Häufig überschreiten die Messwerte ihre Toleranzen um mehr als das zehnfache und wie eben beschrieben in wenigen Fällen sogar um das zwanzig- bis dreißigfache. Diese Feststellung steht im absoluten Widerspruch mit der generell positiven und guten Bewertung der Proband:innen. Eine Erklärung hierfür könnten für einige IQN deutlich zu niedrig angesetzte Toleranzgrenzwerte sein. Aus diesem Grund sind alle WSS anhand der IQN als *nicht kundentauglich* kategorisiert, obwohl sie von den Proband:innen gute Bewertungen erhalten. Daher muss zukünftig eine neue Festlegung der Toleranzgrenzwerte für die IQN stattfinden. Folglich sind die vorausgehenden Analysen auf Basis der IQN Messwerte in diesem Abschnitt nur unter Vorbehalt gültig. Ein weiterer Grund für das deutliche Überschreiten der IQN Toleranzgrenzwerte könnten Berechnungs- oder Messfehler der IQN sein. Diese Möglichkeit kann durch Kontrollmessungen ausgeschlossen werden. Entsprechende Kontrollmessungen am Mercedes-Benz HUD Entwicklungsprüfstand und am HUD Prüfstand des Windschutzscheibenlieferanten bestätigen die Messergebnisse der IQN. Zuletzt besteht die Möglichkeit, dass die IQN die subjektive Wahrnehmung nicht im angenommenen Maße wiedergeben. Die Gründe hierfür wurden zuvor erläutert.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass bestimmte Zusammenhänge zwischen den IQN und der Probandenstudie bestehen und damit entsprechend auf die Annahme von

---

<sup>4</sup> Für weitere Details siehe Abschnitt 2.4.4.

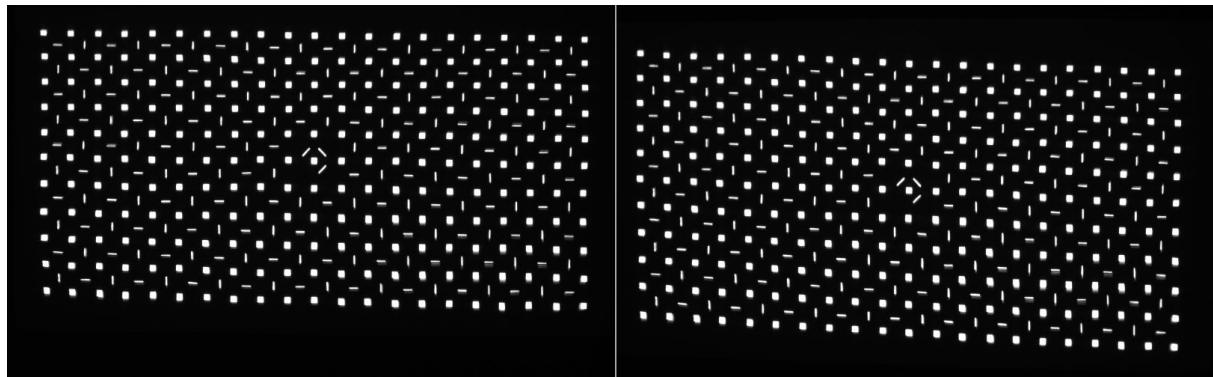
Hypothese H2 deuten. Diese müssen aber in weiteren Untersuchungen zwingend verifiziert werden. Eine schnelle und einfache Beurteilung der WSS anhand der IQN ist nicht ohne weiteres möglich. Grund hierfür ist vor allem die Vielzahl an Messwerten für die virtuelle Bildqualität mit 1400 Messwerten je WSS. Um zukünftig auch in kurzer Zeit eine Gesamteinschätzung für die virtuelle Bildqualität einer WSS geben zu können, kann bspw. der Ansatz der *Summe prozentualer Abweichungen* verwendet werden. Eine Aufteilung in die drei Kategorien statische und dynamische Abbildungsfehler sowie Divergenzen scheint an dieser Stelle sinnvoll zu sein. Dabei müssen auch die restlichen Kamerapositionen berücksichtigt werden. Dieser Ansatz ist in Zukunft tiefer zu untersuchen.

Allerdings ist es nicht möglich die explizit genannten störenden Abbildungsfehler in verschiedenen Bereichen des virtuellen Bildes anhand der IQN zu erkennen. Aus diesem Grund findet nachfolgend eine detaillierte Analyse der Testbilder statt. Diese soll Aufschluss über die subjektiv lokal wahrgenommenen Abbildungsfehler geben und Basis für weitere Qualitätskennzahlen sein.

#### **4.4. Analyse der Topographie von Testbildern**

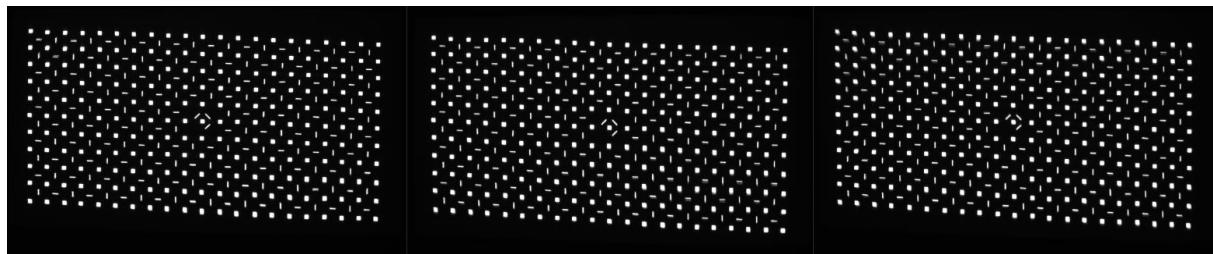
Die vorausgehende Analyse im vorigen Abschnitt zeigt, dass zwischen den subjektiven Bewertungen der Proband:innen und den Messergebnissen der IQN in einigen Punkten eine Korrelation vorliegen könnte. Tendenziell scheinen die IQN die statistischen Analysen der aufgestellten Hypothesen zu bestätigen und weisen somit auf die Annahme von Hypothese H2 hin. Noch nicht geklärt ist allerdings die Diskrepanz in der Bewertung der WSS zwischen Probandenstudie und Expertenbewertung. Zudem ist es nicht möglich die explizit als störend aufgezählten Abbildungsfehler der Proband:innen in Form von qualitativen Kommentaren den IQN zuzuordnen. Die Proband:innen nehmen Qualitätsunterschiede innerhalb eines virtuellen Bildes wahr. Die Algorithmen der IQN decken diese Qualitätsunterschiede innerhalb des virtuellen Bildes nur über Standardabweichungen und Maximalwertbetrachtungen über das gesamte virtuelle Bild hinweg ab. Daher soll in diesem Abschnitt eine tiefergehende Analyse der Testbilder selbst stattfinden. Grundlage hierfür bilden in diesem Fall die am Versuchsträger aufgenommenen Testbilder der untersuchten WSS. Grund hierfür ist, dass nicht die exakten IQN der einzelnen WSS, sondern die tatsächlichen am Versuchsträger wahrgenommenen Abbildungsfehler mit den Bewertungen der Proband:innen zusammengeführt werden sollen. Abb. 4.42 zeigt den Unterschied zwischen den Testbildern des HUD Prüfstands (links) sowie des Versuchsträgers (rechts) für WSS C aus derselben Kameraposition C3. Abb. 4.42

verdeutlicht den Einfluss der Verbautoleranzen der optischen Komponenten im Versuchsträger auf die virtuelle Bildqualität.



**Abb. 4.42:** Testbildaufnahmen vom HUD Prüfstand (links) und Versuchsträger (rechts) von WSS C jeweils aus Kameraposition C3

In Abb. 4.43 sind die am Versuchsträger fotografierten Testbilder aus Kameraposition C3 für WSS A (links), WSS B (mittig) und WSS C (rechts) zu sehen. Trotz der unterschiedlichen IQN der WSS gleichen die Testbildaufnahmen einander und verdeutlichen zusätzlich den großen Einfluss der Lagetoleranzen auf die virtuelle Bildqualität.



**Abb. 4.43:** Testbildaufnahmen vom Versuchsträger aus Kameraposition C3 für WSS A (links), WSS B (mittig) und WSS C (rechts)

Entsprechend liegt der Fokus auf der Untersuchung der einzelnen Bildpunkte und deren Lage zueinander. Dabei erfolgt die Betrachtung der Bildpunkte zwischen Soll- und Ist-Lage sowohl innerhalb eines Bildes sowie zwischen den Bildern verschiedener Kopfpositionen. Diese als Topographieanalyse bezeichnete Untersuchung soll Grundlage für die eventuelle Weiterentwicklung der IQN bilden.

In Tabelle 24 sind beispielhaft die horizontalen, vertikalen und vektoriellen Abweichungen der 231 Messpunkte des Testbilds von WSS C abgebildet. Die Abweichungen betragen jeweils den Abstand zwischen Soll- und Ist-Punkt in horizontaler und vertikaler Richtung, sowie den Vektor der beiden Abweichungen. Die Abweichungen ergeben sich über die gemessenen Y- und Z-Fahrzeugkoordinaten der einzelnen Bildpunkte des Testbildes (siehe Abschnitt 2.3.3). Jede Zelle entspricht damit einem Bildpunkt des Testbildes.

# Einfluss der Windschutzscheibe auf die subjektive Wahrnehmung eines AR HUD

**Tabelle 24: Abweichung zwischen Soll- und Ist-Punkt in horizontaler, vertikaler und vektorieller Richtung für das Testbild von WSS C in Kameraposition C3**

## Delta Horizontal

$\Delta Y$	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21
H1	-68	-74	-75	-77	-79	-81	-84	-82	-86	-88	-91	-93	-95	-96	-99	-102	-107	-106	-110	-110	-115
H2	-68	-73	-75	-77	-78	-80	-82	-81	-85	-88	-92	-94	-95	-96	-98	-102	-107	-107	-110	-110	-115
H3	-68	-73	-75	-78	-77	-80	-79	-80	-84	-88	-92	-94	-94	-95	-98	-102	-107	-107	-110	-111	-115
H4	-68	-72	-75	-77	-77	-79	-78	-80	-85	-88	-92	-92	-94	-95	-100	-102	-107	-106	-109	-111	-114
H5	-66	-71	-72	-77	-77	-79	-78	-81	-85	-88	-92	-91	-93	-95	-100	-101	-106	-106	-110	-112	-116
H6	-64	-70	-72	-76	-76	-78	-78	-81	-85	-86	-91	-90	-94	-95	-98	-101	-105	-106	-110	-112	-117
H7	-64	-67	-68	-73	-74	-77	-79	-81	-83	-86	-90	-90	-94	-94	-97	-100	-104	-106	-111	-114	-118
H8	-60	-64	-67	-70	-72	-77	-79	-81	-83	-84	-88	-89	-93	-93	-96	-99	-104	-107	-112	-115	-118
H9	-58	-61	-64	-68	-69	-75	-77	-79	-82	-83	-88	-88	-93	-92	-96	-99	-104	-107	-112	-116	-117
H10	-55	-59	-62	-67	-66	-73	-75	-77	-82	-82	-87	-86	-92	-91	-96	-98	-105	-108	-112	-115	-119
H11	-52	-56	-58	-65	-65	-70	-72	-75	-81	-81	-85	-85	-91	-90	-95	-98	-105	-107	-112	-114	-119

## Delta Vertikal

$\Delta Z$	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21
H1	-118	-122	-125	-126	-126	-127	-129	-133	-136	-140	-142	-144	-147	-149	-152	-154	-155	-158	-160	-162	-164
H2	-108	-110	-111	-113	-115	-118	-121	-125	-128	-132	-134	-137	-138	-140	-142	-143	-145	-147	-150	-152	-154
H3	-100	-101	-103	-105	-108	-111	-113	-116	-118	-120	-122	-125	-127	-129	-132	-134	-137	-139	-142	-146	-150
H4	-93	-94	-96	-98	-101	-104	-106	-110	-111	-113	-117	-120	-123	-126	-129	-131	-132	-135	-139	-144	-148
H5	-84	-87	-90	-93	-96	-98	-101	-104	-106	-109	-109	-112	-116	-120	-124	-127	-131	-134	-139	-143	-146
H6	-78	-82	-86	-90	-94	-98	-100	-102	-104	-105	-108	-110	-112	-116	-120	-125	-130	-135	-138	-141	-142
H7	-74	-80	-86	-91	-95	-99	-101	-103	-106	-107	-111	-114	-118	-122	-126	-130	-134	-139	-141	-144	-145
H8	-73	-79	-84	-89	-93	-97	-101	-105	-108	-111	-115	-119	-123	-129	-132	-135	-138	-141	-143	-148	-151
H9	-72	-76	-81	-85	-91	-97	-103	-108	-113	-118	-122	-125	-129	-132	-135	-137	-141	-144	-146	-152	-158
H10	-68	-75	-81	-87	-92	-97	-103	-108	-113	-117	-122	-126	-129	-135	-138	-143	-145	-147	-149	-153	-157
H11	-73	-78	-83	-88	-94	-99	-104	-109	-112	-117	-122	-128	-132	-139	-142	-145	-150	-152	-155	-158	-161

## Delta Vektoriell

$\Delta D$	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21
H1	136	143	146	148	149	151	154	156	161	165	169	172	175	178	182	185	188	190	194	196	200
H2	128	132	134	137	139	142	146	149	153	159	163	166	167	169	172	176	180	182	186	188	192
H3	121	125	127	131	133	136	138	141	145	149	153	156	158	160	164	168	173	176	179	183	189
H4	115	118	122	125	127	130	132	136	140	143	149	151	155	158	163	166	170	172	177	181	187
H5	107	112	115	121	123	126	128	131	135	139	142	145	149	153	159	162	169	171	177	181	187
H6	101	108	112	117	120	125	127	130	134	136	141	143	146	150	155	160	167	171	177	180	184
H7	97	104	110	116	121	125	129	131	135	137	143	145	151	154	159	164	170	175	180	184	187
H8	95	102	108	113	118	124	128	132	136	139	145	149	155	159	163	167	173	177	182	187	192
H9	92	98	103	109	114	123	129	134	140	144	150	153	159	161	166	169	175	179	185	191	196
H10	87	96	102	109	114	121	127	133	139	143	150	153	159	163	168	173	179	182	186	191	197
H11	89	96	101	109	114	122	127	132	139	142	149	154	161	165	171	175	183	186	191	195	200

Die Abweichungen sind in Millimetern angegeben und im tatsächlichen virtuellen Bild mit Annahme einer Bildentfernung von zehn Metern gemessen. In der Mitte der drei Tabellen für die horizontale, vertikale und vektorielle Abweichung ist jeweils in Rot der mittlere Punkt des Testbildes markiert.

Über die Visualisierung von Soll- und Ist-Punkten erhält man Abb. 4.44, welche in *grün* das Soll-Bild und in *rot* das Ist-Bild darstellt. Das Verbinden der einzelnen Bildpunkte ergibt das Testbild basierend auf den gemessenen Koordinaten der Bildpunkte. Vergleicht man die Darstellung des roten Ist-Bildes mit dem tatsächlichen Testbild der WSS C aus Abb. 4.42 (rechts), ist zu erkennen, dass sich die Bilder gleichen. Die Visualisierung bestätigt darüber hinaus die Werte der Abweichungen aus Tabelle 24. Es spiegelt sich die grundsätzliche Verschiebung des virtuellen Bildes nach links in negative Y-Richtung des Fahrzeugkoordinatensystems wieder. Außerdem ist erkennbar, dass der rechte Teil des virtuellen Bildes weiter nach links verschoben ist als der linke Teil des Bildes. Entsprechend liegt eine horizontale Stauchung des virtuellen Bildes vor. In vertikaler Richtung ist das virtuelle Bild insgesamt nach unten in negative Z-Richtung verschoben. Es lässt sich ebenfalls eine Stauchung des virtuellen Bildes beobachten, allerdings nur im linken Bildbereich, da der linke obere Bildbereich stärker nach unten verschoben ist, als der linke untere Bildbereich. Die Rotation des virtuellen Bildes, welche sich durch eine generell tiefer liegende rechte Bildseite ergibt, wird dadurch im unteren Bildbereich zusätzlich verstärkt. Auf diese Weise visualisiert Abb. 4.44 die Verzerrungen der monoskopischen Abbildungsfehler des virtuellen Bildes.

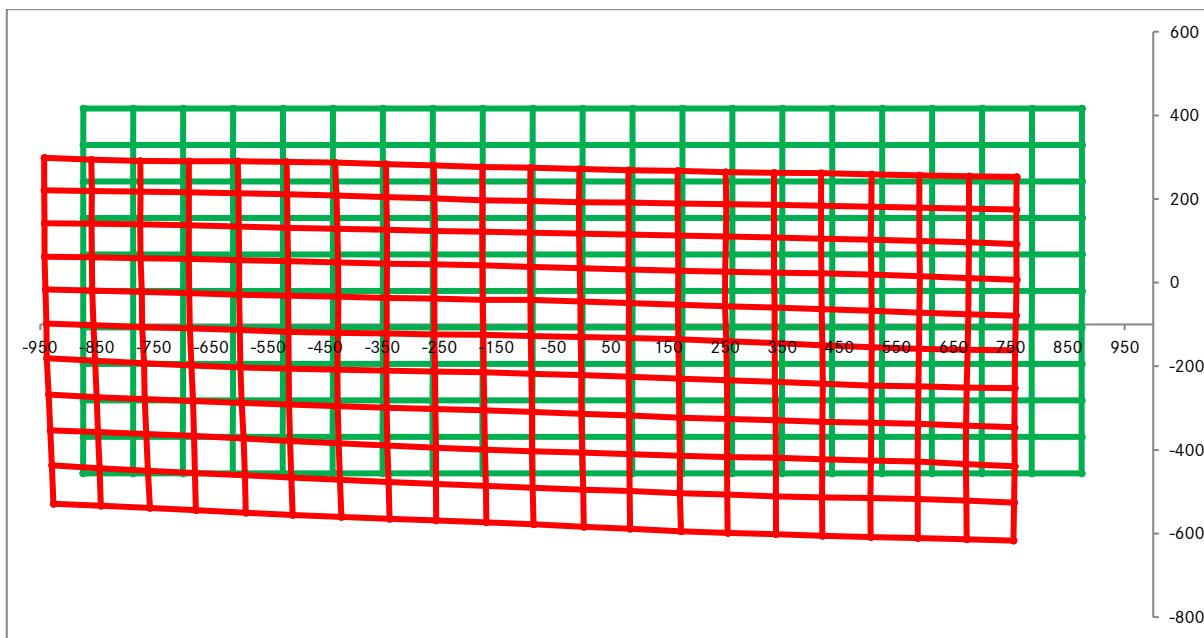


Abb. 4.44: Visualisierung der gemessenen Soll- und Ist-Punkten für WSS C in Kameraposition C3

Zusätzlich ist in Tabelle 25 am Beispiel der horizontalen Abweichung die normalisierte Abweichung der Bildpunkte zueinander dargestellt. Um die normalisierte Abweichung zu erheben, wird der Mittelpunkt des virtuellen Bildes genullt. Dies geschieht über die Differenz der Abweichung des mittleren Bildpunktes mit der jeweils zu berechnenden Abweichung eines jeden Bildpunktes. Anhand der nach außen hin steigenden Werte sowie des Vorzeichenwechsels zwischen linker und rechter Seite der Tabelle zeigt sich, dass die horizontale Bildstauchung im gesamten virtuellen Bild vorliegt. Außerdem findet eine bedingte Formatierung Anwendung. Sind die Zellen grün besteht nur eine geringe Abweichung zwischen dem jeweiligen Bildpunkt sowie dem normalisierten genullten Mittelpunkt des Testbilds. Eine rote Färbung gibt an, dass die Abweichung groß ist. Die bedingte Formatierung in Tabelle 25 verdeutlicht zudem die höhere Zunahme der horizontalen Stauchung im linken unteren Bildbereich und ist damit ebenfalls eine Möglichkeit zur Visualisierung der monoskopischen Abbildungsfehler. Die gleiche Darstellung ist ebenfalls für vertikale Abweichungen möglich.

**Tabelle 25: Normalisierte horizontale Abweichung um den Mittelpunkt des virtuellen Bildes für WSS C in Kameraposition C3**

**Normalisiertes Delta Horizontal**

AY	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21
H1	22	17	16	13	11	9	7	9	5	3	-1	-2	-4	-5	-9	-11	-16	-15	-19	-20	-24
H2	22	18	16	13	13	10	9	10	6	3	-1	-3	-4	-5	-7	-11	-16	-16	-19	-20	-24
H3	23	18	16	13	13	11	11	10	7	2	-2	-3	-4	-4	-8	-11	-16	-17	-19	-20	-24
H4	23	18	16	13	14	12	12	11	6	3	-1	-2	-4	-4	-9	-11	-16	-16	-18	-20	-24
H5	25	19	18	14	14	12	13	10	6	3	-1	-1	-3	-4	-9	-10	-15	-15	-19	-21	-25
H6	26	21	19	15	15	13	12	10	6	4	0	0	-3	-4	-7	-10	-14	-15	-19	-22	-26
H7	27	24	22	18	17	13	11	10	7	5	1	1	-3	-3	-6	-9	-13	-15	-21	-23	-27
H8	30	27	24	21	19	14	12	10	8	6	2	1	-3	-2	-5	-8	-14	-16	-21	-24	-27
H9	33	29	26	22	22	16	13	11	9	8	3	3	-2	-1	-6	-8	-14	-16	-22	-25	-26
H10	36	32	29	24	24	18	16	14	9	9	4	5	-1	-1	-5	-8	-14	-17	-22	-24	-28
H11	39	34	33	26	26	21	18	15	10	10	5	6	-1	1	-5	-7	-14	-16	-21	-23	-29

Nach selbigem Prinzip lassen sich ebenfalls stereoskopische Abbildungsfehler, also horizontale und vertikale Divergenzen, darstellen und analysieren. Im Gegensatz zu den monoskopischen Abbildungsfehlern gibt es für die stereoskopischen Abbildungsfehler keine IQN zur Feststellung möglicher lokaler Divergenzen. Vor allem die Analyse der vertikalen Divergenzen zeigt mögliche Korrelationen mit den Bewertungen der Proband:innen. Aus diesem Grund findet zuletzt die Untersuchung der vertikalen Divergenzen statt.

In Tabelle 26 sind die vertikalen Divergenzen der einzelnen Bildpunkte zu finden. Wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben berechnet sich die vertikale Divergenz über die Differenz der vertikalen Bildpositionen eines Augpaars in Z-Richtung des Fahrzeugkoordinatensystems. Das in der Tabelle abgebildete Augpaar entspricht den Kamerapositionen *L10* und *R10*. Die Annahme des normierten Augabstands beträgt 65 mm. Entsprechend sind in Tabelle 26 die vertikalen Differenzen eines jeden Bildpunktes zwischen den beiden Testbildern aus L10 und R10 für WSS C dokumentiert. Die Tabelle bildet damit die durch das menschliche visuelle System auszugleichenden Differenzen zwischen den wahrgenommenen virtuellen Bildern des linken und rechten Auges ab.

**Tabelle 26: Vertikale Divergenz zwischen den Bildpunkten der virtuellen Bilder der Kamerapositionen L10 und R10**

**Vertikale Divergenz**

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21
H1	-8	-9	-11	-11	-12	-10	-8	-6	-5	-4	-2	-4	-4	-5	-4	-2	-2	-1	0	1	3
H2	-10	-10	-9	-9	-7	-6	-4	-2	-2	-4	-5	-6	-6	-6	-5	-4	-2	0	1	3	4
H3	-11	-11	-11	-9	-8	-6	-6	-5	-5	-5	-5	-4	-5	-3	-2	0	1	2	4	5	5
H4	-11	-11	-10	-10	-9	-8	-6	-6	-4	-3	-1	1	3	3	3	3	2	4	4	4	4
H5	-7	-8	-7	-7	-7	-8	-7	-8	-5	-4	-2	2	4	7	7	7	7	6	6	3	0
H6	1	0	-1	-3	-4	-5	-6	-7	-6	-4	-1	0	3	6	7	7	7	5	3	1	-1
H7	6	5	4	2	0	-2	-4	-4	-3	-1	0	3	5	6	6	5	5	5	3	2	0
H8	9	8	7	5	3	2	2	3	3	5	5	5	3	4	3	4	3	4	4	3	3
H9	10	10	9	9	8	9	9	8	7	6	5	3	0	0	1	3	5	7	7	7	5
H10	18	15	13	12	10	10	9	8	7	6	5	5	5	4	5	5	4	3	2	0	-1
H11	20	17	14	12	9	7	6	5	5	7	7	8	8	7	7	6	4	1	-1	-4	-7

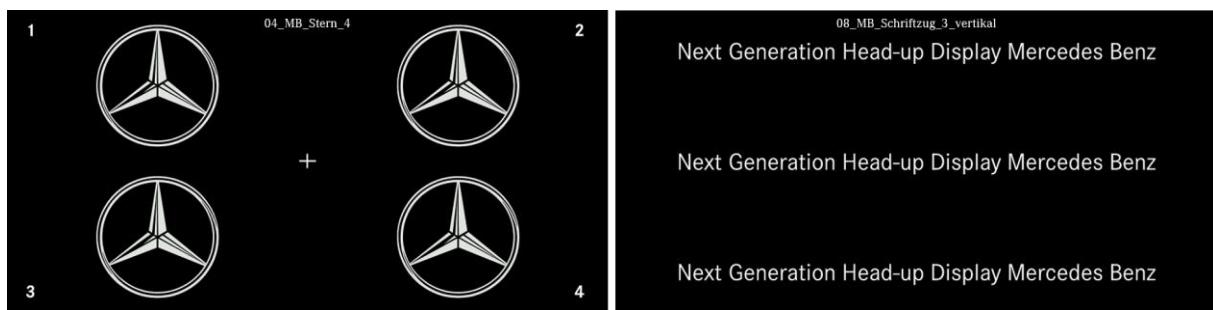
Auffällig in Tabelle 26 ist vor allem der Vorzeichenwechsel sowie die teilweise hohe Änderungsrate zwischen benachbarten Zellen und damit benachbarten Bildpunkten. Das bedeutet, dass das menschliche visuelle System verschiedene Abweichungen zwischen Wahrnehmung des linken und rechten Auges kompensieren muss. Wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, ist das menschliche visuelle System gegenüber Divergenzen empfindlich. Vor allem die Kompensation vertikaler Divergenzen ist mit erhöhter kognitiver Anstrengung verbunden. Neben der dadurch grundsätzlich als unangenehm empfundenen Wahrnehmung, kann die zeitlich längere Aussetzung mit einem solchen optischen System zu Ermüdung oder Unwohlsein und Kopfschmerzen führen. Diese Erkenntnisse wurden bereits in einer vorausgehenden internen Studie am 3D-Monitor festgestellt. Die ohnehin schon kognitiv belastende Kompensation von Divergenzen erschwert sich möglicherweise zusätzlich durch die wechselnde Richtung der vertikalen Divergenzen. Diese könnten eine Erklärung für die

qualitativen Kommentare der Proband:innen bzgl. *unangenehm wahrzunehmenden Bildbereichen* sein.

Im Gegensatz zu monoskopischen Abbildungsfehlern, welche durch die Nutzer:innen eines HUD Systems eindeutig identifiziert werden können, sind stereoskopische Abbildungsfehler schwieriger zu erkennen. Teilweise erkennen Nutzer:innen diese erst nach einem gewissen Betrachtungszeitraum und empfinden sie als störend. Diese Aussage lässt sich auf die Kommentare der Proband:innen während der Studie zurückführen, welche frühestens ab Frage 13 auf *unangenehm* oder *verschwommen* wahrzunehmende Bildbereiche hinweisen. Dies entspricht in etwa der Hälfte der Studiendurchlaufzeit. Entsprechend haben sich die Proband:innen bis zu diesem Zeitpunkt bereits 15 Minuten intensiv mit der Wahrnehmung des virtuellen Bildes auseinandergesetzt. Zudem nehmen die Proband:innen nie das gesamte virtuelle Bild, sondern nur Teile davon als unangenehmen wahr. Die Kontrolle der Divergenzen erfolgt bisher nur über die IQN 3.1 und 3.2, welche ausschließlich den Mittelwert der horizontalen und vertikalen Divergenz über das gesamte Testbild hinweg wiedergeben. Während Qualitätsunterschiede innerhalb des virtuellen Bildes für monoskopische Abbildungsfehler teilweise über die IQN 2.X und 4.X abgedeckt sind (siehe Abschnitt 4.3.4), bestehen für die stereoskopischen Abbildungsfehler keine vergleichbaren IQN. Zukünftig ist es daher nötig analog der IQN 2.X auch die Standardabweichung für Divergenzen zu erfassen.

Unterschiedliche Ausprägungen stereoskopischer Abbildungsfehler innerhalb eines virtuellen Bildes können im Gegensatz zu monoskopischen Abbildungsfehlern nicht über Warping verbessert werden. Die stereoskopischen Abbildungsfehler wirken sich zwar subtiler auf die Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität aus, können aber bei dauernder Benutzung durch Fahrer:innen als störend und anstrengend empfunden werden. Die dadurch entstehende Ermüdung der Fahrer:innen ist in jedem Fall zu verhindern. Daher findet abschließend eine genaue Analyse der Divergenzen statt. Im ersten Schritt werden neue mögliche Qualitätskennzahlen entwickelt, welche sich auf bestimmte Bildbereiche beziehen. Anschließend kann eine Korrelationsanalyse zwischen diesen Qualitätskennzahlen und den Bewertungen der Proband:innen erfolgen. Die Analyse basiert beispielhaft auf den in Tabelle 26 dargestellten vertikalen Divergenzen der virtuellen Bilder von WSS C für die Kamerapositionen L10 und R10. Es erfolgt ausschließlich eine Analyse der vertikalen Divergenzen, da die Untersuchung für horizontale Divergenzen keine Zusammenhänge mit der Probandenstudie ergibt.

Die Untersuchung verschiedener Bereiche des virtuellen Bildes erfolgt über die Aufteilung von Tabelle 26. Um eine Vergleichbarkeit mit der Probandenstudie herzustellen, orientiert sich die Aufteilung von Tabelle 26 an den Fragen bezüglich der Wahrnehmung in verschiedenen Bildbereichen. Daraus ergeben sich zwei Möglichkeiten zur Aufteilung von Tabelle 26. Zum einen kann die Aufteilung anhand der *Quadrantenbefragung* stattfinden. Diese sind über die Testbilder *04\_MB\_Stern\_4* und *06\_MB\_Schriftzug\_4* sowie den zugehörigen Fragen 10.1 – 12.4 und 18.1 – 20.4 dargestellt (siehe Tabelle 7 und Anhang XXVII). Zum anderen basiert die Aufteilung auf der *Zeilenbefragung* mit den Testbildern *08\_MB\_Schriftzug\_3\_vertikal* und *07\_Textnachricht\_vollflaechig* sowie den Fragen 22.1 – 22.3 und 25.1 – 25.3 (siehe Tabelle 7 und Anhang XXVII). In Abb. 4.45 sind beispielhaft die Testbilder *04\_MB\_Stern\_4* und *08\_MB\_Schriftzug\_3\_vertikal* dargestellt.



**Abb. 4.45: Testbilder *04\_MB\_Stern\_4* und *08\_MB\_Schriftzug\_3\_vertikal* zur Bewertung verschiedener Bildbereiche**

In Tabelle 27 ist die Aufteilung der vertikalen Divergenzen für WSS C aus den Kamerapositionen L10 und R10 anhand der Quadrantenbefragung zu sehen. Um für jeden der zu bewertenden Quadranten dieselbe Anzahl von Datenpunkten zu erhalten, werden Zeile *H6* und Spalte *V11* von der Betrachtung ausgeschlossen. Für die übrigen vier zusammenhängenden Bereiche werden jeweils die folgenden Kennzahlen berechnet:

- Arithmetisches Mittel [ $\bar{X}$ ]
- Standardabweichung [ $\sigma$ ]
- Delta zwischen maximaler und minimaler Abweichung [ $\Delta$ ]
- Summe 1:  $SUM1 = \bar{X} + \sigma$
- Summe 2:  $SUM2 = \bar{X} + \sigma + \Delta$

Diese Kennzahlen können anschließend mit den Bewertungen der Proband:innen verglichen werden. Grund für die zusätzliche Einführung der beiden Summen *SUM1* und *SUM2* ist die Erkenntnis aus vorausgehendem Abschnitt 4.3.4 zur Korrelationsanalyse zwischen subjektiver Bewertung und IQN. In diesem deuten die gebildeten Summen zur prozentualen Abweichungen

darauf hin, dass die Summe verschiedener Abbildungsfehler eine Möglichkeit zur schnellen Einschätzung der virtuellen Bildqualität sein könnte. Während im vorherigen Abschnitt bei der Analyse bestehender IQN die prozentuale Abweichung Verwendung findet, sollen in dieser Analyse die tatsächlichen Messwerte herangezogen werden. Hintergrund hierfür ist, dass im Gegensatz zu den IQN für diese Kennzahlen noch keine Grenzwerte festgelegt sind.

Bei Betrachtung von Tabelle 27 ist bereits ohne das Heranziehen der zuvor beschriebenen Kennzahlen erkenntlich, dass die vier Bildbereiche stark heterogene Ausprägungen der Messwerte besitzen. Diese erste schnelle Einschätzung ist anhand der Farbgebung möglich. Die Farbe *Blau* repräsentiert eine positive vertikale Divergenz und bedeutet, dass das linke Auge (Kameraposition L10) die virtuellen Bildinhalte weiter oben wahrnimmt als das rechte Auge (Kameraposition R10). Die Farbe *Rot* repräsentiert entsprechend eine negative vertikale Divergenz, bei welcher das rechte Auge (R10) die virtuellen Bildinhalte weiter oben wahrnimmt als das linke Auge. Die Abweichungen beschreiben den vertikalen Versatz der Bilder des linken und rechten Auges im Verhältnis zum Fahrzeugkoordinatensystem und damit zur Umwelt. Die Abweichungen sind in Millimetern angegeben. Dabei ist die steigende Intensität der jeweiligen Farbe mit erhöhten vertikalen Divergenzen in die eine oder andere Richtung zu verstehen. Des Weiteren fällt bei Betrachtung der Tabelle auf, dass in Bereich Q1 kein Vorzeichenwechsel der vertikalen Divergenz stattfindet, während dies in allen anderen Bildbereichen der Fall ist. Zudem ist das Delta zwischen kleinstem und größtem Bereich für Bereich Q3 mit deutlichem Abstand am größten.

**Tabelle 27: Vertikale Divergenz zwischen den Bildpunkten der virtuellen Bilder der Kamerapositionen L10 und R10 mit Aufteilung in vier Bildbereiche anhand der Quadrantenbefragung**

**Vertikale Divergenz**

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21
H1	-8	-9	-11	-11	-12	-10	-8	-6	-5	-4	-2	-4	-4	-5	-4	-2	-2	-1	0	1	3
H2	-10	-10	-9	-9	-7	-6	-4	-2	-2	-4	-5	-6	-6	-6	-5	-4	-2	0	1	3	4
H3	-11	-11	-11	-9	-8	-6	-6	-5	-5	-5	-5	-4	-5	-3	-2	0	1	2	4	5	5
H4	-11	-11	-10	-10	-9	-8	-6	-6	-4	-3	-1	1	3	3	3	3	2	4	4	4	4
H5	-7	-8	-7	-7	-7	-8	-7	-8	-5	-4	-2	2	4	7	7	7	7	6	6	3	0
H6	1	0	-1	-3	-4	-5	-6	-7	-6	-4	-1	0	3	6	7	7	5	3	1	-1	
H7	6	5	4	2	0	-2	-4	-4	-3	-1	0	3	5	6	6	5	5	3	2	0	
H8	9	8	7	5	3	2	2	3	3	5	5	5	3	4	3	4	3	4	4	3	3
H9	10	10	9	9	8	9	9	8	7	6	5	3	0	0	1	3	5	7	7	7	5
H10	18	15	13	12	10	10	9	8	7	6	5	5	5	4	5	5	4	3	2	0	-1
H11	20	17	14	12	9	7	6	5	5	7	7	8	8	7	7	6	4	1	-1	-4	-7

In Tabelle 28 sind nun die zuvor beschriebenen Kennzahlen, sowie die Bewertungen der Proband:innen für die vier Bildbereiche zu sehen. Die Bewertungen der Proband:innen basieren auf den Fragen 10.1 – 12.4 und 18.1 – 20.4. Damit sind sowohl die statischen als auch dynamischen Bewertungen inkludiert. Wie in vorigen Analysen kann auch hier ein Ranking der Bildbereiche stattfinden. Anschließend kann ein Vergleich zwischen dem Ranking anhand der Kennzahlen und dem Ranking anhand der Probandenbewertung erfolgen. Das Ranking zwischen der Kennzahl *Summe 2* und der Probandenbewertung stimmt überein. Bei den anderen Kennzahlen sind lediglich Tendenzen zu erkennen, da immer genau die Kennzahl eines Bereiches das Ranking gegenüber der Probandenbewertung verändert.

**Tabelle 28: Vergleich zwischen Kennzahlen und Probandenbewertung für die Bildbereiche (Quadranten) von WSS C**

Bereich Q1	Bereich Q2
<b>Kennzahlen:</b> $\bar{X} = 7,4$ $\sigma = 2,6$ $\Delta = 9,1$ $SUM1 = 10,0$ <b>SUM2 = 19,1</b>	<b>Kennzahlen:</b> $\bar{X} = 1,0$ $\sigma = 3,9$ $\Delta = 13,5$ $SUM1 = 4,9$ <b>SUM2 = 18,4</b>
Bereich Q3	Bereich Q4
<b>Kennzahlen:</b> $\bar{X} = 6,9$ $\sigma = 5,2$ $\Delta = 24$ $SUM1 = 12,1$ <b>SUM2 = 36,1</b>	<b>Kennzahlen:</b> $\bar{X} = 3,5$ $\sigma = 2,9$ $\Delta = 14,9$ $SUM1 = 6,4$ <b>SUM2 = 21,3</b>

Die Beobachtung hinsichtlich einer Korrelation zwischen Kennzahlen der vertikalen Divergenzen und der Quadrantenbefragung lässt sich ebenfalls für WSS A und WSS B feststellen.

Die Untersuchung der *Zeilenbefragung* liefert dieselben Ergebnisse. In Tabelle 29 ist die Aufteilung der vertikalen Divergenzen für WSS C aus den Kamerapositionen L10 und R10 anhand der Zeilenbefragung zu sehen. Den oberen Bereich *Z1* bilden demnach die Zeilen *H1* bis *H3*. Den mittleren Bereich *Z2* bilden die Zeilen *H5* bis *H7*. Den unteren Bereich *Z3* bilden die Zeilen *H9* bis *H11*. Die ausgegraute Zeilen *H4* und *H8* sind als Übergangszeilen zu verstehen und damit von der Betrachtung ausgeschlossen. Sie fließen nicht als Werte in die Berechnung der Kennzahlen ein. Ansonsten entspricht der Aufbau von Tabelle 29 dem Aufbau von Tabelle 27.

**Tabelle 29: Vertikale Divergenz zwischen den Bildpunkten der virtuellen Bilder der Kamerapositionen L10 und R10 mit Aufteilung in drei Bildbereiche anhand der Zeilenbefragung**

**Vertikale Divergenz**

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21
H1	-8	-9	-11	-11	-12	-10	-8	-6	-5	-4	-2	-4	-4	-5	-4	-2	-2	-1	0	1	3
H2	-10	-10	-9	-9	-7	-6	-4	-2	-2	-4	-5	-6	-6	-6	-5	-4	-2	0	1	3	4
H3	-11	-11	-11	-9	-8	-6	-6	-5	-5	-5	-5	-4	-5	-3	-2	0	1	2	4	5	5
H4	-11	-11	-10	-10	-9	-8	-6	-6	-4	-3	-1	1	3	3	3	2	4	4	4	4	4
H5	-7	-8	-7	-7	-7	-8	-7	-8	-5	-4	-2	2	4	7	7	7	7	6	6	3	0
H6	1	0	-1	-3	-4	-5	-6	-7	-6	-4	-1	0	3	6	7	7	7	5	3	1	-1
H7	6	5	4	2	0	-2	-4	-4	-3	-1	0	3	5	6	6	5	5	5	3	2	0
H8	9	8	7	5	3	2	2	3	3	5	5	5	3	4	3	4	3	4	4	3	3
H9	10	10	9	9	8	9	9	8	7	6	5	3	0	0	1	3	5	7	7	7	5
H10	18	15	13	12	10	10	9	8	7	6	5	5	5	4	5	5	4	3	2	0	-1
H11	20	17	14	12	9	7	6	5	5	7	7	8	8	7	7	6	4	1	-1	-4	-7

In Tabelle 30 sind die Kennzahlen, sowie die Bewertungen der Proband:innen für die drei Bildbereiche dokumentiert. Die Bewertungen der Proband:innen basieren auf den Fragen 22.1 – 22.3 und 25.1 – 25.3. Im Rahmen der *Zeilenbefragung* finden ausschließlich Bewertungen bei statischer Kopfposition statt. Damit erfolgt zum einen die Überprüfung ob die Bewertungen der Proband:innen mit den Kennzahlen verschiedener Bildbereiche übereinstimmen, da in diesem Fall eine andere Aufteilung des virtuellen Bildes stattfindet. Zum anderen kann überprüft werden, ob die scheinbare Korrelation zwischen Probandenbewertungen und den neu eingeführten Kennzahlen auch für ausschließlich statische Bewertungen zutrifft.

**Tabelle 30: Vergleich zwischen Kennzahlen und Probandenbewertung für die Bildbereiche (Zeilen) von WSS C**

**Bereich Z1**

**Kennzahlen:**

$$\bar{X} = -4,3$$

$$\sigma = 4,4$$

$$\Delta = 16,9$$

$$SUM1 = 8,7$$

$$SUM2 = 25,6$$

**Probandenbewertung**

$$4,28$$

**Bereich Z2**

**Kennzahlen:**

$$\bar{X} = 0,4$$

$$\sigma = 4,9$$

$$\Delta = 15,1$$

$$SUM1 = 5,3$$

$$SUM2 = 20,4$$

**Probandenbewertung**

$$4,56$$

**Bereich Z3**

**Kennzahlen:**

$$\bar{X} = 6,5$$

$$\sigma = 4,8$$

$$\Delta = 27,0$$

$$SUM1 = 11,3$$

$$SUM2 = 38,3$$

**Probandenbewertung**

$$3,82$$

Wie in vorausgehender Analyse zur Quadrantenbefragung stimmt das Ranking zwischen der Kennzahl *Summe 2* und der Probandenbewertung auch für die Zeilenbefragung überein. Außerdem passen für WSS C auch die Kennzahlen der *Summe 1*, das *arithmetisches Mittel*  $\bar{X}$  und das *Delta*  $\Delta$  mit den Probandenbewertungen zusammen. Für WSS A und WSS B stimmt das Ranking ebenfalls zwischen der Kennzahl *Summe 2* und den Probandenbewertungen überein. Für die anderen Kennzahlen ist dies nur teilweise der Fall. Damit bestätigt die Analyse der Zeilenbefragung die vorigen Erkenntnisse der Quadrantenbefragung.

Die Feststellung, dass die Summe verschiedener Abbildungsfehler die gesamte wahrgenommene Bildqualität besser beschreibt als einzelne Abbildungsfehler ist damit konform mit der Erkenntnis aus vorausgehender Korrelationsanalyse der subjektiven Bewertungen und der IQN. Bezogen auf die vorliegende Analyse der vertikalen Divergenzen bedeutet das, dass nicht allein ein hoher Mittelwert oder hohe Standardabweichung in einem Bildbereich für eine schlechte Bewertung verantwortlich ist. Vor allem die Kombination aus arithmetischem Mittel, Standardabweichung und maximalem Delta innerhalb eines Bereichs beeinflusst die wahrgenommene virtuelle Bildqualität eines AR HUD.

Dass vor allem bei Divergenzen diese scheinbaren Zusammenhänge festzustellen sind lässt sich durch zwei Gründe erklären. Zum einen ist das menschliche visuelle System aufgrund seines stereoskopischen Sehens empfindlich gegenüber Divergenzen. Zum anderen weist die Heterogenität der vertikalen Divergenzen für ein Augpaar darauf hin, dass bereits bei geringer Veränderung der Augposition unterschiedliche Veränderungen innerhalb des virtuellen Bildes stattfinden. Diese führen zu wahrnehmbaren Verzerrungen einzelner Bildbereiche. Demnach führen insbesondere heterogen auftretende Divergenzen innerhalb eines virtuellen Bildes zu einer Verschlechterung der wahrgenommenen Bildqualität.

Zusammenfassend lassen sich drei Punkte feststellen. Erstens zeigt die genaue Analyse der Abweichungen einzelner Bildpunkte, sowohl für das monoskopische als auch stereoskopische Sehen und die entsprechenden Abbildungsfehler, dass die Qualität innerhalb des virtuellen Bildes heterogen ist. Anhand der statistischen Analyse von Hypothese H3 in Abschnitt 4.3.3.1 sind nur in Teilen statistisch signifikante Unterschiede in den Probandenbewertungen in Abhängigkeit verschiedener Bildbereiche festzustellen. Die Erkenntnisse aus den Analysen der qualitativen Probandenbewertungen (Abschnitt 4.3.3.2) und der Topographie monoskopischer Testbilder zeigen in Kombination mit den in Teilen statistisch festgestellten Signifikanzen

allerdings auf, dass unterschiedliche Qualitäten innerhalb eines virtuellen Bildes auftreten und wahrnehmbar sind.

Zweitens sind zukünftig auch lokale stereoskopische Abbildungsfehler über neue IQN festzustellen. Die Proband:innen scheinen empfindlich gegenüber Divergenzen zu sein, weshalb diese zukünftig genauer betrachtet werden müssen. Diese Feststellung basiert zum einen auf den Erkenntnissen zur Topographie der Divergenzen, welche für alle WSS jeweils starke lokale Abweichungen aufweisen. Zum anderen passen die aufgestellten Kennzahlen zu den vertikalen Divergenzen in verschiedenen Bildbereichen mit den Bewertungen der Proband:innen für ebendiese Bildbereiche überein. Die Überprüfung lokaler stereoskopischer Abbildungsfehler kann analog der IQN 2.X über die Berechnung von Standardabweichungen erfolgen. Alternativ kann auch eine der in diesem Abschnitt vorgestellten Aufteilungen des virtuellen Bildes in verschiedene Bereiche stattfinden.

Zuletzt scheint die Addition verschiedener Kennzahlen des virtuellen Bildes eine schnelle Einschätzung bzgl. der Abbildungsfehler und entsprechender Qualität eines AR HUD darzustellen. Dies bestätigt die in diesem Abschnitt aufgezeigte Addition von arithmetischem Mittel, Standardabweichung und maximalem Delta innerhalb eines virtuellen Bildes, welche für alle untersuchten WSS mit den Probandenbewertungen bestimmter Bildbereiche übereinstimmen. Die Addition der prozentualen Abweichungen für die IQN im vorigen Abschnitt bestätigt ebenfalls, dass dieses Vorgehen eine erste schnelle Einschätzung bzgl. der virtuellen Bildqualität einer WSS sein kann. Auch in diesem Fall stimmen die so gebildeten Kennzahlen mit den Bewertungen der Proband:innen überein und ermöglichen eine scheinbare Korrelation zwischen diesen Bewertungen und den IQN.

## **4.5. Diskussion und Zusammenfassung der Studienergebnisse**

In diesem Abschnitt findet die Diskussion und Zusammenfassung der Probandenstudie zum Einfluss der WSS auf die subjektive wahrgenommene virtuelle Bildqualität eines AR HUD statt. Im Rahmen der Studie erfolgt die Untersuchung drei unterschiedlicher WSS. Die WSS sind die Versuchsobjekte der Studie. Die IQN aller bis dahin produzierten AR HUD WSS sind außerhalb der festgelegten Toleranz hinsichtlich ihrer virtuellen Bildqualität. Zu Beginn der Studie lassen sich über die IQN keine Unterschiede zwischen den WSS erkennen. Dies steht im Widerspruch zur Expertenbewertung. Anhand der Expertenbewertung sind zum einen klare Unterschiede in den virtuellen Bildqualitäten der verschiedenen WSS festzustellen. Zum

anderen ergibt die Expertenbewertung eine Einteilung der drei WSS in die Kategorien *nicht kundentauglich*, *bedingt kundentauglich* und *kundentauglich*. Folglich stellen die Expert:innen eindeutig subjektiv wahrnehmbare Qualitätsunterschiede im virtuellen Bild fest, welche von der jeweiligen WSS abhängig sind. Die Auswahl der drei WSS basiert auf der Expertenbewertung. Alle Expert:innen untersuchen alle drei WSS. Entsprechend handelt es sich um ein *Within-Subjects-Design*.

Die Probandenstudie selbst findet, unter Verwendung eines für die Studie entwickelten Versuchsträgers, in einer Halle auf dem Entwicklungsgelände der Mercedes-Benz AG statt. Der Versuchsträger basiert auf der Mercedes-Benz Baureihe W223 und ermöglicht die Betrachtung und damit Bewertung eines AR HUD (siehe Abschnitt 4.2.1).

Die Proband:innen stellen die Versuchssubjekte der Studie dar. Der Auswahlprozess der Proband:innen ermöglicht über verschiedene Kriterien die Auswahl eines heterogenen und damit repräsentativen Probandenkollektivs (siehe Abschnitt 4.2.3). Insgesamt nehmen 56 Proband:innen an der Studie teil.

In einem Interview bewerten die Proband:innen die Qualität des virtuellen Bildes des AR HUD. Die Bewertung erfolgt anhand verschiedener Bildinhalte und Fragestellungen unter Verwendung einer fünfstufigen Likert Skala (siehe Abschnitt 4.2.4 und 4.2.5). Zudem haben die Proband:innen neben der quantitativen Punktbewertung die Möglichkeit auch freie qualitative Kommentare hinsichtlich der virtuellen Bildqualität und auftretenden Abbildungsfehlern zu äußern. Jede Proband:in bewertet nur eine WSS. Folglich handelt es sich um ein *Between-Subjects-Design*. Die Zuteilung der Proband:innen zu den WSS ist randomisiert.

Die vorliegende Studie ermöglicht über ihren Aufbau und Ablauf, unter Verwendung tatsächlicher seriennaher Komponenten, erstmalig die Bewertung der virtuellen Bildqualität in Abhängigkeit der WSS. Der Fokus liegt auf den zu Beginn dieser Arbeit formulierten Forschungsfragen A, B, C und D:

- (A) *Welche Abbildungsfehler können im virtuellen Bild eines AR HUD entstehen?*
- (B) *Wie nehmen Kund:innen die virtuelle Bildqualität subjektiv wahr?*
- (C) *Welchen Einfluss hat die Windschutzscheibe auf Abbildungsfehler im virtuellen Bild sowie die subjektiv wahrgenommene virtuelle Bildqualität?*

*(D) Ist die subjektive Wahrnehmung der Kund:innen auf die definierten IQN für Abbildungsfehler zurückzuführen oder müssen diese erweitert werden?*

Die Forschungsfragen werden anhand der folgenden vier Hypothesen untersucht:

*Hypothese 1: Unterschiede in der Formgenauigkeit von Windschutzscheiben, und damit in ihrer Qualität, haben keinen Einfluss auf die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes.*

*Hypothese 2: Die Qualitätskennzahlen des virtuellen Bildes, die IQN, stehen im Einklang mit der subjektiv wahrgenommenen Qualität.*

*Hypothese 3: Alle Bereiche eines virtuellen Bildes werden in gleicher Qualität subjektiv wahrgenommen.*

*Hypothese 4: Die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes ist nicht abhängig von einer statischen oder dynamischen Kopfposition.*

Die allgemeine Analyse der Probandenstudie (siehe Abschnitt 4.3.1) kommt zu dem Ergebnis einer grundsätzlich positiven Bewertung der virtuellen Bildqualität durch die Proband:innen. Diese Feststellung ist für alle WSS gültig. Mit einer durchschnittlichen Bewertung von mindestens 4,26 Punkten auf der fünfstufigen Likert Skala, erreichen alle WSS eine Qualität die an sich kundentauglich scheint. Es sind nur geringe Unterschiede zwischen den Punktebewertungen der drei untersuchten WSS festzustellen. Unterschiedliche Bildinhalte, wie bspw. Symbole oder Text, haben keinen Einfluss auf die subjektiv wahrgenommene Bildqualität. Dynamisch bewegte virtuelle Bildinhalte werden durch die Proband:innen am besten bewertet und sind entsprechend am wenigsten anfällig für die Wahrnehmung von Abbildungsfehlern. Unterschiede in den Bewertungen der Proband:innen scheinen in Abhängigkeit der Bildbereiche innerhalb eines virtuellen Bildes und in Abhängigkeit einer statischen oder dynamischen Kopfposition zu bestehen. Die Analyse der vier Hypothesen erfolgt unter Anwendung statistischer Varianzanalysen der quantitativen Punktebewertung sowie den qualitativen Kommentaren der Proband:innen (siehe Abschnitt 4.3.3).

## **Quantitative und qualitative Analyse der Probandenstudie**

*Hypothese H1* stellt den Kern der Probandenstudie dar. Anhand der durchschnittlichen Punktebewertung der drei untersuchten WSS ist kein eindeutiger Unterschied hinsichtlich ihren virtuellen Bildqualitäten zu erkennen. Die Annahme von Hypothese H1 bestätigt auch statistisch die allgemeine Ergebnisbetrachtung aus Abschnitt 4.3.1: die verschiedenen WSS haben keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung der virtuellen

Bildqualität durch die Proband:innen. Die ANOVA für Hypothese H1 (siehe Abschnitt 4.3.3.1) liefert mit einem p-Wert von  $p = 0,668$  ein deutliches Ergebnis, wonach Hypothese H1 eindeutig anzunehmen ist. Auch der empirische F-Wert  $F_{emp} = 0,41$ , welcher deutlich kleiner ist als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 3,18$ , bestätigt die Annahme von Hypothese H1. Entsprechend unterscheiden sich die Mittelwerte der verschiedenen WSS nicht statistisch signifikant voneinander. Diese Feststellung steht im Widerspruch zu den antizipierten Ergebnissen auf Basis der Expertenbewertung in Abschnitt 4.2.2. Zum einen ergab die Expertenbewertung eindeutig wahrnehmbare Unterschiede bzgl. der virtuellen Bildqualität zwischen den drei Versuchsobjekten WSS A, WSS B und WSS C. Zum anderen ermöglichen die erkannten Unterschiede zwischen den WSS deren Einteilung in die Kategorien *nicht kundentauglich* (WSS B), *bedingt kundentauglich* (WSS A) und *kundentauglich* (WSS C).

Ein Grund für diese Diskrepanz könnte der Studienaufbau darstellen, da ein *Between-Subjects-Design* statt eines *Within-Subjects-Design* verwendet wurde. Eine Erkenntnis aus der Diskrepanz zwischen Probandenstudie und Expertenbewertung ist entsprechend, dass Unterschiede in der virtuellen Bildqualität eines HUD in Abhängigkeit der WSS nur dann zum Tragen kommen, wenn verschiedene WSS im direkten Vergleich bewertet werden können. Folglich könnte in zukünftigen Studien die Verwendung eines *Within-Subjects-Designs* die statistische Aussagekraft erhöhen. Allerdings ist an dieser Stelle anzumerken, dass ein *Within-Subjects-Design* nicht den tatsächlichen Anwendungsfall im Feld wiedergibt, da den Kund:innen in den allermeisten Fällen nur ein AR HUD System zur Verfügung stehen wird. Da den Proband:innen damit kein Vergleich verschiedener virtueller Bildqualitäten und damit keine Referenz zur Verfügung steht, scheint vor allem eine homogene virtuelle Bildqualität ein Qualitätsmerkmal für die Proband:innen zu sein. Diese Annahme stimmt mit der in Abschnitt 4.2.2 festgestellten Erkenntnis der Expert:innen überein, wonach WSS B zwar eine insgesamt schlechte aber dafür homogene virtuelle Bildqualität aufweist. Für WSS A und WSS C stellen die Expert:innen größere Unterschiede hinsichtlich der Qualität innerhalb des virtuellen Bildes fest. Zusätzlich ist nicht zu vernachlässigen, dass die Proband:innen einen Hang zur überproportional positiven Bewertung aufweisen könnten. Gründe hierfür sind, dass die Proband:innen noch kein vergleichbares HUD System gesehen haben und daher fasziniert von der vorgestellten Technologie sind. Außerdem nehmen die Proband:innen freiwillig an der Studie Teil, erhalten eine monetäre Kompensation und sind entsprechend eher positiv ggü. dem Untersuchungsgegenstand eingestellt. Zuletzt kann auch eine Wahrnehmungsverzerrung auf

Seiten der Expert:innen vorliegen, welche aufgrund Ihrer Expertise überproportional empfindlich ggü. Abbildungsfehlern sind.

*Hypothese H3* untersucht die Heterogenität innerhalb des virtuellen Bildes einer WSS. Die verschiedenen Bereiche des virtuellen Bildes erhalten unterschiedliche Bewertungen durch die Proband:innen. Die allgemeine Ergebnisbetrachtung bzgl. Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität in unterschiedlichen Bildbereichen in Abschnitt 4.3.1 weist darauf hin, dass Hypothese H3 abzulehnen ist. Die statistische Analyse der Hypothese H3 erfolgt zunächst anhand der Quadrantenbefragung bei dynamisch horizontaler Kopfbewegung für WSS A. Die entsprechende ANOVA kommt unerwartet zu dem Ergebnis Hypothese H3 anzunehmen. Dies bestätigen der p-Wert  $p = 0,147$  sowie der empirische F-Wert  $F_{emp} = 1,85$ . Letzterer ist kleiner als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 2,74$ . Entsprechend unterscheiden sich die Mittelwerte der verschiedenen Bildbereiche für die Quadrantenbefragung bei dynamisch horizontaler Kopfbewegung nicht statistisch signifikant voneinander. Die statistische Analyse der Hypothese H3 anhand der Zeilenbefragung bei statischer Kopfposition liefert bis auf eine Ausnahme das gleiche Ergebnis. Diese Ausnahme bildet die ANOVA der Zeilenbefragung bei statischer Kopfposition für WSS A. In diesem Fall kommt es durch einen p-Wert  $p = 0,010$  zur Ablehnung von Hypothese H3. Die Ablehnung bestätigt sich durch den empirischen F-Wert  $F_{emp} = 5,00$ , welcher größer ist als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 3,18$ . Hier unterscheiden sich die Mittelwerte zwischen den Bildbereichen Z1 und Z2 statistisch signifikant voneinander.

Die statistische Analyse von Hypothese H3 ergibt damit nur in einem Untersuchungsfall signifikante Unterschiede in den Bewertungen verschiedener Bildbereiche durch die Proband:innen und damit deren Ablehnung. Alle weiteren ANOVAs liefern als Ergebnis die Annahme von Hypothese H3. Allerdings bestehen in den weiteren Untersuchungen Hinweise zur Ablehnung von Hypothese H3 und weisen damit in Teilen auf die Wahrnehmung unterschiedlicher Bildqualitäten hin.

Um die statistische Aussagekraft an dieser Stelle zu erhöhen, können in zukünftigen Studien zum einen die Anzahl der Proband:innen und zum anderen die Detaillierung der Likert Skala erhöht werden. Vor allem die Ergänzung weiterer Bewertungsstufen der Likert Skala auf bspw. zehn Punkte würde den Proband:innen eine differenziertere Bewertung von Abbildungsfehlern und Unterschieden innerhalb des virtuellen Bildes ermöglichen.

Zuletzt untersucht Hypothese H4 den Einfluss von Kopfbewegungen auf die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität der Proband:innen. Die Bewertungskategorien mit

dynamischen Kopfpositionen erhalten die schlechtesten Bewertungen der Proband:innen. Es ist eindeutig zu erkennen, dass bei dynamischer Kopfposition schlechtere Ergebnisse erreicht werden als bei statischer Kopfposition. Diese Beobachtung ist für alle WSS gültig. Die statistische Analyse bestätigt die Ablehnung von Hypothese H4 anhand der entsprechenden ANOVA mit dem p-Wert  $p = 0,000$  sowie dem empirischen F-Wert  $F_{emp} = 14,58$ , welcher deutlich höher als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 3,05$  ist. Diese Feststellung hinsichtlich unterschiedlicher Mittelwerte für statische und dynamische Kopfpositionen ist über alle WSS hinweg gültig. Damit nehmen die Proband:innen statistisch signifikante Qualitätsunterschiede bei statischer oder dynamischer Kopfposition wahr.

Ein Grund für die deutliche Wahrnehmung von Qualitätsunterschieden zwischen statischer und dynamischer Kopfposition eines AR HUD ist möglicherweise, dass die Proband:innen noch wenig Erfahrung mit optischen Systemen besitzen, welche virtuelle Bilder erzeugen. Displays, welche im Alltag Verwendung finden, bspw. TVs, Smartphones oder Computerbildschirme haben kaum wahrnehmbare geometrische Abbildungsfehler bei Bewegung der Augenposition. Aus diesem Erfahrungsbereich sind lediglich sich verändernde Kontraste, Helligkeiten, Farben oder perspektivische Verzerrungen bekannt. Unbekannt sind dagegen die bei einem AR HUD auftretenden geometrischen Abbildungsfehlern bei statischen und vor allem dynamischen Kopfbewegungen mit deutlich wahrnehmbaren Verschiebungen, Rotationen oder Verzerrungen des virtuellen Bildes. Da stereoskopische Bildsysteme, bspw. 3D-Displays, in der breiten Masse noch kaum Anwendung finden, sind stereoskopische Abbildungsfehler, z.B. Divergenz- oder Parallaxenfehler, ebenfalls wenig bekannt.

Bzgl. der quantitativen Bewertung durch die Proband:innen lässt sich die These aufstellen, dass vor allem ein homogenes virtuelles Bild als Qualitätsmerkmal wahrgenommen wird. Grund hierfür könnte sein, dass die Proband:innen, mangels Vergleichsmöglichkeiten, den besten Bereich des virtuellen Bildes als Referenz der bestmöglichen Bildqualität kategorisieren. Folglich könnte eine WSS, welche eine schlechte aber homogene Bildqualität aufweist eine bessere subjektive Bewertung durch Kund:innen erhalten, als eine WSS mit grundsätzlich besserer virtuellen Bildqualität in allen Bereich, aber gleichzeitig höherer Heterogenität der Qualität innerhalb des Bildes.

Die Auswertung der allgemeinen Fragen G, N und F zeigt, dass die Proband:innen die Nutzung eines HUD grundsätzlich stark befürworten und von der gezeigten AR HUD Technologie begeistert sind. Dennoch äußern die Proband:innen qualitative Kommentare zu explizit

störenden Abbildungsfehlern. Darunter fallen die Nennungen zu Verzerrung und Unschärfe sowie die unangenehme oder anstrengende Wahrnehmung des virtuellen Bildes. Die beiden letzten Punkte weisen dabei auf Divergenzen hin. Die Art und Häufigkeit der Hinweise zeigt, dass die Proband:innen Abbildungsfehler explizit wahrnehmen und diese auch als störend empfinden. Zudem ist auffällig, dass die Proband:innen detailliert beschreiben in welchen Bildbereichen sie Abbildungsfehler wahrnehmen. Dennoch fällt die Punktebewertung der virtuellen Bildqualität über alle WSS hinweg sehr hoch aus. Die Auswertung der qualitativen Kommentare bekräftigt folglich eine Ablehnung der Hypothese H3, auch wenn keine eindeutige statistische Signifikanz hinsichtlich Qualitätsunterschieden innerhalb des virtuellen Bildes festzustellen ist. Schlussfolgernd ist davon auszugehen, dass Qualitätsunterschiede innerhalb des virtuellen Bildes wahrzunehmen und störend sind. Außerdem wird auf Basis der doch häufigen und expliziten Äußerungen der Proband:innen hinsichtlich Abbildungsfehlern im virtuellen Bild, die fünfstufige Likert Skala streng hinsichtlich Kundentauglichkeit kategorisiert. Demnach sind Punktebewertungen  $<3,5$  Punkte als *nicht kundentauglich* anzusehen.

Schlussfolgernd ergeben die quantitative statistische und qualitative Analyse verschiedene Erkenntnisse. Grundsätzlich erhalten alle drei untersuchten WSS im Durchschnitt gute Ergebnisse. Das Ranking der WSS unterscheidet sich jedoch zwischen Betrachtung der allgemeinen Punktebewertung, Bewertung mit  $\leq 3$  Punkten, qualitativen Bewertung und Expertenbewertung. Die Gründe hierfür liegen voraussichtlich im gewählten Studienaufbau (*Within-Subjects-Design* vs. *Between-Subjects-Design*) und zu kleiner Auflösung der Likert Skala. Die verschiedenen Rankings sind im weiteren Verlauf beschrieben. Dennoch lassen sich neue Erkenntnisse aus der Probandenstudie ziehen. Obwohl die Punktebewertungen durchschnittlich hoch ausfallen, äußern die Proband:innen häufig negative Kommentare hinsichtlich der Wahrnehmung von Abbildungsfehlern im virtuellen Bild, welche die Proband:innen stören. Diese Feststellung kann in zwei Richtungen interpretiert werden: einerseits ist es möglich, dass die auftretenden und vor allem qualitativ bemängelten Abbildungsfehler tatsächlich störend sind und die User Experience der Fahrer:innen zukünftig beeinträchtigen. Andererseits kann es ebenfalls sein, dass die Abbildungsfehler zwar wahrzunehmen sind, aber die Fahrer:innen nicht im besonderen Maße stören und entsprechend keine Beeinträchtigung der User Experience darstellen. Letztere Interpretation der Ergebnisse ließe darauf schließen, dass die Proband:innen weniger empfindlich ggü. Abbildungsfehler sind als zunächst angenommen und die erreichte virtuelle Bildqualität des AR HUD bereits

ausreichend ist. Des Weiteren ergibt die statistische Analyse der Hypothese H1, dass bei dem gewählten *Between-Subjects-Design* kein signifikanter Unterschied zwischen den untersuchten WSS hinsichtlich ihrer virtuellen Bildqualität besteht. Auch bei Hypothese H3 sind keine eindeutigen Signifikanzen hinsichtlich unterschiedlichen virtuellen Bildqualitäten in verschiedenen Bildbereichen festzustellen. Allerdings ist, trotz der fehlenden Signifikanz, den qualitativen Kommentaren der Proband:innen eindeutig zu entnehmen, dass Unterschiede der virtuellen Bildqualität in verschiedenen Bildbereichen einer WSS auftreten. Zuletzt zeigt die Analyse von Hypothese H4, dass die subjektiv wahrgenommene virtuelle Bildqualität bei Kopfbewegungen statistisch signifikant abfällt. Dagegen haben verschiedene Bildinhalte, bspw. Symbole, Texte oder Zahlen, keinen ausschlaggebenden Einfluss auf die Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität.

Eine Verbesserung des Studiendesigns und damit Erhöhung der statistischen Aussagekraft ist über die Verwendung eines *Within-Subjects-Design* anstatt eines *Between-Subjects-Design* möglich. Wie bereits diskutiert, spiegelt ein *Within-Subjects-Design* allerdings nicht den tatsächlichen Anwendungsfall im Feld wieder. Die Probandenstudie ist allgemein als *Between-Subjects-Design* aufgesetzt. Die Analysen zu den Hypothesen H3 und H4 entsprechen allerdings beide jeweils einem *Within-Subjects-Design*. Für diese Hypothesen sind tendenzielle Signifikanzen oder tatsächliche Signifikanzen nachweisbar. Einer der Gründe liegt in der Natur eines *Within-Subjects-Designs*, da den Proband:innen hier verschiedene Stufen des zu bewertenden Faktors bzw. Versuchsobjektes zur Verfügung stehen und Unterschiede zwischen den Stufen des Faktors leichter zu erkennen sind. Eine weitere Möglichkeit zu Verbesserung des Studiendesigns ist die Erhöhung der Auflösung der Likert Skala. Eine hohe Auflösung kann allerdings dazu führen, dass Proband:innen nur einen geringen Teil der verfügbaren Skala verwenden. Außerdem erhöht sich die statistische Aussagekraft grundsätzlich bei Verwendung einer größeren Stichprobe. Im vorliegenden Fall haben die zur Verfügung stehenden zeitlichen Ressourcen die Stichprobengröße begrenzt.

## **Korrelationsanalyse zwischen subjektiver Bewertung und IQN**

Eine Bewertung der WSS anhand ihrer IQN ist aufgrund der Vielzahl an Qualitätskennzahlen nur über das zusammenfassen der IQN möglich. Die auf diese Weise generierte Bewertung der WSS auf Basis der IQN korreliert mit der quantitativen Probandenbewertung und deutet die Annahme der Hypothese H2 an. Gleichzeitig weist die verwendete Methode der *Summe prozentualer Abweichungen* darauf hin, dass ein solches Vorgehen und Zusammenfassen der IQN zukünftig eine sinnvolle Möglichkeit zur ersten schnellen Einschätzung der virtuellen

Bildqualität einer WSS sein kann. Dieser Ansatz ist vor dem Hintergrund der vielen Messwerte je WSS ein nötiger Schritt, um im Umgang der anfallenden Datenmengen zur Vereinfachung im täglichen Entwicklungs- und Produktionsprozess beizutragen. Genau wie die qualitativen Kommentare der Proband:innen, weisen auch die teilweise hohen Messwerte der IQN 2.X und 4.X darauf hin, dass Qualitätsunterschiede innerhalb des virtuellen Bildes bestehen. Da allerdings nicht alle IQN der genannten Kategorien außerhalb der Toleranzgrenzen liegen und auch andere IQN sehr hohe Überschreitungen der Grenzwerte aufweisen, ist die Aussagekraft hinsichtlich der Feststellung lokaler Abbildungsfehler durch IQN begrenzt. Die virtuelle Bildgröße von 77 Zoll führt möglicherweise dazu, dass lokale Abbildungsfehler in den Berechnungen für die IQN unauffällig bleiben und Abweichungen im statistischen Rauschen untergehen. Dies könnte eine Analogie zur Probandbewertung sein, nach welcher die Proband:innen die virtuelle Bildqualität als allgemein gut bewerten (*quantitative Bewertung*) aber dennoch häufig lokal störende Abbildungsfehler (*qualitative Bewertung*) bemängeln.

Nichtsdestotrotz überschreiten die IQN ihre zum jetzigen Zeitpunkt gültigen Toleranzgrenzwerte häufig um mehr als das zehnfache, in einigen Fällen gar um das zwanzig- bis dreißigfache. Da diese hohen Überschreitungen im Widerspruch zu den generell guten Punktebewertungen der Proband:innen stehen, ist davon auszugehen, dass die Toleranzgrenzwerte deutlich zu niedrig angesetzt sind. Sie entsprechen damit nicht der Wahrnehmung der Proband:innen. Dies erklärt warum alle WSS bisher eine Kategorisierung als *nicht kundentauglich* anhand der IQN erhielten. Aus diesem Grund ist es zwingend notwendig neue Toleranzgrenzwerte für die IQN festzulegen. Dennoch lassen sich über die Methodik der *Summe prozentualer Abweichungen* scheinbare Zusammenhänge zwischen den IQN und der Probandenstudie aufstellen, welche in zukünftigen Untersuchungen weiter analysiert und verifiziert werden müssen. Dabei ist eine Aufteilung in die Kategorien statisch monoskopische Abbildungsfehler, dynamisch monoskopische Abbildungsfehler und stereoskopische Abbildungsfehler vorzunehmen.

## **Ranking der Windschutzscheiben für die verschiedenen Untersuchungen**

Bildet man für das Abschneiden der drei WSS ein Ranking auf Basis der vorausgehenden Untersuchungen, ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse. In Tabelle 31 sind die Rankings für die verschiedenen Untersuchungen aufgelistet. Die Tabelle verdeutlicht die unterschiedlichen Rankings zwischen den Untersuchungen. Die Expertenbewertung bildet die Erwartung der Studienergebnisse ab. Damit übereinstimmend ist ausschließlich das Ranking anhand der Punktebewertungen  $\leq 3$  Punkte. Nach diesen beiden Rankings erhält WSS C, welche nach der

Überarbeitung des Biegewerkzeuges und Optimierung des Produktionsprozesses gefertigt wurde, die beste Bewertung. Die Rankings basierend auf der quantitativen Probandenbewertung und den IQN stehen dazu im Widerspruch. In diesen Betrachtungsfällen schneidet WSS B am besten und WSS C am schlechtesten ab. In der qualitativen Probandenbewertung liegt wiederum WSS C vor WSS B. WSS A wird in diesem Fall nicht betrachtet um den Vergleich zwischen WSS B und WSS C herauszuarbeiten. Die qualitative Probandenbewertung passt damit eher zur Expertenbewertung.

**Tabelle 31: Ranking der WSS anhand der verschiedenen Untersuchungen**

Ranking Methode	WSS A	WSS B	WSS C
<i>Expertenbewertung</i>	2	3	1
<i>Quantitative Probandenbewertung</i> <sup>5</sup>	2	1	3
<i>Qualitative Probandenbewertung</i>	3	2	1
<i>Punktebewertungen ≤3 Punkte</i>	2	3	1
<i>IQN</i>	2	1	3

Bei der Interpretation der verschiedenen Rankings ist zu berücksichtigen, dass die Unterschiede zwischen den WSS teilweise nur sehr gering ausfallen. Dies trifft vor allem auf die quantitative Probandenbewertung sowie die IQN zu. Die IQN sind ohnehin schwierig zu interpretieren, da die Überschreitungen der Toleranzgrenzwerte außerordentlich hoch sind. Die Expertenbewertung sowie qualitative Probandenbewertung ermöglichen ein eindeutiges Ranking der untersuchten WSS.

Die verschiedenen Bewertungen führen zur unterschiedlichen Einschätzung der virtuellen Bildqualität je WSS. Die fehlende Korrelation zwischen den Bewertungen weist erneut darauf hin, dass ein Unterschied zwischen der Verwendung des *Within-* oder *Between-Subjects-Designs* bestehen könnte. Zu diesem Zeitpunkt lässt sich die Aussage treffen, dass die subjektive Wahrnehmung der virtuellen Bildqualität davon abhängt, ob einer Betrachter:in nur eine einzelne WSS zur Bewertung vorliegt oder mehrere WSS im direkten Vergleich zur Verfügung stehen.

---

<sup>5</sup> Inkl. Bewertungskorrektur für WSS C anhand der Störfaktoranalyse.

Aufgrund der jeweils erhobenen Datenbasis repräsentiert die quantitative Probandenbewertung die Untersuchung mit der höchsten Aussagekraft. Daher werden die statistischen Analysen zu den Hypothesen auf dieser Datenbasis als gültig angenommen.

## Topographie von Testbildern

Obwohl zwischen der quantitativen Probandenbewertung und den IQN eine Korrelation zu bestehen scheint, ist es nicht möglich die explizit als störend aufgezählten Abbildungsfehler der Proband:innen in Form von qualitativen Kommentaren den IQN zuzuordnen. Trotz der Annahme von Hypothese H3, nehmen die Proband:innen Qualitätsunterschiede innerhalb eines virtuellen Bildes wahr. Die Algorithmen der IQN decken diese Qualitätsunterscheide innerhalb des virtuellen Bildes nur in Teilen ab.

Die detaillierte Analyse der Topographie der Testbilder in Abschnitt 4.4 verdeutlicht, dass das virtuelle Bild lokale Abbildungsfehler besitzt. Dies ist vor allem für die Divergenzen zutreffend, welche bisher ausschließlich als gemittelter Wert über das gesamte virtuelle Bild geprüft werden. Während Qualitätsunterschiede innerhalb des virtuellen Bildes für monoskopische Abbildungsfehler teilweise über die IQN 2.X und 4.X abgedeckt sind (siehe Abschnitt 4.3.4), bestehen für die stereoskopischen Abbildungsfehler keine vergleichbaren IQN. Zukünftig ist es daher nötig analog der IQN 2.X auch die Standardabweichung für Divergenzen zu erfassen.

Folglich ist es nicht möglich einen Zusammenhang zwischen den Bereichsbewertungen der Proband:innen mit den bestehenden IQN herzustellen. Daher sollen neue Qualitätskennzahlen das Testbild in verschiedene Bereiche einteilen. Als Orientierung dient hierfür die Einteilung des Testbilds anhand der *Quadranten- und Zeilenbefragung* der Probandenstudie. Diese neuen Qualitätskennzahlen umfassen das arithmetische Mittel  $\bar{X}$ , die Standardabweichung  $\sigma$  und das Delta zwischen maximaler und minimaler Abweichung  $\Delta$  eines jeweilig definierten Bereiches des Testbilds. Außerdem erfolgt basierend auf den Erkenntnissen hinsichtlich besserer Korrelation mit den Probandenbewertungen ein Vergleich mit der Summe dieser Kennzahlen. Erneut stellt sich heraus, dass die Summe der Qualitätskennzahlen sich besser dafür eignet Zusammenhänge mit den Probandenbewertungen festzustellen. Die neuen Qualitätskennzahlen können in Korrelation mit den Bewertungen der Proband:innen gebracht werden und stimmen mit allen untersuchten WSS überein. Allerdings ist diese Beobachtung nur für einen Vergleich der Bereichsbewertungen der Proband:innen mit den *vertikalen Divergenzen* zutreffend. Folglich müssen zukünftig auch Qualitätskennzahlen zur Bestimmung lokaler stereoskopischer

Abbildungsfehler entwickelt und verwendet werden, welche eine Erweiterung der IQN darstellen.

Damit zeigt sich sowohl in der Korrelationsanalyse zwischen den Probandenbewertungen und den IQN als auch der genauen Testbildanalyse inklusive neuer Qualitätskennzahlen, dass nicht allein einzelne Kennzahlen mit der subjektiv wahrgenommenen Bildqualität zu erklären sind. Vielmehr ist die Kombination aus hohen Mittelwerten, Standardabweichungen und Maximalabweichungen in einem oder zwischen den Bildbereichen für die subjektiv wahrgenommene Bildqualität verantwortlich. Die Summe von Abbildungsfehlern innerhalb eines Bereichs entspricht damit der wahrgenommenen virtuellen Bildqualität eines AR HUD. Es gilt diese Ansätze weiterzuentwickeln und zwischen den Abbildungsfehlern zu differenzieren. Die Probandenstudie zeichnet ab, dass bspw. homogene Verzeichnungen des virtuellen Bildes als subjektiv weniger störend wahrgenommen werden, als dynamische Verzeichnungen des virtuellen Bildes. Zudem zeigt sich, dass vor allem lokal auftretende Divergenzen für eine störende subjektive Wahrnehmung des virtuellen Bildes durch die Proband:innen verantwortlich sind. Diese Erkenntnisse sind zwingend in der erneuten Festlegung der Toleranzgrenzwerte für die IQN zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Summe prozentualer Abweichungen könnte auch eine Gewichtung der Abbildungsfehler sinnvoll sein. Zudem zeigen die Erkenntnisse der qualitativen Probandenbewertungen (Abschnitt 4.3.3.2) und der Topographie monoskopischer Testbilder, in Kombination mit den statistisch festgestellten Signifikanzen, dass unterschiedliche Qualitäten innerhalb eines virtuellen Bildes auftreten und wahrnehmbar sind.

Der Vergleich zwischen den Testbildern derselben WSS der Messsysteme des HUD Prüfstands und Versuchsträgers zeigt die auftretenden Unterschiede aufgrund der Verbautoleranzen des Versuchsträgers (siehe Abb. 4.42 und Abb. 4.43). Trotz Ausrichtung der optischen Komponenten über die Korrektur des Cockpitquerträgers und damit Aufnahme des AR HUD Projektors entstehen Unterschiede zwischen den virtuellen Bildern des Versuchsträgers und des HUD Prüfstands. Entsprechend haben die Einbautoleranzen der optischen Komponenten einen großen Einfluss auf die virtuelle Bildqualität. Der Einfluss der Einbautoleranzen auf die virtuelle Bildqualität scheint deutlich höher zu sein als der Einfluss der unterschiedlichen WSS. Die Probandenstudie zeigt, dass unterschiedliche WSS kaum Auswirkungen auf die wahrgenommene Bildqualität haben. Eine detaillierte Analyse des Einflusses der Einbautoleranzen von AR HUD Projektor und WSS auf Basis sich ändernder IQN Messwerte ist im Vorfeld dieser Arbeit bereits erfolgt [99].

Allgemein sind die Ergebnisse und entsprechende Interpretationen kritisch zu hinterfragen, da trotz sorgfältiger Auswahl der Versuchssubjekte und Versuchsobjekte sowie Planung und Durchführung der Studie, teilweise Widersprüche in den Ergebnissen vorliegen. Diese sind vor allem der Tatsache geschuldet, dass Korrelationen zwischen den physikalischen Eigenschaften eines optischen Systems sowie dessen subjektiver Wahrnehmung durch Proband:innen gesucht werden. Die aufgezeigten Korrelationen sind nicht automatisch mit einer tatsächlichen Kausalität gleichzusetzen – *cum hoc ergo propter hoc*.

Weitere Analysen der virtuellen Bildqualität eines AR HUD sind daher nach Markteinführung der Fahrzeuge mit AR HUD nötig, wenn erste Kundenbeanstandungen Potentiale zur Optimierung aufweisen. Sich abzeichnende Lessons Learned aus dem Entwicklungsprozess des AR HUD Systems fließen bereits in das zukünftige Flächendesign von AR HUD WSS ein. Die WSS ist aufgrund ihres Herstellungsverfahrens die Komponente mit den größten Toleranzen im optischen System. Daher ist es wichtig die Vergrößerung des Bildes durch die WSS klein zu halten. Das ist über die Festlegung größerer Radien und damit flacherer WSS zu erreichen. Außerdem stellt sich zunehmend heraus, dass für den Reflektionsbereich des AR HUD auf der WSS die orthomorphe Fläche der torischen Fläche hinsichtlich Abbildungsqualität virtueller Bilder überlegen ist. Grund hierfür ist vor allem die Ausprägung konstanter Radien in horizontaler und vertikaler Richtung. Eine orthomorphe Fläche ist auch bzgl. der Herstellung von WSS im Vorteil, da keine Gradienten der Radien im Reflektionsbereich bestehen. Die konstanten Radien ermöglichen eine bessere Kontrolle des Biegeprozesses.

## Diskussion der Forschungsfragen

Abschließend findet die Diskussion der Forschungsfragen statt, welche folgend erneut aufgelistet sind:

- (A) *Welche Abbildungsfehler können im virtuellen Bild eines AR HUD entstehen?*
- (B) *Wie nehmen Kund:innen die virtuelle Bildqualität subjektiv wahr?*
- (C) *Welchen Einfluss hat die Windschutzscheibe auf Abbildungsfehler im virtuellen Bild sowie die subjektiv wahrgenommene virtuelle Bildqualität?*
- (D) *Ist die subjektive Wahrnehmung der Kund:innen auf die definierten IQN für Abbildungsfehler zurückzuführen oder müssen diese erweitert werden?*

Antworten zu den Forschungsfragen finden sich in den Untersuchungen aller vier Hypothesen wieder. Daher ist es sinnvoll die Forschungsfragen zusammenhängend zu betrachten. Bzgl. Forschungsfrage (A) bilden die in Abschnitt 2.4 erläuterten Abbildungsfehler im virtuellen Bild

eines AR HUD weitestgehend auch die tatsächlich auftretenden Abbildungsfehler ab. Darin bisher nicht enthalten sind lokale Divergenzen, welche einen Einfluss auf die wahrnehmbare Bildqualität haben. Dies ist bereits ein Hinweis zu Forschungsfrage (D), wonach eine Erweiterung der IQN um diese lokale Divergenzen zu erfolgen hat.

Die durchschnittlich hohen Punktebewertungen der untersuchten WSS zeigen, dass die Kund:innen die virtuelle Bildqualität grundsätzlich positiv subjektiv wahrnehmen. Die Annahme von Hypothese H1 zeigt zudem, dass die unterschiedlichen untersuchten WSS keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die subjektiv wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes haben. Diese Feststellungen beantworten damit schon in Teilen die Forschungsfragen (B) und (C).

In den qualitativen Kommentaren sind explizite Hinweise auf wahrzunehmende Abbildungsfehler durch die Proband:innen zu finden. Die Proband:innen nennen vor allem Verzerrungen, Unschärfe und Verschwommenheit des virtuellen Bildes sowie dessen unangenehme und anstrengende Wahrnehmung. Auffällig ist hierbei, dass die Proband:innen auftretende Abbildungsfehler in den meisten Fällen bestimmten Bildbereichen zuordnen. Entsprechend nehmen die Proband:innen vor allem die unterschiedlichen Qualitäten innerhalb des virtuellen Bildes als Abbildungsfehler wahr. Diese Feststellung gibt weitere Hinweise zu den Forschungsfragen (A) und (B).

Die Häufigkeit dieser negativen Kommentare zu Abbildungsfehlern im virtuellen Bild variiert stark zwischen den WSS. Zudem befinden sich die durch die Proband:innen beschrieben Abbildungsfehler für die untersuchten WSS in verschiedenen Bildbereichen. Dies spiegelt auch die quantitative Probandenbewertung wieder, da die Punktebewertungen der verschiedenen Bildbereiche zwischen den WSS ebenfalls unterschiedlich ausfallen. Anhand dieser Unterschiede lässt sich feststellen, dass die WSS einen grundsätzlichen Einfluss auf die Abbildungsfehler im virtuellen Bild eines AR HUD besitzt. Demnach bestehen zwar keine subjektiv wahrnehmbaren Unterschiede in der Gesamtqualität zwischen den WSS, allerdings zwischen den verschiedenen Bildbereichen innerhalb eines virtuellen Bildes einer WSS. Die Annahme von Hypothese H3 widerspricht dieser Feststellung. Die detaillierte Analyse von Hypothese H3 weist in Kombination mit der Vielzahl qualitativer Kommentare zu unterschiedlichen Qualitäten in bestimmten Bildbereichen dennoch darauf hin, dass Kund:innen unterschiedliche Qualitäten innerhalb eines virtuellen Bildes wahrnehmen. All

diese in Teilen widersprüchlichen Erkenntnisse, zeigen die Komplexität der Thematik auf und sind relevant für die Forschungsfragen (A), (B) und (C).

Des Weiteren ist anhand der Ablehnung von Hypothese H4 festzustellen, dass die wahrgenommene Qualität des virtuellen Bildes davon abhängig ist ob eine statische oder dynamische Kopfposition vorliegt. Bei dynamischen Kopfposition nehmen die Proband:innen die schlechteste virtuelle Bildqualität wahr. Hypothese H4 beantwortet damit ebenfalls in Teilen Forschungsfragen (A) und (B).

Zuletzt beantwortet die Untersuchung zu Hypothese H2 Forschungsfrage (D). Zwischen den IQN für Abbildungsfehler und den subjektiven Wahrnehmungen der Proband:innen lassen sich zunächst keine Zusammenhänge erkennen. Allerdings ergeben sich über die *Summe prozentualer Abweichungen* der einzelnen IQN Korrelationen mit den Probandenbewertungen und liefern damit einen Ansatz, welcher es ermöglicht von den IQN einer WSS auf deren wahrgenommene virtuelle Bildqualität zu schließen. Dieser Ansatz wird ergänzt, durch die Erweiterung der IQN um lokale Divergenzen, sowie dem Aufteilen des virtuellen Bildes in verschiedene Bewertungsbereiche.

Die Probandenstudie gibt damit Aufschluss über die auftretenden Abbildungsfehler im virtuellen Bild eines AR HUD und wie Kund:innen diese subjektiv wahrnehmen (Forschungsfragen A und B). Die verschiedenen WSS haben einen eher geringeren Einfluss auf die gesamtheitlich wahrgenommene virtuelle Bildqualität und es sind keine signifikanten Einflüsse festzustellen. Allerdings unterscheiden sich die WSS hinsichtlich unterschiedlich wahrgenommenen Qualitäten innerhalb eines virtuellen Bildes durch die Proband:innen (Forschungsfrage C). Über die *Summe prozentualer Abweichungen* der einzelnen IQN ergibt sich eine Korrelation mit den Probandenbewertungen. Zudem können durch die Erweiterung der IQN um lokale Divergenzen, sowie dem Aufteilen des virtuellen Bildes in verschiedene Bereiche, weitere Zusammenhänge hergestellt werden (Forschungsfrage D).

## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit stellt die erstmalige Bewertung eines AR HUD Systems mit tatsächlichen seriennahen Komponenten im Rahmen einer Studie dar. Die Probandenstudie ermöglicht die Überprüfung der IQN Toleranzgrenzwerte, welche bisher für alle WSS überschritten sind und demnach nicht zum Einsatz in einem Fahrzeug mit AR HUD kommen dürften. Die Studie liefert unter anderem die Erkenntnis, dass bei Betrachtung nur einer WSS (*Between-Subjects-Design*) kein Qualitätsunterschied zwischen den virtuellen Bildern der drei

untersuchten WSS feststellbar ist. Diese Erkenntnis basiert auf der Annahme von Hypothese H1. Auch wenn statistisch nur in Teilen eindeutige Signifikanzen hinsichtlich *unterschiedlich wahrnehmbarer Qualitäten innerhalb eines virtuellen Bildes* nachzuweisen sind, ist aufgrund der Vielzahl expliziter Kommentare davon auszugehen, dass Fahrer:innen diese definitiv wahrnehmen. Diese Qualitätsunterschiede, vor allem bzgl. *vertikaler Divergenzen*, könnten bei der Verwendung eines AR HUD störend wirken. Diese Störung in der Wahrnehmung eines AR HUD kann die Kundenzufriedenheit der Fahrer:innen einschränken und im schlimmsten Fall die Fahrsicherheit bei Verwendung eines AR HUD beeinträchtigen anstatt diese zu erhöhen.

Da vor allem die jeweils äußereren Bereiche des virtuellen Bildes und damit die äußereren Reflektionsbereiche auf der WSS die schlechten Bewertungen und Kommentare hinsichtlich wahrnehmbarer Abbildungsfehler erhalten, ist in der weiteren Entwicklung von AR HUD WSS eine Verbesserung dieser Bereiche anzustreben. Dies kann sowohl über die Prozessoptimierung der Windschutzscheibenproduktion, als auch der Designoptimierung der Windschutzscheibenfläche hinsichtlich Radienverläufen umgesetzt werden. Die Einführung neuer Qualitätskennzahlen kann an dieser Stelle unterstützend wirken. Diese können die Feststellung auftretender Abbildungsfehler ermöglichen und dadurch auch deren Verbesserung anhand genannter Maßnahmen sichtbar machen.

Schlussendlich tragen die Ergebnisse der Probandenstudie zu einem besseren Verständnis der Wahrnehmung von Abbildungsfehlern im virtuellen Bild eines AR HUD bei. Damit kann in der Entwicklung von AR HUD WSS eine Fokussierung auf kennzahlenbasierte Erfassung, produktionstechnische Optimierung sowie Weiterentwicklung des WSS-Designs zur Reduktion heterogener Bildqualitäten erfolgen. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass zukünftigen Nutzer:innen eines AR HUD ein qualitativ hochwertiges virtuelles Bild zur Verfügung steht, welches keine als störend wahrnehmbaren Abbildungsfehler aufweist. Diese makellose Darstellung ermöglicht sowohl die Erhöhung der Fahrsicherheit als auch die Erhöhung der Kundenzufriedenheit bei der Verwendung eines AR HUD.

## 5. Proof of Concept: P-polarisiertes Head-up Display

### Verweis auf allgemeine Beiträge

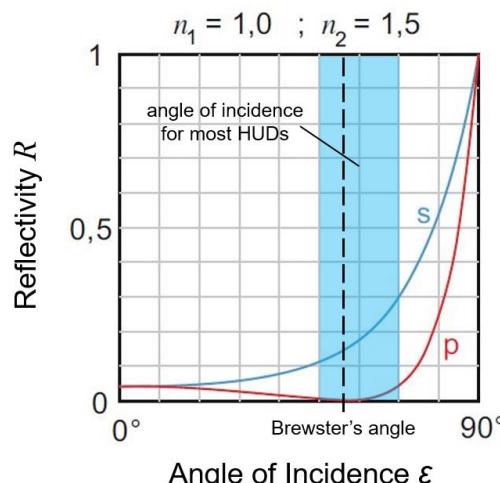
Dieses Kapitel behandelt die Konzeptprüfung eines p-polarisierten HUD Systems. Teile des Kapitels sind in der Publikation von Wagner und Muth (2021) zu finden. Erstautor der Publikation ist Daniel Wagner. Planung und Durchführung der Probandenstudie zum Leuchtdichteverhältnis zwischen primärem und sekundärem Bild, wurden durch die Bachelorarbeit von Konstantin Muth unterstützt (Arbeit unter Sperrvermerk). Die Initiierung und Betreuung der Bachelorarbeit erfolgte durch Daniel Wagner.

Alle derzeit am Markt erhältlichen HUD Systeme basieren auf s-polarisiertem Licht. Der Grund hierfür ist die vergleichsweise hohe Reflektivität von s-polarisiertem Licht an der Grenzfläche zwischen *Luft* und *Glas*, im für HUD Systeme üblichen Bereich der Einfallswinkel von Lichtstrahlen an der WSS (siehe Abb. 5.1). Dadurch besteht das für die Fahrer:in letztendlich sichtbare virtuelle Bild zum größten Teil aus s-polarisiertem Licht. Dies bringt den Nachteil mit sich, dass das virtuelle Bild beim Tragen einer *polarisierenden Sonnenbrille* kaum zu erkennen ist, da diese s-polarisiertes Licht absorbiert und damit das HUD nicht mehr nutzbar ist. Hintergrund ist die bereits benannte hohe Reflektivität von s-polarisiertem Licht an Glas- oder auch bspw. Wasseroberflächen. Durch die Verwendung einer polarisierenden Sonnenbrille können diese, oft stark blendenden, Reflektionen ausgelöscht oder zumindest stark abgeschwächt werden, da die Brillengläser s-polarisierte Lichtwellen absorbieren. Auf diese Weise verringert sich die Blendung der Augen für die Nutzer:innen.

Aus diesem Grund erfreuen sich stetig mehr Nutzer:innen an der Verwendung polarisierender Sonnenbrillen, vor allem bei deren Einsatz in der Nähe von Gewässern oder auch vermehrt beim Fahren eines PKW [14,58]. Beim Fahren allgemein bekannte Blendungssituationen an hellen und sonnigen Tagen sind z.B. die Blendung durch andere Fahrzeuge oder nasse bzw. schneebedeckte Fahrbahnen und die Fahrbahnperipherie. Die Blendung durch andere Fahrzeuge entsteht durch die Reflektion von Sonnenstrahlen an den Glasscheiben oder lackierten Anbauteilen der Fahrzeuge. Die Blendung durch nasse oder schneebedeckte Fahrbahnen entsteht durch die Reflektion von Sonnenstrahlen am Wasser oder Schnee auf der Fahrbahn. In allen beschriebenen Fällen ist das reflektierte Licht zu großen Teilen s-polarisiert, wodurch das Tragen einer polarisierenden Sonnenbrille die Blendung reduziert.

Eine Vielzahl von Studien und Untersuchungen zeigt, dass die Verwendung eines HUD die Fahrsicherheit erhöht [35,39,43,52,57,65,91]. In den Abschnitten 3.1 und 3.2 wird deutlich, dass der Stellenwert von HUD aufgrund seiner Vorteile in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat und auch in Zukunft weiter zunehmen wird. Diese Prognose lässt sich sowohl anhand der Vergrößerung der virtuellen Bildfläche als auch der Zunahme von Anzeigeninhalten und Funktionen für HUD Systeme feststellen [43,110]. Daher sind in den nächsten zehn Jahren auch Fahrzeugkonzepte vorstellbar, in welchen das HUD die heutig klassische, meist digitale, Instrumententafel substituiert. Genau aus diesen Gründen ist es für Fahrzeughersteller wichtig, die Informationen im virtuellen Bild des HUD unter allen Umweltbedingung zugänglich zu machen, sowohl bzgl. Wetterverhältnissen oder auch dem Tragen polarisierender Sonnenbrillen durch Fahrer:innen.

Eine mögliche Lösung, um das virtuelle Bild eines HUD auch beim Tragen einer polarisierenden Brille sichtbar zu machen, ist ein *p-polarisiertes HUD System*. Falls es möglich sein sollte ein solches p-polarisiertes HUD System technisch umzusetzen, wäre das virtuelle Bild auch beim Tragen polarisierender Sonnenbrillen sichtbar, da diese p-polarisiertes Licht transmittieren. Um ein p-polarisiertes HUD umzusetzen, müsste allerdings das optische HUD System verändert und modifiziert werden. Abb. 5.1 zeigt den Verlauf der Reflektivität  $R$  von s- und p-polarisiertem Licht an der Grenzfläche zwischen Luft und Glas in Abhängigkeit des Einfallswinkel. Der blau markierte Bereich in Abb. 5.1 repräsentiert die für konventionelle HUD Systeme üblichen Einfallswinkeln der vom Projektor kommenden Lichtstrahlen an der WSS. Dieser liegt in der Regel zwischen  $50^\circ$  bis  $70^\circ$  und schließt damit den Spezialfall der *Transmission und Reflektion im Brewster-Winkel* für linear polarisierte Lichtwellen am Glas ein (siehe Abschnitt 2.2.3). Im Bereich des Brewster-Winkels, dieser liegt bei ca.  $56^\circ$ , ist die Reflektivität p-polarisierten Lichts am Glas nahe 0%. Daher ist es nicht alleine ausreichend die Polarisationsrichtung der vom HUD Projektor emittierten Lichtwellen zu verändern.

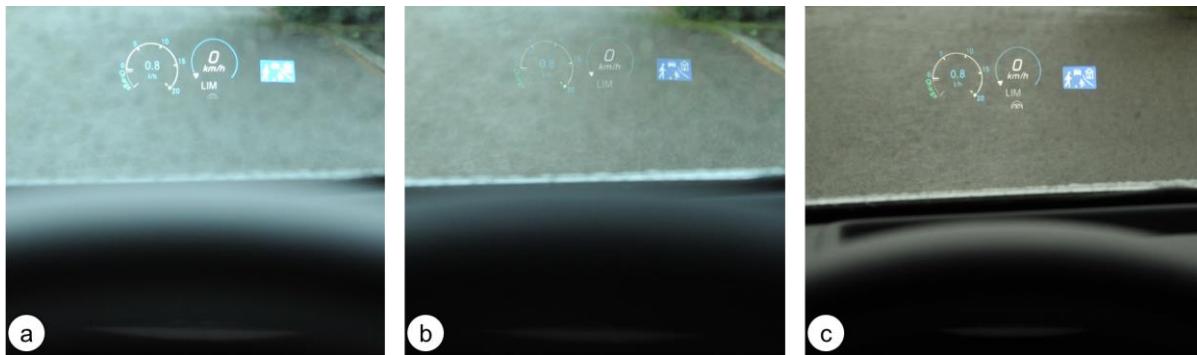


**Abb. 5.1:** Reflektivität  $R$  in Abhängigkeit der Einfallswinkels  $\varepsilon$  für s- und p-polarisiertes Licht an der Grenzfläche zwischen Luft und Glas, sowie Markierungen für den Brewster-Winkel und Bereich von Einfallswinkeln für konventionelle HUD Systeme

Erste technische Möglichkeiten zur Realisierung eines p-polarisierten HUD liefern bspw. Derlofske et al. (2019). Die Herangehensweise macht sich dabei die zuvor beschriebene ausbleibende Reflektion p-polarisierten Lichts an Glas zu Nutze. Derlofske et al. (2019) schlagen vor, einen HUD Projektor zu verwenden, welcher p-polarisiertes Licht emittiert und gleichzeitig eine zusätzlich aktive optische Schicht in den Windschutzscheibenverbund zu integrieren, die p-polarisiertes Licht reflektiert. Auf diese Weise soll zum einen das virtuelle Bild mit polarisierenden Sonnenbrillen sichtbar sein und zum anderen auch das sonst übliche Doppelbild eliminiert werden. Das Auftreten des Doppelbilds, welches normalerweise durch die Reflektion von s-polarisiertem Licht an der Innen- und Außenseite der WSS entsteht (siehe Abschnitt 2.4), bleibt aus, da kein vom HUD Projektor emittiertes s-polarisiertes Licht die WSS erreicht. Entspricht der Einfallswinkel des p-polarisierten Lichts dem Brewster-Winkel, tritt keine Reflektion des p-polarisierten Lichts an der Innen- und Außenseite der WSS auf. Dadurch soll der Verzicht teurer keilwinkligen PVB-Folien im Windschutzscheibenverbund möglich sein. Wie die Untersuchungen zur Realisierung eines p-polarisierten HUD im Folgenden allerdings zeigen, entsteht auch bei einem p-polarisierten HUD ein Doppelbildfehler. Die Ausprägung dieses Doppelbildfehlers ist im Weiteren zu untersuchen und falls nötig sind ein Grenzwert sowie mögliche Lösungsansätze zu entwickeln.

Abb. 5.2 zeigt einen Vergleich der Sichtbarkeit eines s-polarisierten und p-polarisierten HUD bei Betrachtung des virtuellen Bildes mit einer polarisierenden Brille. Im linken Bereich Abb. 5.2 a) ist die Wahrnehmung eines konventionellen s-polarisierten HUD ohne Tragen einer polarisierenden Brille abgebildet. In der Mitte ist die Wahrnehmung des gleichen s-polarisierten HUD, aber in diesem Fall beim Tragen einer polarisierenden Brille zu sehen (Abb. 5.2 b).

Während in Abb. 5.2 a) das virtuelle Bild sehr hell zu erkennen ist, ist das gleiche virtuelle Bild bei derselben eingestellten Helligkeit des HUD mit einer polarisierenden Brille kaum sichtbar. In Abb. 5.2 c) ist die Wahrnehmung des virtuellen Bildes eines p-polarisierten HUD mit aufgesetzter polarisierender Brille zu sehen. Im Vergleich zu Abb. 5.2 b) ist in Abb. 5.2 c) trotz dem Tragen einer polarisierenden Brille das virtuelle Bild des p-polarisierten HUD noch deutlich zu erkennen.



**Abb. 5.2:** Wahrnehmung des virtuellen Bildes mit und ohne polarisierender Sonnenbrille für das s-polarisierte und das p-polarisierte HUD. (a) Konventionelles s-polarisiertes HUD ohne polarisierende Sonnenbrille; (b) konventionelles s-polarisiertes HUD mit polarisierender Sonnenbrille; (c) neuartiges p-polarisiertes HUD mit polarisierender Sonnenbrille

Aufgrund der benannten Vorteile eines p-polarisierten HUD, soll in diesem Kapitel eine erste Konzeptprüfung dieses neuartigen Systems stattfinden, da in der analysierten Literatur keine vergleichbaren ausführlichen Untersuchungen vorliegen. Dabei liegt der Fokus darauf eine möglichst kostenneutrale Umsetzung eines p-polarisierten HUD ggü. konventionellen s-polarisierten HUD zu entwickeln. Ist dies nicht der Fall, überwiegt möglicherweise der Kostenvorteil des s-polarisierten HUD den zusätzlichen Kundennutzen des p-polarisierten HUD. Damit stellt dieses Kapitel den *Untersuchungsbereich 2* der Dissertation dar und behandelt die folgenden Forschungsfragen (siehe Abschnitt 1.2 Zielsetzung & Forschungsfragen):

- (E) Wie könnte eine kostenneutrale Realisierung eines HUD Systems aussehen, welche die Sichtbarkeit des virtuellen Bildes mit polarisierender Sonnenbrille ermöglicht?
- (F) Welche potentiellen Abbildungsfehler und Industrialisierungsschwierigkeiten könnten bei der Realisierung eines HUD Systems auftreten, das mit polarisierender Sonnenbrille sichtbar ist?
- (G) Wie könnten Ansätze zur Quantifizierung sowie Lösung potentieller Abbildungsfehler und weiterer Schwierigkeiten aussehen?

Die Analyse der Forschungsfragen erfolgt im Rahmen verschiedener Untersuchungen. Dazu findet sich im ersten Schritt eine grundsätzliche theoretische Entwicklung und Betrachtung möglicher HUD Systeme statt, welche vollständig oder zumindest in großen Teilen p-polarisiertes Licht verwenden (siehe Abschnitt 5.1). Anschließend erfolgt die Analyse dieser p-polarisierten HUD Systeme hinsichtlich potentieller Abbildungsfehler und Schwierigkeiten in der Industrialisierung (siehe Abschnitte 5.1.2 und 5.2). Aus den sich dabei ergebenden Erkenntnissen und Fragestellungen sollen weitere Untersuchungen vorgeschlagen, geplant und durchgeführt, sowie mögliche Lösungsansätze erarbeitet werden (siehe Abschnitt 5.2.3).

Die Untersuchung in diesem Kapitel sollen damit erstmalig eine vollumfängliche Betrachtung eines p-polarisierten HUD darstellen und auf diese Weise die Möglichkeiten sowie Limitationen für eine kommerziell sinnvolle Realisierung eines p-polarisierten HUD aufzeigen.

## 5.1. Technisches Konzept eines p-polarisierten HUD

In diesem Abschnitt findet eine grundsätzliche Analyse möglicher HUD Systeme statt, welche vollständig oder zumindest in großen Teilen p-polarisiertes Licht verwenden. Diese ergibt die Basis zur Untersuchung eines p-polarisierten HUD bzgl. möglicher Abbildungsfehler und Industrialisierungsschwierigkeiten.

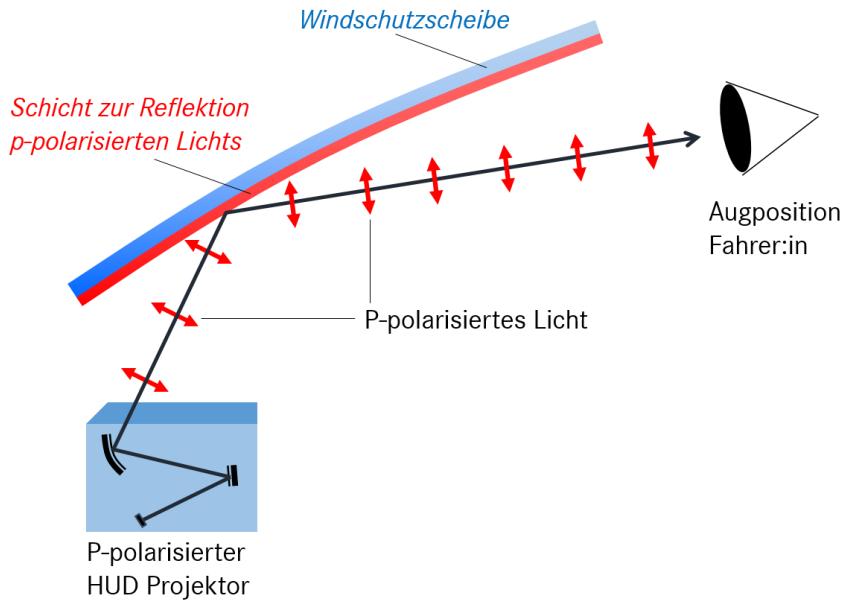
Der bisher etablierte Aufbau s-polarisierter HUD Systeme basiert auf der Reflektivität s-polarisierten Lichts an der WSS, also der Grenzfläche zwischen Luft und Glas. Die Reflektivität des s-polarisierten Lichts an der WSS ist deutlich höher als die Reflektivität p-polarisierten Lichts (siehe Abb. 5.1). Aus diesem Grund fokussiert sich die Auslegung bisheriger HUD Systeme auf die Verwendung von s-polarisiertem Licht. Auf diese Weise kann die Energieeffizienz des HUD Systems verbessert werden, da weniger Lichtleistung zur Erzeugung der gewünschten Helligkeit im virtuellen Bild nötig ist. Um dies umzusetzen erfolgt in konventionellen HUD Systemen die s-polarisierte Ausrichtung der Lichtwellen, welche die PGU des HUD Projektors in Richtung der Spiegel im Projektor und die WSS verlassen. Die Reflektion des s-polarisierten Lichts führt schlussendlich zu einem s-polarisierten virtuellen Bild für die Fahrer:in, dessen Sichtbarkeit allerdings beim Tragen einer polarisierenden Sonnenbrille stark eingeschränkt ist. Dieser Nachteil wird bisher bewusst von den OEM akzeptiert, obwohl bereits eine steigende Anzahl von Kund:innen dieses Problem wahrnimmt (siehe Foreneinträge von Kund:innen). Die Gründe hierfür basieren vor allem auf drei Aspekten. Zum ersten verwendet bisher nur ein kleiner Teil der Bevölkerung polarisierende

Sonnenbrillen. Daher ist das auftretende Problem zwar für die betroffenen Kund:innen äußerst ärgerlich, die Gesamtanzahl jedoch eher gering. Zum zweiten ist die Realisierung eines p-polarisierten HUD kostspielig. Sowohl die Integration einer zusätzlichen optischen Schicht in die WSS, welche p-polarisiertes Licht reflektiert, sowie die Anpassung der HUD PGU zur Aussendung p-polarisierten Lichts erhöhen die Entwicklungs- und Stückpreiskosten. Und zum dritten besteht bisher ein Mangel an technischen Lösungen sowie gesamtheitlicher Untersuchungen eines solchen Systems. Diese drei Aspekte müssen aufgrund der steigenden Relevanz des HUD aber erneut hinterfragt und hinsichtlich der Umsetzung eines p-polarisierten HUD untersucht werden.

Um ein p-polarisiertes HUD realisieren zu können, ist es nötig die Polarisationsrichtung des HUD Projektors zu ändern. Dazu muss die lineare Polarisationsrichtung, also die Schwingungsrichtung der Lichtwellen, eines HUD Projektors um  $90^\circ$  von s-polarisiertem Licht auf p-polarisiertes Licht gedreht werden. Nur wenn p-polarisiertes Licht den HUD Projektor verlässt kann letztlich ein p-polarisiertes virtuelles Bild für die Fahrer:in dargestellt werden. Die Drehung der Lichtpolarisation muss vor dem Verlassen des HUD Projektors umgesetzt werden. Dabei ist sowohl der Einsatz von Verzögerungssplatten (Retarder) nach einer konventionellen s-polarisierten PGU, als auch die Anpassung der gesamten PGU denkbar. Ein Retarder kann die Phase von elektromagnetischen Wellen, in Abhängigkeit ihrer Schwingungsrichtung, verändern. Materialien mit dieser Eigenschaft erhalten die Bezeichnung *doppelbrechend*. Hintergrund sind die unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten verschiedener Schwingungsrichtungen der Lichtwellen in diesen Materialien. Im beschriebenen Fall muss der Retarder eine Drehung der Schwingungsrichtung der Lichtwellen von  $90^\circ$  umsetzen. Hierfür ist zwischen zwei zueinander senkrechten Wellen die Phasenverschiebung einer halben Wellenlänge  $\lambda$  nötig. Ein Retarder mit der Funktion die Polarisationsrichtung um  $90^\circ$  zu drehen wird daher auch als  $\lambda/2$ -Platte bezeichnet [25]. Die Vorteile beim Einsatz eines Retarders liegen vor allem in der simplen, kostengünstigen sowie flexiblen Umsetzung, da ansonsten keine Änderungen an der PGU nötig wären. Die Nachteile eines Retarders dagegen liegen im grundsätzlichen Transmissionsverlust sowie dem Verlust p-polarisierter Lichtanteile mit entsprechend höheren s-polarisierten Lichtanteilen gegenüber einer Anpassung der gesamten PGU [26]. Grund hierfür ist, dass die Phasenverschiebung abhängig von der Wellenlänge ist. Entsprechend kann nur für einen engen Wellenlängenbereich die optimale Phasenverschiebung und damit Drehung der Polarisationsrichtung um exakt  $90^\circ$  umgesetzt werden.

Die Anpassung der gesamten PGU betrifft primär die Änderung der verwendeten Polarisationsfilter zur Ausrichtung der Lichtpolarisation sowie des TFT LCD. Vor allem der Wechsel von bisher verwendeten TFT LCD, welche für den Einsatz in s-polarisierten Systemen ausgelegt sind, auf TFT LCD für den Einsatz in p-polarisierten System, stellt einen Kostenfaktor dar. Grund hierfür ist, dass das TFT LCD für s-polarisierte HUD den Standard darstellt und entsprechend eine gute sowie kostengünstige Verfügbarkeit aufweist. Trotz dieses Kostennachteils gegenüber dem Einsatz eines Retarders zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD Projektors, sprechen die geringeren Transmissionsverluste sowie der höhere Anteil p-polarisierten Lichts aus technischer Sicht für eine Anpassung der PGU. Grundsätzlich ist es wichtig, dass möglichst rein linear p-polarisiertes Licht die WSS erreicht. Eine Erläuterung hierzu und welche Abbildungsfehler ansonsten auftreten können, sowie Vorschläge wie ein hoher p-polarisierter Lichtanteil zu erreichen ist, findet sich in Abschnitt 5.2.3.

Allerdings ist es nicht alleine ausreichend, die lineare Polarisationsrichtung der Lichtwellen des HUD Projektors zu verändern, da wie bereits erläutert p-polarisiertes Licht eine sehr geringe bis hin zu keiner Reflektivität an der WSS besitzt. Würde man die geringere Reflektivität des p-polarisierten Lichts am Glas der WSS über eine Erhöhung der Leuchtdichte der PGU kompensieren wollen, wäre ein um ein Vielfaches höherer Lichtstrom der Leuchtquelle nötig. Dieser höhere Lichtstrom der Leuchtquelle, welchen i.d.R. Leuchtdioden liefern, würde zu deutlich erhöhten Temperaturen innerhalb der PGU führen und folglich das TFT LCD dauerhaft schädigen. Entsprechend wäre eine Anpassung des Kühlkonzeptes für die PGU nötig, welches bisher in den meisten Fällen ausschließlich über die passive Abkühlung wärmeabführender Materialien und Kühlkörper umgesetzt ist. Der Einsatz aktiver Kühlelemente, wie z.B. ein Kältemittelkreislauf oder Belüftung, ist aus verschiedenen Gründen zwingend zu vermeiden (Kosten, Bauraum, NVH). Daher ist es essentiell die Reflektivität des p-polarisierten Lichts am Windschutzscheibenverbund deutlich zu erhöhen. In Abb. 5.3 ist der schematische Aufbau eines solchen p-polarisierten HUD Systems zu sehen.



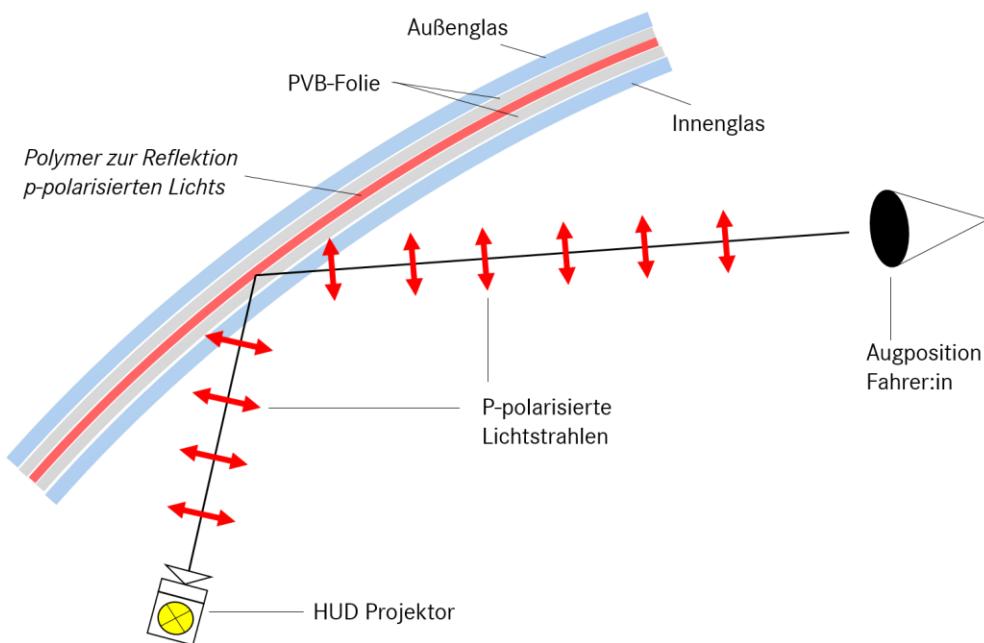
**Abb. 5.3: Schematischer Aufbau eines p-polarisierten HUD Systems.** Das vom HUD Projektor emittierte p-polarisierte Licht wird an einer speziell für diesen Anwendungsfall ausgelegten optischen Schicht im Windschutzscheibenverbund reflektiert.

Für die Erhöhung der Reflektivität p-polarisierten Lichts an der WSS bestehen verschiedene Möglichkeiten. Eine naheliegende Lösung ist das Einbringen einer zusätzlichen optischen Schicht in den Windschutzscheibenverbund, welche im Bereich typischer Einfallswinkel des Lichts an der WSS eine zumindest ähnlich hohe Reflektivität p-polarisierten Lichts besitzt wie Glas für s-polarisiertes Licht (siehe Abb. 5.1). Denkbar sind hier sowohl die Verwendung einer Folie, welche in die PVB Folie integriert wird [20], oder auch eine Beschichtung auf einer der vier Glasflächen der WSS (siehe Abb. 2.10 in Abschnitt 2.3.1). Diese beiden Lösungsansätze zur Integration einer reflektierenden optischen Schicht für p-polarisiertes Licht werden im Folgenden erläutert.

### 5.1.1. P-polarisierte Reflektion an der Windschutzscheibe

Die Reflektivität der WSS für p-polarisiertes Licht kann durch die Integration eines *reflektierenden Polymers* in den Windschutzscheibenverbund realisiert werden. Ähnlich wie bei beschichteten Polymeren, welche elektromagnetische Wellen im Infrarotbereich reflektieren und bereits im automobilen Bereich im Einsatz sind, dient das Polymer selbst als Trägermaterial für eine Vielzahl dünner Schichten mit Dicken im Nano- bis Mikrometer-Bereich. Diese Schichten besitzen verschiedene Brechkräfte. Über die korrekte Auslegung dieses Schichtaufbaus kann für elektromagnetische Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen eine hohe Reflektivität erreicht werden. Dadurch ist es möglich einen ausgewählten Teil

elektromagnetischer Wellen mit bestimmten Wellenlängen an einem Schichtaufbau zu reflektieren, während elektromagnetische Wellen anderer Wellenlängen transmittieren. Auf diese Weise kann der Schichtaufbau so ausgelegt werden, dass dieser p-polarisiertes Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich reflektiert. Bei Integration eines solchen beschichteten Polymers in den Windschutzscheibenverbund, kann das Polymer das vom HUD Projektor kommende p-polarisierte Licht reflektieren und ein p-polarisiertes virtuelles Bild erzeugen, welches auch beim Tragen einer polarisierenden Sonnenbrille sichtbar ist. In Abb. 5.4 ist der prinzipielle Aufbau einer WSS mit einem integrierten Polymer zu sehen, welches p-polarisiertes Licht reflektiert. Dieses sollte im Windschutzscheibenverbund immer zwischen zwei PVB-Folien integriert werden. Eine Erklärung hierfür ist im folgenden Abschnitt 5.1.2 zu finden.



**Abb. 5.4: Schematischer Aufbau eines p-polarisierten HUD Systems mit in der WSS integriertem Polymer zur Reflektion p-polarisierten Lichts**

Nach demselben Prinzip kann zur Reflektion p-polarisierten Lichts statt einer Folie auch eine direkte Beschichtung des Glases zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD Verwendung finden. Analog zum zuvor beschriebenen Ansatz einer beschichteten Folie für die Reflektion p-polarisierten Lichts, bei welcher das eingesetzte Polymer als Trägermaterial fungiert, kann auch direkt das Glas eine Beschichtung aufnehmen. Die Funktionsweise entspricht dabei exakt dem zuvor erläuterten Schichtaufbau, bei welchem nun das Glas als Trägermaterial für eine Vielzahl dünner Schichten mit Dicken im Nano- bis Mikrometer-Bereich verwendet wird. Die unterschiedlichen Brechkräfte der Schichten erzeugen wieder die gewünschte Reflektion bestimmter Wellenlängen für p-polarisierte elektromagnetische Wellen. Theoretisch kommen

alle vier Scheibenflächen der WSS für die Beschichtung mit der reflektierenden Schicht für p-polarisiertes Licht in Frage. Damit diese keine Beschädigung erfährt ist allerdings vor allem von einer Beschichtung auf der Außenfläche *Fläche 1* abzusehen. Im folgenden Abschnitt findet sich eine Analyse der grundsätzlichen Herausforderungen bei der Integration einer zusätzlich optisch aktiven Schicht für die Reflektion p-polarisierten Lichts und damit der Umsetzung eines p-polarisierten HUD. Diese betreffen sowohl eine zufriedenstellende Erfüllung der bisherigen und neuen Funktionen einer WSS, als auch allgemeine Herausforderungen in der Produktion und Industrialisierung.

### 5.1.2. Herausforderungen der Integration einer optisch reflektierenden Schicht in den Windschutzscheibenverbund

Die Integration einer zusätzlich optisch aktiven Schicht in die WSS bringt verschiedene Herausforderungen in deren Industrialisierung mit sich. Damit die WSS ihre *mechanischen Anforderungen* erfüllen kann, ist es essentiell, dass sich die Glasscheiben fest mit der PVB-Folie bzw. dem eingesetzten Folienverbund verbinden. Nur wenn dies der Fall ist, kann die WSS im Crashfall ihrer Aufgabe nachkommen. Dazu gehört zum einen die Aufnahme von Kräften zur Erhöhung der Steifigkeit der Karosse und Unterstützung des Airbags für die Beifahrer:in, welcher die WSS für seine Ausbreitung benötigt. Zum anderen schützt die WSS die Passagiere vor dem Eindringen von Außenteilen in den Innenraum und muss mit einer starken Haftung zwischen Glas und Folienverbund das Ablösen von Glassplittern verhindern. An dieser Stelle ist es die Aufgabe der Scheiben-, PVB- und Polymerlieferanten die Materialien des Windschutzscheibenverbunds sowie die jeweiligen Prozessparameter so anzupassen, dass die WSS die mechanischen Anforderungen weiterhin erfüllt. Die Erfüllung der mechanischen Anforderungen hat dabei unabhängig davon zu erfolgen, ob ein beschichtetes Polymer oder beschichtetes Glas zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD Einsatz findet.

Die zusätzliche optische Schicht darf zudem die *Transmissionsoptik* nicht beeinträchtigen. Dazu gehört zum einen die mögliche Farbverschiebung bei Durchsicht, welche subjektiv zu bewerten ist und möglichst neutral ausfallen sollte. Die Farbverschiebung ist in erster Linie von der verwendeten optischen Schicht zur Reflektion p-polarisierten Lichts abhängig. Entsprechend kann diese hin zu einer möglichst farbneutralen Erscheinung optimiert werden. Falls dies nicht ausreichen sollte, können zusätzlich Farbanpassungen des Glases und des PVB stattfinden. Tatsächlich kritisch ist allerdings die Transmission im sichtbaren Wellenlängenbereich  $T_L$ , welche aufgrund gesetzlicher Regulierung größer 70 % betragen

muss. Dieser Transmissionswert  $T_L > 70\%$  muss für die WSS auch in Kombination mit einem Schutz vor Infrarotstrahlung bzw. der Funktion einer vollflächigen Windschutzscheibenheizung erreichbar sein. Da hierfür häufig metallisch reflektierende Beschichtungen Verwendung finden, reduzieren diese den Transmissionswert  $T_L$ , wodurch dieser für WSS mit IR-Schutz nur knapp über den gesetzlich geforderten 70 % liegen. Entsprechend muss bei der Zusammenstellung des Aufbaus der WSS die Einhaltung des Transmissionswerts  $T_L > 70\%$  sichergestellt sein. Stellhebel hierfür sind die Wahl passender Beschichtungen für den IR-Schutz bzw. für die vollflächige Heizfunktion und der Einsatz von Klarglas statt Grünglas für die Innen- und Außenscheibe der WSS. Um derartige Anpassungen kostenneutral umzusetzen, sind für die Optimierung der Farbverschiebung und Transmissionswerte möglichst bereits am Markt verfügbare Materialien und Lösungen einzusetzen. Die letztendlich verwendeten Materialien für den Windschutzscheibenverbund sind in Abstimmung zwischen OEM und Lieferanten auszuwählen.

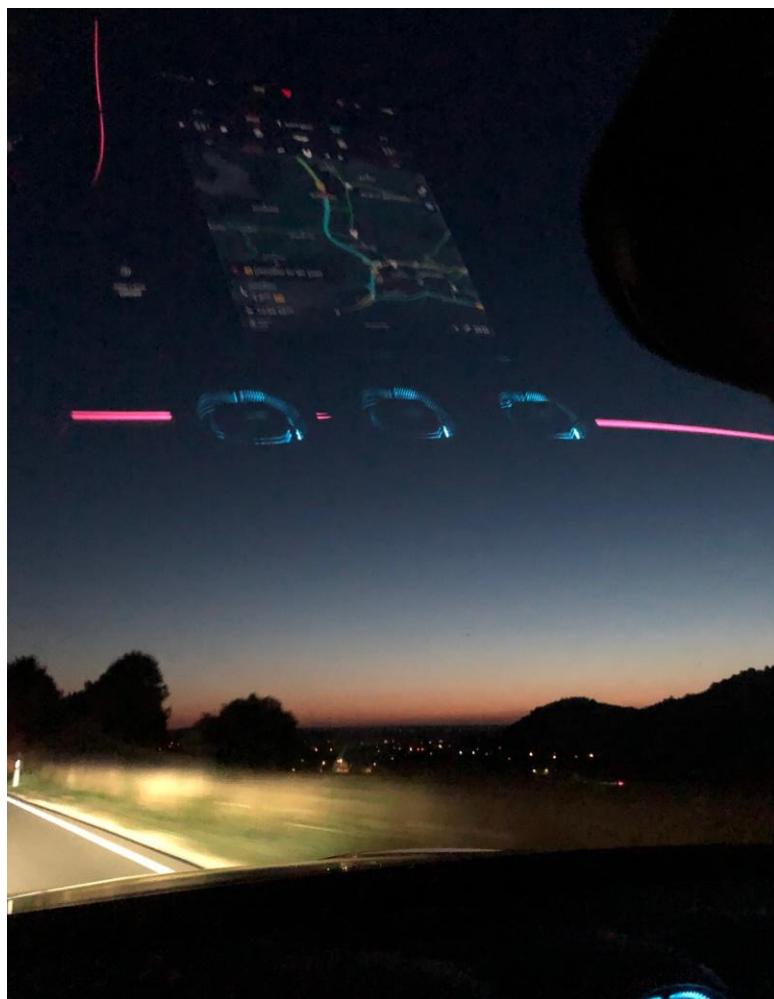
Aufgrund der reflektierenden Eigenschaft für p-polarisiertes Licht der zusätzlichen optischen Schicht, verändert sich auch die *Reflektionsoptik* der WSS. Dadurch kann sich zum einen das äußere optische Erscheinungsbild der WSS verändern, wie es bereits für WSS mit metallisch reflektierenden Beschichtungen zum IR-Schutz oder der vollflächigen Heizfunktion bekannt ist (siehe Abb. 5.5). Da das äußere Erscheinungsbild keiner gesetzlichen Regulierung unterliegt, ist dieses erneut subjektiv zu bewerten und sollte möglichst neutral erscheinen. Die äußere Erscheinung hängt maßgeblich von den Reflektionseigenschaften der optischen Schicht ab.



**Abb. 5.5: Mercedes-Benz S-Klasse (BR223) mit metallisch beschichteter WSS für vollflächige Heizfunktion**

Die erhöhte Reflektivität p-polarisierten Lichts führt allerdings auch zu einer erhöhten Reflektion des Fahrzeuginnenraums in der WSS. Dies kann vor allem in zwei Fällen sehr störend für die Fahrer:in sein. Im ersten Fall führen sehr helle Lichtverhältnisse durch die

Reflektion der Instrumententafel zu einer schlechteren Wahrnehmung der Umwelt durch die Fahrer:in bzw. zu einer Blendung der Fahrer:in. Der zweite kritische Fall tritt bei sehr dunklen Lichtverhältnissen auf, wenn sich Ambiente Lichtleiter, beleuchtete Zierteile oder Displays in der WSS spiegeln und auf diese Weise die Fahrer:in bei Nacht stören oder sogar blenden. In Abb. 5.6 ist beispielhaft die Innenraumreflektion Ambienter Lichtleiter, beleuchteter Luftdüsen und des Zentraldisplays der aktuellen Mercedes-Benz C-Klasse (BR206) in dunklen Lichtverhältnissen aus Blickrichtung einer Fahrer:in zu sehen. Auch in diesem Fall hängt die Reflektivität, und damit Intensität der Reflektionen des Fahrzeuginnenraums, von den Reflektionseigenschaften der optisch aktiven Schicht ab. Zusätzlich kann die vorausschauende Gestaltung des Fahrzeuginnenraums zur Verringerung von Reflektionen in der WSS beitragen. Dazu zählen der Einsatz stark absorbierender Materialien für die Instrumententafel oder die Positionierung Ambienter Lichtleiter und Chromzierteilen in Bereichen, welche keine für die Fahrer:in sichtbaren Reflektionen in der WSS erzeugen.



**Abb. 5.6: Reflektion Ambienter Lichtleiter, beleuchteter Luftdüsen und des Zentraldisplays einer Mercedes-Benz C-Klasse (BR206) an einer Grünglas Serien-WSS**

Wird als reflektierende Schicht für p-polarisiertes Licht eine Folie eingesetzt, kann deren Reflektion eine *Welligkeit* aufweisen. Dieses Phänomen ist bereits aus Fahrzeugen bekannt, welche für den IR-Schutz eine Folie mit metallisch reflektierender Beschichtung verwenden, die ebenfalls ein Polymer als Trägermaterial besitzen (siehe Abb. 5.7). Da das Polymer keine ausreichend hohe Haftungsverbindung mit dem Glas aufbauen kann, muss es zwischen zwei PVB-Folien eingebettet werden, wodurch sich der bereits in Abb. 5.4 schematisch dargestellte Aufbau der WSS ergibt. Folglich kann der Laminationsprozess zu Welligkeiten des Polymers führen, da der Sandwichaufbau zwischen zwei weichen PVB-Folien unter Einwirkung von Druck und Hitze im Laminationsprozess zur Schrumpfung neigt. Diese Welligkeit kann sowohl außen, bei der sich in der WSS reflektierenden Objekten der Umwelt, als auch von innen im virtuellen Bild eines p-polarisierten HUD sichtbar sein. In Abb. 5.7 ist die wellige Reflektion eines Doppelbildes an einer metallisch beschichteten Folie zum IR-Schutz eines Serienfahrzeugs zu sehen. Analog dazu könnte auch das Primärbild eines p-polarisierten HUD, welches an dem zuvor beschriebenen beschichteten Polymer zur Reflektion p-polarisierten Lichts entsteht, ebenfalls wellig erscheinen. Diese Welligkeit im virtuellen Bild kann selbst bei geringster Ausprägung störend wahrnehmbar sein und darf entsprechend unter keinen Umständen sichtbar auftreten. Um dies zu verhindern müssen erneut Scheiben-, PVB- und Polymerlieferanten die Materialien sowie Prozessparameter optimieren um die Welligkeit der reflektierenden Schicht zu minimieren. Da bei der zweiten Variante mit direkter Beschichtung des Glases der Schichtaufbau an der glatten Scheibenoberfläche aufträgt, ist diese Variante hinsichtlich auftretender Welligkeiten eindeutig zu bevorzugen.



**Abb. 5.7:** Welliges sekundäres Bild durch Reflektion an einem metallisch beschichteten Polymer im Windschutzscheibenverbund

Außerdem darf der neuartige Windschutzscheibenverbund mit zusätzlicher optischer Schicht bzgl. Haftung und Optik auch unter extremen Witterungen in einem angemessenen Zeitrahmen keine Veränderungen aufweisen. Dennoch auftretende Veränderungen dürfen weder die Funktionsweise beeinträchtigen, noch Spezifikationen eines OEM oder gesetzliche Vorgaben verletzen.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Herausforderungen bzgl. der Funktionsweise und Industrialisierung eines p-polarisierten HUD sind in der aktuellen Literatur in dem hier dargestellten Umfang bislang nicht vorhanden. Trotz der beschriebenen Herausforderungen stellt die Umsetzung eines p-polarisierten HUD aufgrund dessen Sichtbarkeit mit polarisierenden Sonnenbrillen und der theoretischen Eliminierung des Doppelbildfehlers einen großen zusätzlichen Kundennutzen für zukünftige HUD Systeme dar.

### 5.1.3. Weitere Konzeptideen

Neben der Option, die Polarisationsrichtung des HUD Projektors vollständig auf p-polarisiertes Licht auszurichten, ist theoretisch auch die Verwendung unpolarisierten, zirkular polarisierten oder s- und p-polarisierten Lichts denkbar. Bei allen drei genannten Polarisationsrichtungen des Lichts würde jeweils der s-polarisierte Lichtanteil, mit bekannt hoher Reflektivität um die 20%, an der WSS reflektiert werden. Die p-polarisierten Lichtanteile würden mit bekannt niedriger Reflektivität um die 2 – 5 % an der WSS reflektiert werden (siehe Abb. 5.1). Die Sichtbarkeit mit einer polarisierenden Sonnenbrille wäre in diesem Fall immer noch sehr gering. Die Reflektivität könnte durch die Integration einer reflektiven Schicht für p-polarisiertes Licht erhöht werden.

Allerdings hätte der Einsatz der beschriebenen drei Polarisationsrichtungen, welche sowohl s- als auch p-polarisierte Lichtanteile enthalten, zwei Nachteile. Der erste Nachteil wäre das sichere Auftreten eines Doppelbildes, da das s-polarisierte Licht des HUD Projektors an der Innen- und Außenfläche reflektiert wird. In Abhängigkeit davon wo eine zusätzlich optische Schicht zur Reflektion p-polarisierten Lichts im Windschutzscheibenverbund integriert wäre, könnte sogar ein drittes virtuelles Bild entstehen. Die Kompensation der vertikalen Verschiebung der so entstehenden Doppel- oder sogar Dreifachbilder mit Hilfe einer oder zweier keilwinkligen Folien ist aus kommerzieller Sicht nicht zielführend. Der zweite Nachteil besteht in der geringeren Energieeffizienz des HUD Systems, wenn unterschiedliche Polarisationsrichtungen den HUD Projektor verlassen. Da in diesem Fall die den HUD Projektor verlassenden Lichtwellen und die Reflektion an der WSS nicht auf eine Polarisationsrichtung hin optimiert sind, sinkt die Reflektivität der WSS. Folglich muss die eingesetzte Lichtquelle einen deutlich höheren Lichtstrom erzeugen um letztendlich die gleiche Leuchtdichte im virtuellen Bild für die Fahrer:in zu erreichen. Wie bereits in Abschnitt 5.1 beschrieben, führt dies zu höheren Temperaturen der PGU, welche das TFT LCD beschädigen könnte und daher zusätzliche kostenintensive Maßnahmen mit sich bringen würde. Aus diesen

Gründen ist von einem Einsatz eines HUD Projektors mit unterschiedlichen Polarisationsrichtungen abzusehen.

Eine weitere potentielle Möglichkeit zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD Systems ist die Integration eines *Retarders* in die WSS [102]. Wagner und Muth (2021) beschreiben in der Offenlegungsschrift zu einem Patent die Integration eines Retarders zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD. Die Integration des Retarders kann bspw. in Form einer Folie zwischen zwei PVB-Folien erfolgen. Der HUD Projektor muss in diesem Fall p-polarisiertes Licht emittieren. Ansonsten ist keine Integration weiterer optisch reflektierender Schichten in den Windschutzscheibenverbund nötig. In Abb. 5.8 ist das Funktionsprinzip des p-polarisierten HUD Systems mit Hilfe eines Retarders dargestellt. Der HUD Projektor emittiert p-polarisiertes Licht in Richtung der WSS. Da der Einfallswinkel des p-polarisierten Lichts an der WSS nahe dem Brewster-Winkel ist, transmittiert es beinahe vollständig durch die Innenfläche *Fläche 4* in den Windschutzscheibenverbund. Beim Durchdringen des Retarders dreht dieser die Polarisationsrichtung des vom HUD Projektor kommenden p-polarisierten Lichts um  $90^\circ$  zu s-polarisiertem Licht. Das s-polarisierte Licht wird beim Austreten aus dem Windschutzscheibenverbund an der Grenzfläche *Glas* zu Luft an der Außenfläche *Fläche 1* wieder zu ca. 20 % in die Richtung der Fahrer:in reflektiert. Beim erneuten Durchdringen des Retarders dreht dieser die Polarisationsrichtung des an der Außenfläche der WSS reflektierten s-polarisierten Lichts wiederum um  $90^\circ$  zu p-polarisiertem Licht. Dieses p-polarisierte Licht trifft zuletzt, erneut mit einem Einfallswinkel nahe des Brewster-Winkels, auf die Innenfläche *Fläche 4* der WSS und transmittiert zu größten Teilen in Richtung der Fahrer:in. Auf diese Weise kann der Fahrer:in ein p-polarisiertes virtuelles Bild dargestellt werden, bei theoretisch gleichzeitigem Entfall einer keilwinkligen PVB-Folie, da nur eine einzige Reflektion am gesamten Windschutzscheibenverbund stattfindet. Dabei wird sich die bidirektionale Eigenschaft von Doppelbrechenden Materialien zu Nutze gemacht.

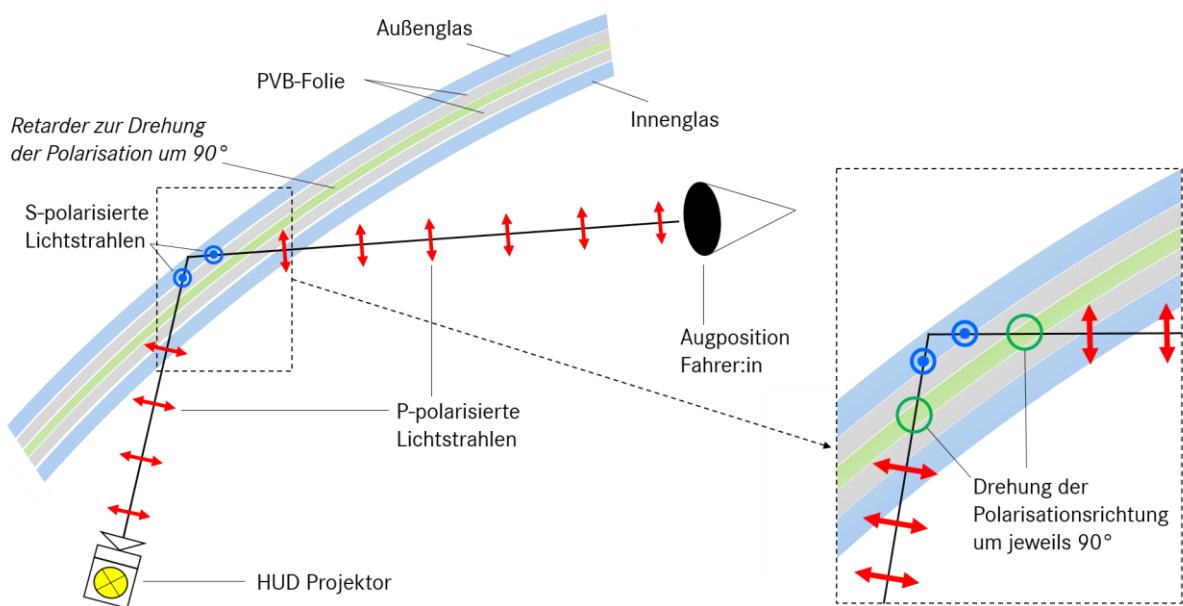


Abb. 5.8: Schematischer Aufbau eines p-polarisierten HUD Systems mit in der WSS integriertem Retarder zur Drehung der Lichtpolarisation um  $90^\circ$

Für die gewünschte Drehung der Polarisation um  $90^\circ$  muss eine  $\lambda/2$ -Platte Verwendung finden. Genau wie die in Abschnitt 5.1.1 vorgestellten p-polarisierten HUD Systeme mit einer optisch aktiven Schicht zur Reflektion p-polarisierten Lichts, steht auch der Ansatz mit Retarder vor denselben Herausforderungen der Integration in die WSS. Auch für das Retarder-Konzept sind die OEM spezifischen sowie gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich mechanischer und optischer Eigenschaften über den Teilebenslauf der WSS einzuhalten.

Die Arbeiten von Derlofske et al. (2019) sowie Wagner und Muth (2021) geben keine gesamtheitliche Betrachtung eines p-polarisierten HUD Systems wieder. Entsprechend sind auch keine Hinweise bzgl. Abbildungsfehlern darin aufgeführt. Beide Arbeiten verweisen darauf, dass aufgrund der Verwendung p-polarisierten Lichts keine Reflektion am Innen- oder Außenglas der WSS stattfindet und damit kein störendes Doppelbild entsteht. Während dies in der Theorie korrekt ist, zeigt die Analyse im Folgendem Abschnitt, dass bei der tatsächlichen Umsetzung eines p-polarisierten HUD immer ein Doppelbild entsteht. Die Gründe hierfür sind Abweichungen vom Brewster-Winkel sowie ungewollte Änderungen der Polarisationsausrichtung durch den HUD Projektor und die WSS. Diese Feststellung ist für beide Konzepte zur Integration optisch aktiver Schichten gültig. Folglich entstehen auch im p-polarisierten HUD System Doppelbilder, sowohl bei Integration einer Schicht zur Reflektion p-polarisierten Lichts, als auch bei Integration eines Retarders zur Drehung der Lichtpolarisation.

## 5.2. Analyse potentieller Doppelbildfehler eines p-polarisierten HUD Systems

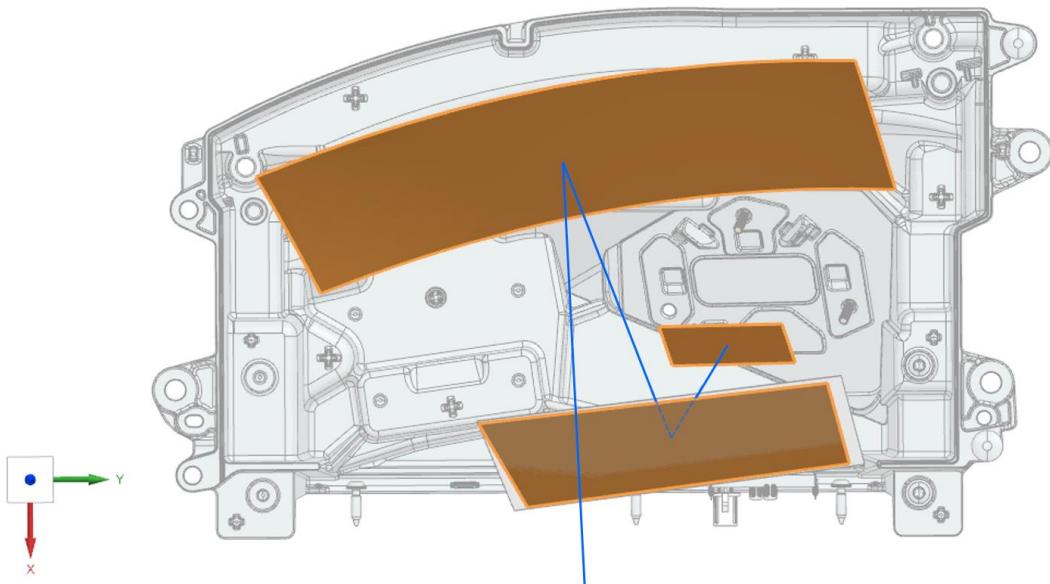
Die in diesem Abschnitt beschriebenen Analysen basieren auf Untersuchungen an konventionellen s-polarisierten HUD Systemen. Die Untersuchungen zeigen, dass mit den zuvor beschriebenen Konzepten zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD ebenfalls Doppelbilder entstehen können. Dafür gibt es zwei Gründe.

1. Konventionelle HUD Projektoren emittieren nicht ausschließlich linear s-polarisiertes Licht, obwohl deren Auslegung darauf abzielt.
2. Der Einfallswinkel, der vom HUD Projektor kommenden Lichtwellen, weicht an der WSS für die allermeisten Fahrzeuge mit HUD vom Brewster-Winkel ab.

Im Folgenden sind die Gründe ausführlich beschrieben.

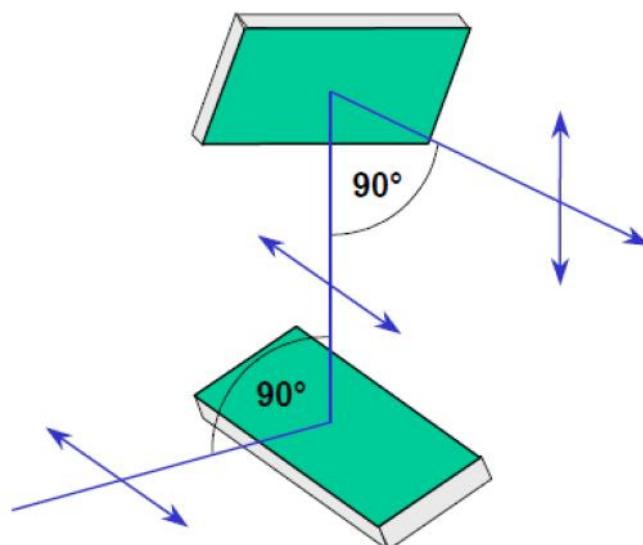
### 5.2.1. Änderung der linearen Lichtpolarisation durch den HUD Projektor

Das aktuelle Design konventioneller s-polarisierter HUD Projektoren emittiert nicht ausschließlich linear s-polarisiertes Licht. Grund hierfür ist die Anordnung der optischen Elemente im Projektor und die daraus entstehende Strahlführung. Die Anordnung der optischen Elemente, insbesondere der Spiegel, ist darauf ausgelegt bei geringstem Bauraum ein möglichst großes virtuelles Bild mit großer Entfernung und gleichzeitig guter virtuellen Bildqualität zu erreichen. Dies führt dazu, dass sich die Lichtstrahlen, welche von der PGU emittiert und an den beiden Spiegeln im Projektor jeweils reflektiert werden, nicht in derselben Ebene ausbreiten. Der daraus entsprechende Verlauf der Lichtstrahlen ist in Abb. 5.9 blau dargestellt. Daran ist deutlich zu erkennen, dass sich die reflektierten Lichtstrahlen auch nicht für den Mittensichtstrahl in einer Ebene ausbreiten.



**Abb. 5.9:** Draufsicht (Z-Richtung) eines HUD Gehäuses inkl. TFT, Faltspiegel und asphärischem Spiegel sowie Strahlverlauf.

Hinzu kommt, dass selbst bei optimierter Ausrichtung der PGU und der beiden Spiegel, die Lichtstrahlen bei Reflektion am asphärischen Spiegel die Einfallsebene verlassen. Grund hierfür ist die Polarisationsänderung bei Reflektion linear polarisierten Lichts an dielektrischen Materialien, wenn die Ausfallsebene der Lichtstrahlen nicht der Einfallsebene entspricht [41]. Das Prinzip ist in Abb. 5.10 dargestellt. Hier wird die Polarisationsrichtung linear polarisierten Lichts mit Hilfe zweier dielektrischen Spiegel um  $90^\circ$  gedreht, indem diese den ursprünglichen Lichtstrahl zunächst um  $90^\circ$  nach oben und anschließend um  $90^\circ$  nach rechts ablenken. Daraus lässt sich schließen, dass sich bei mehrfachen Reflexionen des Lichts dessen Polarisationsrichtung ändern kann, wenn die Strahlführung nicht in einer Ebene liegt [41].



**Abb. 5.10:** Anpassung der Polarisationsrichtung von linear polarisiertem Licht über die Änderung der Ausbreitungsebene bei Reflexion an dielektrischen Materialien [41]

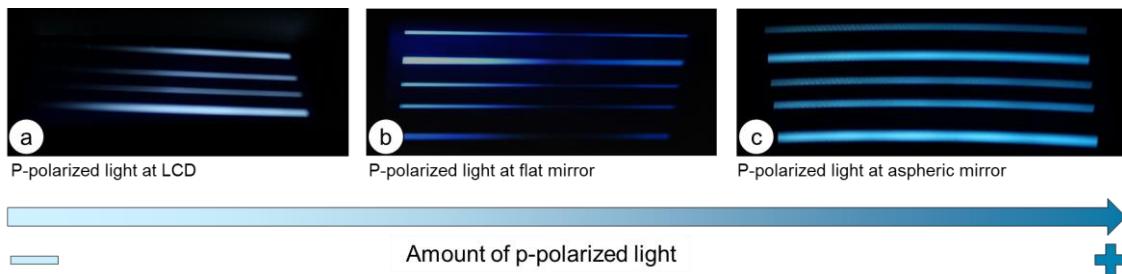
Das bedeutet, dass selbst wenn die PGU nahezu rein linear s-polarisiertes Licht in Richtung der Spiegel emittiert, den HUD Projektor letztendlich anteilig auch andere Polarisationsrichtungen in Richtung der WSS verlassen. Übertragen auf ein p-polarisiertes HUD folgt die Konsequenz, dass trotz Optimierung der PGU, zur Emission rein linear p-polarisierten Lichts, sowie der Anordnung der Spiegel, zur Strahlführung innerhalb einer Ebene, *nicht-p-polarisierte Lichtanteile* den Projektor verlassen. Diese nicht-p-polarisierten Lichtanteile führen zur Reflektion an der WSS, unabhängig davon ob diese im Brewster-Winkel auf die WSS treffen. Aus diesen Gründen kommt es auch in einem p-polarisierten HUD zur Bildung eines Doppelbilds.

Anhand von Abb. 5.11 lässt sich die Verifizierung dieser theoretischen Änderung der Polarisationsrichtung innerhalb des Projektors feststellen. Darin ist die Änderung der Polarisationsrichtung des Lichts innerhalb eines konventionellen s-polarisierten HUD Projektors einer Mercedes-Benz CLS-Klasse mit Markteinführung im Jahr 2018 zu sehen (Baureihe C257). Das hierfür verwendete Testbild besteht aus horizontalen geraden Linien unterschiedlicher Dicken (siehe Abb. 5.11). Die Aufnahme der dargestellten Bilder erfolgte mit einer Spiegelreflexkamera. Das Objektiv der Kamera ist mit einem linearen Polarisationsfilter bestückt. Die Ausrichtung des Polarisationsfilters stellt sicher, dass beinahe ausschließlich p-polarisierte Lichtanteile aufgezeichnet werden. Auf diese Weise kann die Feststellung erfolgen, ob ungewollte p-polarisierte Lichtanteile den HUD Projektor verlassen und wo diese im HUD Projektor entstehen.<sup>6</sup> Das linke Bild (a) in Abb. 5.11 zeigt die direkte Aufnahme des TFT LCD. Hier ist zu erkennen, dass bereits die PGU des Projektors p-polarisiertes Licht emittiert. Das mittlere Bild (b) in Abb. 5.11 zeigt die Aufnahme des flachen Faltspiegels. Obwohl dieser Spiegel flach ist und entsprechend keine Krümmung aufweist, erhöhen sich die p-polarisierten Lichtanteile im Vergleich zur Aufnahme des TFT LCD (b). Grund hierfür ist die zuvor beschriebene Änderung der Polarisationsrichtung bei Reflektion des Lichts, wenn die Strahlführung nicht innerhalb einer Ebene stattfindet. Das rechte Bild (c) in Abb. 5.11 zeigt die Aufnahme des asphärischen Spiegels. Hier erhöhen sich die p-polarisierten Lichtanteile nochmals und sind nun deutlich im gesamten virtuellen Bild zu erkennen. Diese Veränderung beruht erneut auf der Tatsache, dass eine Änderung der Polarisationsrichtung stattfindet, da die

---

<sup>6</sup> Um die Sichtbarkeit nicht-s-polarisierter Lichtanteile zu erhöhen wurden unterschiedliche Öffnungszeiten der Blende verwendet.

Einfallsebene des reflektierten Lichts am asphärischen Spiegel nicht der Ausfallsebene entspricht. Die asphärische Krümmung des zweiten Spiegels verstärkt diesen Effekt zusätzlich.



**Abb. 5.11: Bilder eines TFT LCD (a), Faltspiegels (b) und asphärischen Spiegels eines konventionellen s-polarisierten HUD Projektors zum Feststellung der Polarisationsänderung**

Diese Untersuchung verifiziert damit die in der Theorie angenommene Änderung der Polarisationsrichtung innerhalb des HUD Projektors. In einem s-polarisierten HUD führt dies zum Verlust s-polarisierter Lichtanteile sowie Anstieg p-polarisierter Lichtanteile und damit zur Reduktion der Helligkeit des virtuellen Bildes. Daraus folgt allerdings auch, dass ein p-polarisierter HUD Projektor anteilig s-polarisiertes Licht emittiert, welches dann durch Reflexion am Glas der WSS zu einem störenden Doppelbild führt.

### 5.2.2. Abweichung vom Brewster-Winkel für Licht an der Windschutzscheibe

Der zweite Grund für die Entstehung eines Doppelbilds im virtuellen Bild eines p-polarisierten HUD Systems ist auf den Einfallswinkel der vom HUD Projektor kommenden Lichtstrahlen an der WSS zurückzuführen. Die vorgestellten Konzepte zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD gehen davon aus, dass kein p-polarisiertes Licht an der WSS reflektiert, da diese im Brewster-Winkel auf die WSS treffen [20,102]. Allerdings zeigt eine Analyse aller derzeit auf dem Markt verfügbaren HUD Systeme der Mercedes-Benz AG, dass die Einfallswinkel der Lichtstrahlen an der WSS vom Brewster-Winkel  $\alpha_B \approx 56^\circ$  abweichen. Die Einfallswinkel der Lichtstrahlen an der WSS liegen für die Baureihen der Mercedes-Benz AG zwischen  $57^\circ - 70^\circ$  und weichen damit zum Teil deutlich vom Brewster-Winkel ab. Dies führt entsprechend zur Reflexion des p-polarisierten Lichts an den Scheibenflächen *Fläche 1* und *Fläche 4*. Dadurch entsteht neben dem primären Bild durch die Reflexion p-polarisierten Lichts an der dafür vorgesehenen optisch aktiven Schicht, auch ein sekundäres oder je nach Konzept auch ein tertiäres Bild.

Die Möglichkeiten zur Optimierung des Doppelbildfehlers aufgrund der Abweichung zum Brewster-Winkel sind begrenzt. Entscheidend für den letztendlichen Einfallswinkel der Lichtstrahlen auf die WSS hängen zum Großteil von der Fahrzeugarchitektur einer Baureihe ab. Der Einfallswinkel bestimmt sich unter der Berücksichtigung der Kopfposition der Fahrer:in, die Lage der WSS und die Lage des HUD Projektors. Während in der Regel die Kopfposition und die Lage der WSS fest durch die Architektur und das Design des Fahrzeugs festgelegt sind, kann in manchen Fällen die Position des HUD Projektors etwas angepasst werden. Allerdings ist auch diese Möglichkeit zur Einflussnahme auf den Einfallswinkel stark eingeschränkt, da der verfügbare Bauraum in der Instrumententafel äußerst begrenzt ist. In klassischen Fahrzeugarchitekturen ist der HUD Projektor umgeben von der Lenksäule, dem Kombi-Instrument, der Klimaanlage sowie der Designoberfläche der Instrumententafel. Ein zusätzlicher Anspannungsgrad zur Erreichung des Brewster-Winkel ist die Tendenz zu flacheren WSS bei batterieelektrischen Fahrzeugen. Während die OEM auf diese Weise versuchen den Luftwiderstand des Fahrzeuges zu verringern und damit die Reichweite zu erhöhen, führen flachere WSS zu einer größeren Abweichung des Einfallswinkels zum Brewster-Winkel. Entsprechend ist davon auszugehen, dass auch p-polarisierte HUD Systeme keine Einhaltung des Brewster-Winkel erreichen können und daher immer ein Doppelbildfehler entsteht.

Wie in diesem und vorausgehenden Abschnitt aufgezeigt, entsteht mit Sicherheit auch im p-polarisierten HUD ein Doppelbild. Dieses stört die Fahrer:in bei der Wahrnehmung des virtuellen Bildes und ist entsprechend zwingend zu vermeiden. Daher findet im folgenden Abschnitt die Diskussion möglicher Ansätze zur Reduktion des Doppelbildfehlers in einem p-polarisierten HUD statt.

### 5.2.3. Ansätze zur Reduktion des Doppelbildfehlers

Das p-polarisierte HUD erbringt durch seine Sichtbarkeit trotz dem Tragen einer polarisierenden Sonnenbrille nur dann eine Steigerung des Kundennutzens für die Fahrer:in, wenn es ansonsten keine Nachteile ggü. einem konventionellen s-polarisierten HUD aufweist. Allerdings zeigen die vorausgehenden Untersuchungen, dass auch in einem p-polarisierten HUD Doppelbilder entstehen können. Diese beeinträchtigen die Wahrnehmung des virtuellen Bildes durch die Fahrer:in massiv. Daher muss der Doppelbildfehler zwingend eliminiert werden.

Die Gründe für die Entstehung der Doppelbildfehler sind in den zwei vorausgehenden Abschnitten 5.2.1 – 5.2.2 dargestellt. Die Entstehung des Doppelbildes ist für alle drei vorgestellten Konzepte zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD gültig (siehe Abschnitte 5.1.1 und 5.2.2). In diesem Abschnitt soll daher eine Diskussion möglicher Ansätze zur Reduktion von Doppelbildfehlern im p-polarisierten HUD stattfinden.

In Abschnitt 5.2.1 ist beschrieben wie sich die Lichtpolarisation innerhalb des HUD Projektors verändert (siehe Abb. 5.9). Um dennoch rein linear polarisiertes Licht an die WSS zu senden, können am HUD Projektor drei Modifikationen vorgenommen werden. Die erste mögliche Modifikation ist eine veränderte Anordnung von PGU und Spiegel im HUD Projektor. Die Veränderung zielt darauf ab die von der PGU kommenden Lichtstrahlen möglichst in einer Ausbreitungsebene zu halten. Ist dies der Fall findet keine Veränderung der Lichtpolarisation bei der Reflektion der Lichtstrahlen an den Spiegeln des HUD Projektors statt. Eine Ausnahme bildet hierbei lediglich der asphärische Spiegel. Aufgrund seiner Krümmung, die zwingend nötig ist um eine Vergrößerung des virtuellen Bildes sowie die Korrektur der Windschutzscheibenkrümmung sicherzustellen, verlässt ein Teil der reflektierten Lichtstrahlen die Ausbreitungsebene.

Die zweite mögliche Modifikation betrifft den Einsatz eines Retarders innerhalb des HUD Projektors, welcher die Polarisationsrichtung korrigiert [100]. Wagner (2021) beschreibt in einer Offenlegungsschrift zur Patentanmeldung diesen Ansatz. Die Platzierung des Retarders kann an jeder Stelle des Strahlengangs innerhalb des Projektors erfolgen. In Abb. 5.12 ist zu sehen, wie sich die rein p-polarisierte Lichtemission aus dem TFT-LCD durch die Reflektionen am Faltspiegel und asphärischen Spiegel verändern. Die Schnitte a – a, b – b und c – c verdeutlichen, dass die zuvor rein p-polarisierten Lichtanteile nach Reflektion an den Spiegeln auch s-polarisierte Lichtanteile enthalten und den HUD Projektor verlassen. Wie in Abb. 5.12 b) dargestellt, korrigiert der Retarder die Änderung der Polarisationsrichtung, welche durch die Reflektion an den Spiegeln des Projektors entsteht. Um auch die unterschiedlichen Änderungen der Polarisationsrichtung durch die Reflektion am asphärischen Spiegel ausgleichen zu können, müsste eine Segmentierung des Retarders stattfinden. Die technische Umsetzbarkeit einer solchen Segmentierung des Retarders ist allerdings nicht sichergestellt.

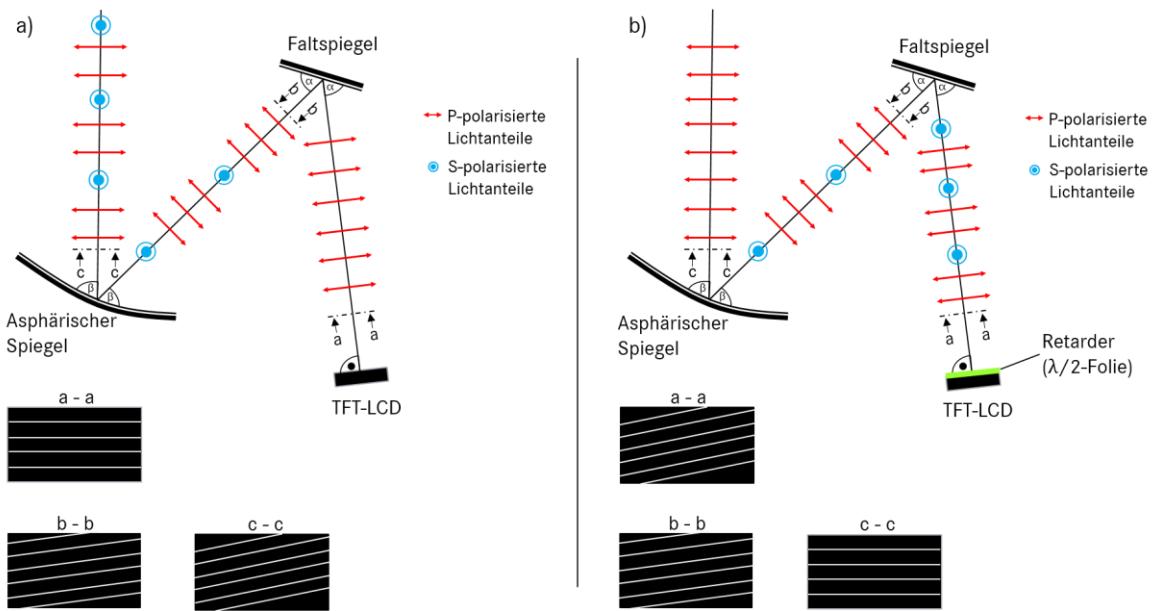


Abb. 5.12: Schematische Darstellung der Polarisationsänderung innerhalb des Projektors (a), sowie Optimierung der p-polarisierten Lichtemission durch Einsatz eines Retarder (b).

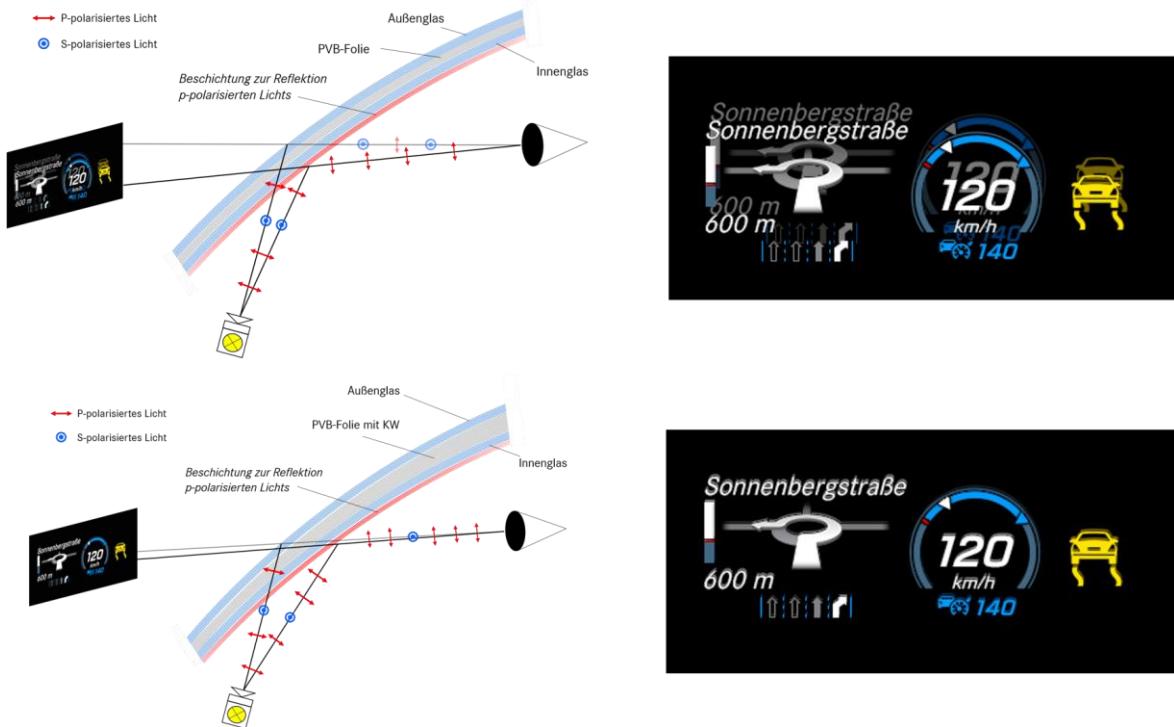
Die dritte Möglichkeit besteht in der Verwendung eines Polarisationsfilters, welcher ausschließlich linear p-polarisiertes Licht transmittiert. Die Platzierung des Polarisationsfilters muss nach der Reflektion der Lichtstrahlen am asphärischen Spiegel erfolgen, da danach im Projektor keine Veränderung der Polarisationsrichtung mehr stattfindet. Entsprechend bietet sich hierfür eine Integration des Polarisationsfilters in die Glare Trap des HUD Projektors an. Der Polarisationsfilter absorbiert alle nicht linear p-polarisierten Lichtanteile, welche den Projektor in Richtung der WSS verlassen würden.

Bei Einsatz der ersten beiden beschriebenen Optimierungsmöglichkeiten, der veränderten Anordnung der Spiegel sowie der Verwendung eines Retarders, ist auch weiterhin von einem geringen Teil nicht p-polarisierter Lichtanteile auszugehen, welche den Projektor verlassen. Der Einsatz eines Polarisationsfilters bringt die größte Verbesserung mit sich, da der HUD Projektor dann beinahe ausschließlich p-polarisiertes Licht emittiert. Allerdings führt die Verwendung eines Polarisationsfilters zu einem Verlust in der Helligkeit des virtuellen Bildes, welchen die Leuchtkette durch einen höheren Lichtstrom ausgleichen müsste. Um diesen Verlust zu reduzieren ist eine Kombination der beschriebenen Modifikationen des HUD Projektors zur Maximierung der p-polarisierten Lichtanteile denkbar. Während die optimierte Anordnung der Spiegel kostenneutral umgesetzt werden könnte, erhöhen der Einsatz eines Retarders und eines Polarisationsfilters den Teilepreis des HUD Projektors.

Zuletzt erfolgt die Betrachtung des Einsatzes einer oder mehrerer keilwinkligen PVB-Folien im Windschutzscheibenverbund zur Reduktion der Doppelbildfehler eines p-polarisierten HUD.

Dieser ist aufgrund der Prämisse zur kostenneutralen Umsetzung des neuartigen Systems aus kommerzieller Sicht nicht zielführend. Trotzdem soll der mögliche Einsatz keilwinkliger PVB-Folien zur Reduktion des Doppelbildfehlers in der WSS eines p-polarisierten HUD System erläutert werden.

Findet zur Reflektion p-polarisierten Lichts durch die WSS eine Beschichtung auf der Innenfläche *Fläche 4* der WSS Verwendung, ergeben sich zwei mögliche virtuelle Bilder. Das primäre Bild entsteht durch Reflektion p-polarisierten Lichts an der Beschichtung auf Fläche 4 sowie Reflektion s-polarisierten Lichts, dessen Anteil möglichst gering sein sollte, am Glas der *Fläche 4*. Das sekundäre Bild entsteht durch Reflektion s-polarisierten Lichts am Glas der Außenfläche *Fläche 1*. Wie in heutigen s-polarisierten HUD Systemen führen diese beiden Reflektionen zu einem bekannten Doppelbild (siehe Abb. 5.13).

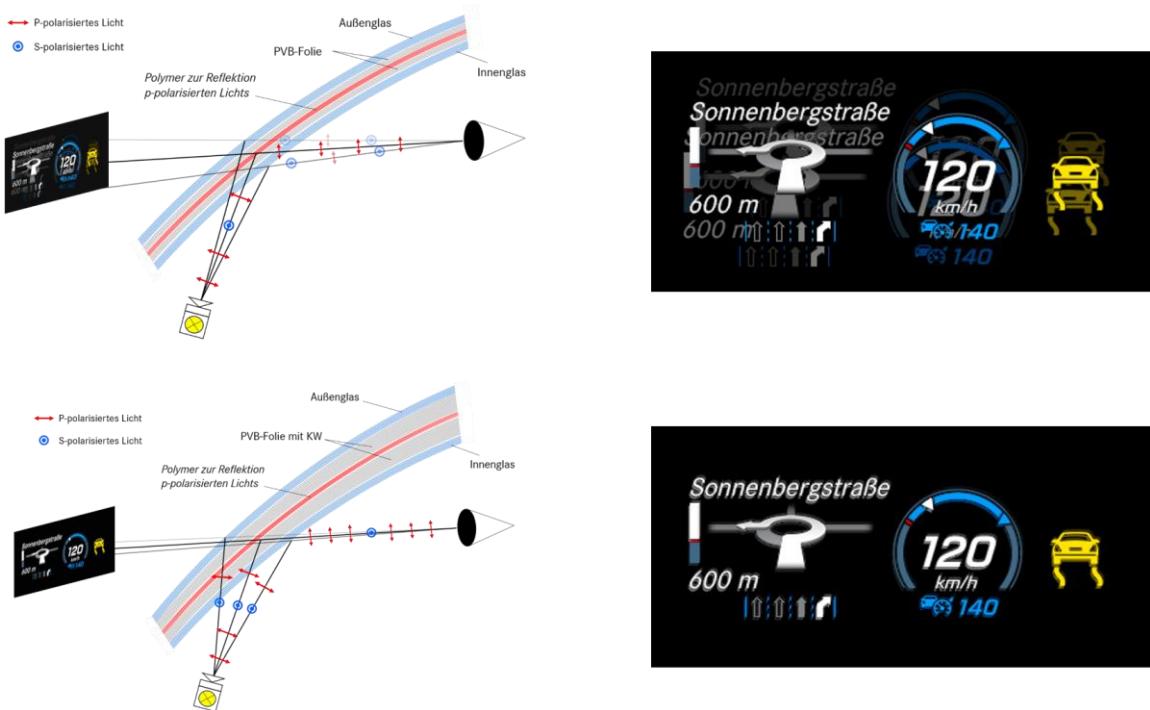


**Abb. 5.13:** Schematische Darstellung entstehender Doppelbilder ohne (oben) und mit (unten) keilwinkliger PVB Folie bei Reflektion an Beschichtung auf Fläche 4.

In diesem Fall kann eine konventionelle keilwinklige PVB-Folie eingesetzt werden, wie sie bereits aktuell standardmäßig in s-polarisierten HUD Systemen Einsatz findet und den vertikalen Versatz des primären und sekundären Bildes kompensiert (siehe Abb. 5.13).

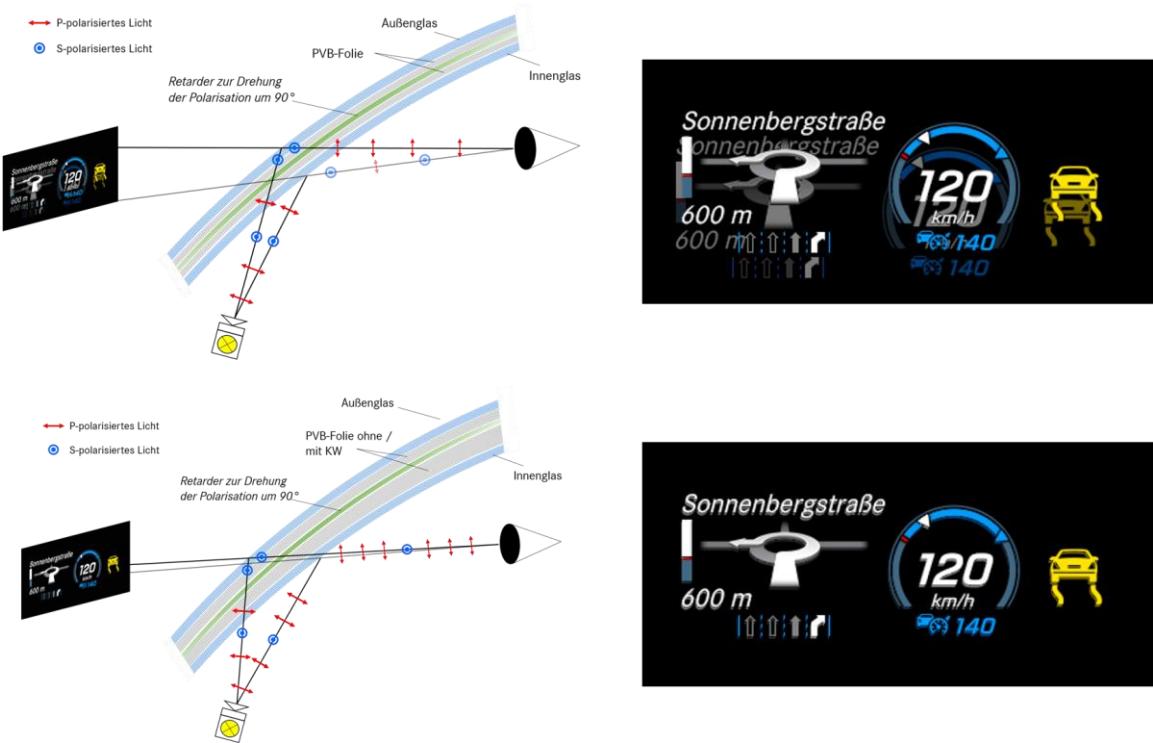
Findet zur Reflektion p-polarisierten Lichts durch die WSS ein beschichtetes Polymer zwischen zwei PVB-Folien des Windschutzscheibenverbunds Verwendung, ergeben sich drei mögliche virtuelle Bilder. Die Reflektion p-polarisierten Lichts am beschichteten Polymer ergibt das

primäre Bild. Die Reflektionen s-polarisierten Lichts am Glas der *Fläche 1* und *Fläche 4* ergeben das sekundäre bzw. tertiäre Bild (siehe Abb. 5.14). In diesem Fall kann durch den Einsatz von zwei keilwinkligen PVB-Folien das *Dreifachbild* kompensiert werden. Dafür müssen die beiden PVB-Folien, welche das beschichtete Polymer umschließen, jeweils keilwinklig ausgeführt sein. Der Aufbau hierfür ist unten in Abb. 5.14 zu sehen. Der Einsatz von zwei keilwinkligen PVB-Folien im Windschutzscheibenverbund findet bisher keine Verwendung in Mercedes-Benz Fahrzeugen. Daher müsste vorab eine Konzeptprüfung und Validierung stattfinden.



**Abb. 5.14:** Schematische Darstellung entstehender Doppelbilder ohne (oben) und mit (unten) keilwinkliger PVB Folie bei Reflexion an Polymer mittig im Windschutzscheibenverbund.

Findet zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD ein Retarder im Windschutzscheibenverbund Verwendung, entstehen analog der Umsetzung mit einer Beschichtung auf *Fläche 4* zwei virtuelle Bilder (siehe Abb. 5.15). In diesem Fall entsteht das primäre Bild allerdings an *Fläche 1* und das sekundäre Bild an *Fläche 4*. Auch hier kann unter Einsatz einer konventionellen PVB-Folie die Kompensation des Doppelbilds stattfinden.



**Abb. 5.15:** Schematische Darstellung entstehender Doppelbilder ohne (oben) und mit (unten) keilwinkliger PVB Folie bei Einsatz eines Retarders mittig im Windschutzscheibenverbund.

Wie bereits erwähnt, ist der Einsatz keilwinkliger PVB-Folien ausgeschlossen, da deren Verwendung keine kostenneutrale Umsetzung eines p-polarisierten HUD Systems zulässt. Entsprechend besteht ein großer Doppelbildfehler, welcher auf einen großen Abstand zwischen dem primären und sekundären Bild zurückzuführen ist.

Die Untersuchungen an s-polarisierten HUD Systemen zeigen zum einen, dass der Einfallswinkel der Lichtstrahlen des Projektors an der WSS nicht dem Brewster-Winkel entspricht. Zum anderen stellt sich heraus, dass im Projektor Änderungen der Polarisationsrichtung entstehen. Dies führt dazu, dass nicht ausschließlich linear polarisiertes Licht einer bestimmten Schwingungsrichtung aus dem HUD Projektor emittiert. Dieser Abschnitt zeigt, wie die Anteile linear polarisierten Lichts einer Schwingungsrichtung maximiert werden können. Dafür können eine optimierte Anordnung der Spiegel, der Einsatz eines Retarders oder der Einsatz eines Polarisators stattfinden. Ausschließlich die letzte Maßnahme kann die ausschließliche Emission linear polarisierten Lichts einer Schwingungsrichtung garantieren. Da sich bei dieser Maßnahme allerdings die Helligkeit des virtuellen Bildes reduziert, ist sie nur in Kombination mit anderen Maßnahmen umsetzbar oder führt aufgrund einer Erhöhung des Lichtstroms der Leuchtquelle zum Einsatz zusätzlicher Maßnahmen für das thermische Management der PGU. Aus diesen Gründen ist eine kostenneutrale Umsetzung eines p-polarisierten HUD nicht zu erreichen.

Trotz aller möglichen Maßnahmen zeigen die Untersuchungen, dass auch im p-polarisierten HUD System mit einem Doppelbild zu rechnen ist. Die Helligkeit des sekundären Bildes ist in einem p-polarisierten HUD, unter Anwendung einer oder mehrerer der beschriebenen Maßnahmen, deutlich reduziert ggü. einem konventionellen s-polarisierten HUD. Zur letztendlichen Feststellung, welche Maßnahmen zur Reduktion des Doppelbildes nötig wären, damit dieses für die Fahrer:in nicht störend oder nicht wahrnehmbar ist, muss eine Festlegung der maximal zulässigen Helligkeit des sekundären Bildes stattfinden. Daher ist festzustellen, welche Ausprägung des Doppelbilds für die Fahrer:in zu Schwierigkeiten in der Wahrnehmung führt und daher nicht mehr zu akzeptieren ist.

Die Untersuchungen der unterschiedlichen Umsetzungsmöglichkeiten für ein p-polarisiertes HUD führen alle zu einem sekundären und teilweise auch zu einem tertiären Bild. Es wird festgelegt, dass die Benennung der virtuellen Bilder in Abhängigkeit ihrer Helligkeit stattfindet. Demnach ist das primäre Bild am hellsten, gefolgt vom sekundären Bild und schließlich, falls vorhanden, das tertiäre Bild. Gelingt es in einem p-polarisierten HUD System das sekundäre Bild ausreichend zu unterdrücken, besitzt per vorausgehenden Definition das tertiäre Bild eine geringere Helligkeit und stellt damit ebenfalls keine Störung der Fahrer:in dar. Aus diesem Grund findet in folgender Betrachtung ausschließlich die Berücksichtigung des sekundären Bildes statt.

Die menschliche Wahrnehmung von Helligkeiten ist relativ. Bspw. kann das Display eines Smartphones bei Betrachtung in der Sonne selbst bei seiner maximalen Helligkeit zu dunkel erscheinen, während dasselbe Display mit den gleichen Einstellungen bei Nacht eine Benutzer:in blenden kann. Grund hierfür ist die Anpassung der Pupille des menschlichen Auges, welche ähnlich der Blende einer Kamera den Lichteinfall in das Auge reguliert und damit das Sehen unter verschiedensten Helligkeitsbedingungen ermöglicht. Für den Doppelbildfehler eines p-polarisierten HUD bedeutet dies, dass nicht die Helligkeit des sekundären Bildes selbst für eine störende Wahrnehmung durch die Fahrer:in verantwortlich ist. Viel mehr ist das Leuchtdichteverhältnis zwischen primärem und sekundären Bild ausschlaggebend. Aus diesem Grund soll im Folgenden die Bestimmung des Leuchtdichteverhältnisses zwischen primärem und sekundären Bild erfolgen, welches nötig ist um ein störungsfreies virtuelles Bild für Kund:innen darzustellen. Die Ermittlung des zulässigen Leuchtdichteverhältnisses findet im Rahmen einer weiteren Probandenstudie statt.

### 5.3. Studie zum Leuchtdichteverhältnis des Doppelbildes im p-polarisierten Head-up Display

Der vorausgehende Abschnitt 5.2 zeigt, dass auch in einem p-polarisierten HUD System ein Doppelbild auftritt. Diese Erkenntnis ist die Motivation zur Einführung einer neuen Qualitätskennzahl für das Doppelbild eines p-polarisierten HUD: das *Leuchtdichteverhältnis des Doppelbilds*. Dieses beschreibt das Verhältnis der Leuchtdichten zwischen dem primären und sekundären Bild. Entsprechend wird das Leuchtdichteverhältnis des Doppelbilds im Weiteren als  $\frac{L_P}{L_S}$  definiert. Dabei entspricht  $L_P$  der Leuchtdichte des primären Bilds und  $L_S$  der Leuchtdichte des sekundären Bilds. Das primäre Bild entsteht durch die Reflektion p-polarisierten Lichts an einer zusätzlich optisch aktiven Schicht, welche in den Windschutzscheibenverbund integriert wird (siehe Abschnitt 5.1). Das sekundäre Bild entsteht durch die Reflektion s- oder p-polarisierten Lichts an der inneren oder äußeren Grenzfläche zwischen dem Glas der WSS und der Luft.

Die Einführung des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  ist nötig, da, aufgrund der Prämissen keine keilwinklige PVB-Folie einzusetzen, der vertikale Abstand zwischen primärem und sekundären Bild nicht kompensiert werden kann und folglich konstant groß auftritt. Daher ist es essentiell das minimal zulässige Leuchtdichteverhältnis des Doppelbilds  $\frac{L_P}{L_S}$  einzuführen, um auf diese Weise ein für die Fahrer:in störendes sekundäres Bild zu verhindern (siehe Abb. 5.16), welches die Wahrnehmung des virtuellen Bildes beeinträchtigt.



Abb. 5.16: Aufnahme eines virtuellen Bildes mit manipuliertem Doppelbild

Die Verwendung eines HUD hat als Fahrerassistenzsystem die Funktion die Fahraufgabe für Fahrer:innen zu erleichtern und auf diese Weise die Fahrsicherheit zu erhöhen. Ein p-polarisiertes HUD soll diese Funktion auch beim Tragen einer polarisierenden Sonnenbrille ermöglichen. Dies ist nur möglich, wenn das virtuelle Bild eine gute Qualität aufweist und dadurch einfach zugänglich für die Fahrer:in ist. Zusätzlich steigen die Kundenerwartungen an

das UI und dessen Darstellung stetig an. Um diese Kundenerwartungen erfüllen zu können, darf das Doppelbild eines p-polarisierten HUD kaum oder gar nicht sichtbar sein. Hierfür muss die Leuchtdichte des sekundären Bildes um ein vielfaches geringer ausfallen, als die Leuchtdichte des primären Bildes. Das Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild muss folglich ein Level erreichen, welches für die Fahrer:in keine störende Wahrnehmung mehr verursacht. Zur Feststellung des minimal zulässigen Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  soll eine Probandenstudie durchgeführt werden.

Die Probandenstudie hat das Ziel, die Wahrnehmungs- und Störschwelle für das Leuchtdichteverhältnis des Doppelbilds  $\frac{L_P}{L_S}$  zu bestimmen. Auf diese Weise lässt sich der zulässige Grenzwert für die neue Qualitätskennzahl festlegen, welcher erreicht werden muss, um den gewünschten Kundennutzen zu realisieren. Erst wenn die Wahrnehmungs- und Störschwelle für  $\frac{L_P}{L_S}$  bekannt ist, kann die Feststellung erfolgen, welche Maßnahmen zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD Systems nötig sind und ob seine kostenneutrale Realisierung möglich ist. Gleichzeitig soll die Studie zeigen, ob die Wahrnehmungs- und Störschwelle identisch ist oder die Kund:innen eine gewisse Toleranz ggü. dem Doppelbildfehler aufweisen. Letztendlich ist bei der Umsetzung eines p-polarisierten HUD das Ziel die Störschwelle nicht zu überschreiten, da ansonsten die Kundenbedürfnisse nicht erfüllt werden bzw. sogar die Sichtbarkeit beeinträchtigt und damit die Fahrsicherheit gefährdet ist.

### 5.3.1. Vorgehensweise und Studienprämissen

Die Probandenstudie zur Feststellung der Wahrnehmungs- und Störschwelle eines Doppelbilds im p-polarisierten HUD System soll zur Beantwortung der Forschungsfragen *E* und *G* beitragen:

*(E) Wie könnte eine kostenneutrale Realisierung eines HUD Systems aussehen, welche die Sichtbarkeit des virtuellen Bildes mit polarisierender Sonnenbrille ermöglicht?*

*(G) Wie könnten Ansätze zur Quantifizierung sowie Lösung potentieller Abbildungsfehler und weiterer Schwierigkeiten aussehen?*

Ein p-polarisiertes HUD ermöglicht dessen Sichtbarkeit auch beim Tragen einer polarisierenden Sonnenbrille. Allerdings zeigen die vorausgehenden Untersuchungen, dass auch ein p-polarisiertes HUD Doppelbildfehler aufweist. Um festzulegen, welche der zuvor

beschriebenen Maßnahmen zur Reduktion des Doppelbildfehlers nötig sind, muss vorab das minimal zulässige Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  definiert werden.

Das Ziel der Studie ist die Feststellung der Wahrnehmungs- und Störschwelle für ein Doppelbild in einem p-polarisierten HUD System. Hiernach richtet sich die Planung der Probandenstudie. Letztendlich soll das minimal zulässige Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  definiert werden, welches es Fahrer:innen erlaubt das virtuelle Bild störungsfrei wahrzunehmen und deren Kundenerwartungen erfüllt. Im Gegensatz zu einem s-polarisierten HUD ist im p-polarisierten HUD ein deutlich größerer Abstand zwischen primärem und sekundären Bild vorhanden. Grund hierfür ist die Prämissen keine keilwinklige PVB-Folie im Windschutzscheibenverbund einzusetzen. Der größere Abstand zwischen primärem und sekundären Bild muss entsprechend auch eine Umsetzung im Versuchsträger finden.

Da die menschliche Wahrnehmung von Helligkeiten relativ ist, könnte das gesuchte Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  des Doppelbildes abhängig von der Helligkeit der Umwelt sein. Dies ist bspw. auf die Arbeit von Qin et al. (2017) zurückzuführen. Folglich muss die Studie Leuchtdichteverhältnisse die in tatsächlichen Fahrsituationen auftreten möglichst breit abdecken. Bspw. kann eine Aufteilung der Studie in zwei Teile stattfinden, welche Umgebungshelligkeiten bei Tag und Nacht abbilden. Um weiterhin eine möglichst reale Fahrsituation für die Proband:innen während der Studie abzubilden, sollen die Testbilder tatsächlich verwendeten Anzeigeninhalten entsprechen. Dies wird über die Verwendung von Anzeigeninhalten aktueller Mercedes-Benz Serienfahrzeuge umgesetzt.

Da kein vollwertiges p-polarisiertes HUD System verfügbar ist und ein solches darüber hinaus keine Möglichkeit zur genauen schrittweisen Anpassung des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primären und sekundären Bild zulässt, muss ein Versuchsträger entwickelt werden. Dieser muss es ermöglichen das Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  reproduzierbar genau und in kleinen Schritten anzupassen. Nur wenn dies sichergestellt ist, kann eine genaue Definition des Grenzwertes für die neue Qualitätskennzahl erfolgen.

Die erstmalige Feststellung des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild eines p-polarisierten HUD ist essentiell, um zu erörtern ob eine Realisierung des p-polarisierten HUD möglich ist. Nur wenn die vorausgehend beschriebenen Maßnahmen zur Reduktion der Helligkeit des sekundären Bildes ausreichend zur Erreichung des minimalen

Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  sind, können die Kundenerwartungen an ein solches HUD System erfüllt werden. Außerdem kann nach Feststellung des minimal zulässigen Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  die Prüfung zur kostenneutralen Realisierung eines p-polarisierten HUD Systems erfolgen.

### 5.3.2. Studiendesign

Dieser Abschnitt beschreibt das Studiendesign der zweiten Probandenstudie vorliegender Dissertation. Die Beschreibung dient der späteren Interpretation und wissenschaftlichen Einordnung der Studie. Folglich kann dieser Abschnitt später als Basis zur Diskussion der Ergebnisse und zum Aufzeigen der Limitationen für die Studie herangezogen werden.

Die Probandenstudie zur Feststellung des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild eines p-polarisierten HUD ist eine einfaktorielle Untersuchung. Sie zielt darauf ab eine Qualitätskennzahl mit einem veränderlichen Faktor zu untersuchen. Der dabei veränderliche Faktor ist das Leuchtdichteverhältnisse  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild. Im Folgenden sind Versuchsträger, Versuchsobjekte und -subjekte sowie der Aufbau und Ablauf der Studie beschrieben.

### **Versuchsträger**

Der Versuchsträger muss es den Proband:innen unter möglichst realen Umständen ermöglichen die genaue Wahrnehmungs- und Störschwelle für das Doppelbild eines p-polarisierten HUD festzustellen. Da kein p-polarisiertes HUD System zur Verfügung steht und ein solches auch nicht die präzise Veränderung des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  ermöglichen würde, ist es nötig einen alternativen Versuchsträger aufzubauen. Damit die Proband:innen ein tatsächliches virtuelles Bild und damit den tatsächlichen Abbildungsfehler bewerten können, soll ein Mercedes-Benz Serienfahrzeug Verwendung finden. Die Ansprüche an das Versuchsfahrzeug beschränken sich darauf, dass dieses ein HUD enthalten muss. Als Versuchsträger wird eine Mercedes-Benz CLS-Klasse Modelljahr 2020 ausgewählt.

Das Versuchsfahrzeug muss schlussendlich dazu imstande ein Doppelbild nachzubilden, wie es in einem p-polarisierten HUD System auftreten würde. Um dies umzusetzen soll die Darstellung von Testbildern im Fahrzeug möglich sein. Auf diese Weise können Testbilder mit manipuliertem Doppelbild dargestellt werden, welche den gewünschten vertikalen Abstand und

die gewünschten Leuchtdichteverhältnisse  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundärem Bild aufweisen. Zur Umsetzung dieser Funktionen muss das Übermitteln der gewünschten Testbilder an den HUD Projektor möglich sein. Die Bereitstellung der Testbilder an den HUD Projektor erfolgt analog der ersten Probandenstudie mit Hilfe einer *Image Box* der Firma TZ Electronic Systems GmbH (siehe Abschnitt 4.2.1). Über die Image Box besteht via HSVL die Möglichkeit zur Übertragung der gewünschten Bildinhalte und deren passendes Warping an den HUD Projektor. Hierfür muss die HSVL Videoleitung freigelegt und in den Innenraum geführt werden, da diese in Serienfahrzeugen den HUD Projektor mit dem Kombiinstrument verbindet. In Abb. 5.17 ist die modifizierte Mercedes-Benz CLS-Klasse inkl. Image Box und HSVL Scaler zu sehen. Letzterer ist nötig, da die Image Box HSVL-S Signale aussendet und der HUD Projektor nur HSVL-D Videosignale empfängt.



**Abb. 5.17: Modifizierte Mercedes-Benz CLS-Klasse zur Anzeige individueller Testbilder unter Verwendung einer (a) Image Box und eines (b) HSVL Scaler**

Zudem ist es nötig die weiteren Parameter des HUD Projektors kontrollieren zu können. Für die Studie relevant sind vor allem die Spiegelposition und der Lichtstrom der Leuchtquelle. Über die Spiegelposition erfolgt die Einstellung der virtuellen Bildposition. Über den Lichtstrom der Leuchtquelle erfolgt die Einstellung der Leuchtdichte des virtuellen Bildes. Die Kontrolle und Einstellung dieser Parameter wird mit Hilfe direkter Diagnosefunktionen am Fahrzeug umgesetzt. Zur Umsetzung der Diagnose findet ein direkter Zugriff auf den CAN Bus des Fahrzeugs über die Schnittstelle der On Board Diagnose (OBD) statt. Mit Hilfe der Software *DTS.Monaco* der Firma Softing können Diagnosebefehle, wie bspw. die Einstellung des Lichtstroms für den HUD Projektor, an das Fahrzeug übermittelt werden. Ansonsten sind keine Änderungen am Serienzustand des Fahrzeugs nötig. Sowohl HUD Projektor als auch WSS sind Serienkomponenten.

Bei der Auswahl des Versuchsfahrzeugs ist zu beachten, dass dessen virtuelles Bild keinen sichtbaren Doppelbildfehler aufweist, damit die Bewertung der Proband:innen keine ungewollte Beeinflussung erfährt. Die Proband:innen sollen ausschließlich das manuell erzeugte Doppelbild der Testbilder bewerten. Die Beschreibung der Testbilder erfolgt im folgenden Abschnitt.

## Versuchsobjekte

Die Versuchsobjekte der Studie sind die Testbilder mit verschiedenen Stufen des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundärem Bild. Während die Leuchtdichte des primären Bildes  $L_P$  gleich bleibt, erfolgt für die Leuchtdichte des sekundären Bildes  $L_S$  eine Anpassung in kleinen Schritten. Auf diese Weise können den Proband:innen reproduzierbar unterschiedliche Leuchtdichteverhältnisse  $\frac{L_P}{L_S}$  zur Bewertung gezeigt werden, wodurch eine genaue Ermittlung der Wahrnehmungs- und Störschwelle möglich ist. Wie bereits zuvor beschrieben sollen tatsächliche Anzeigeninhalte aus dem Serienfahrzeug als Basis dienen um den Proband:innen eine möglichst reale Fahrsituation bereitzustellen. In Abb. 5.18 sind vier der insgesamt 50 möglichen Abstufungen des während der Studie gezeigten Doppelbildfehlers zu sehen. Der vertikale Abstand zwischen primärem und sekundärem Bild ist immer derselbe. Neben dem vertikalen Doppelbildfehler, soll zusätzlich ein leichter horizontaler Doppelbildfehler in den Testbildern enthalten sein. Die gewählten Abstände entsprechen einem Worst-Case-Szenario, in welchem die Reflektion des primären Bildes an der Innenfläche F4 und die Reflektion des sekundären Bildes an der Außenfläche F1 der WSS entstehen. Die Testbilder entsprechen den größtmöglichen Abständen eines Doppelbildfehlers und verursachen damit die am störendsten wahrzunehmenden Doppelbildfehler für die Proband:innen.

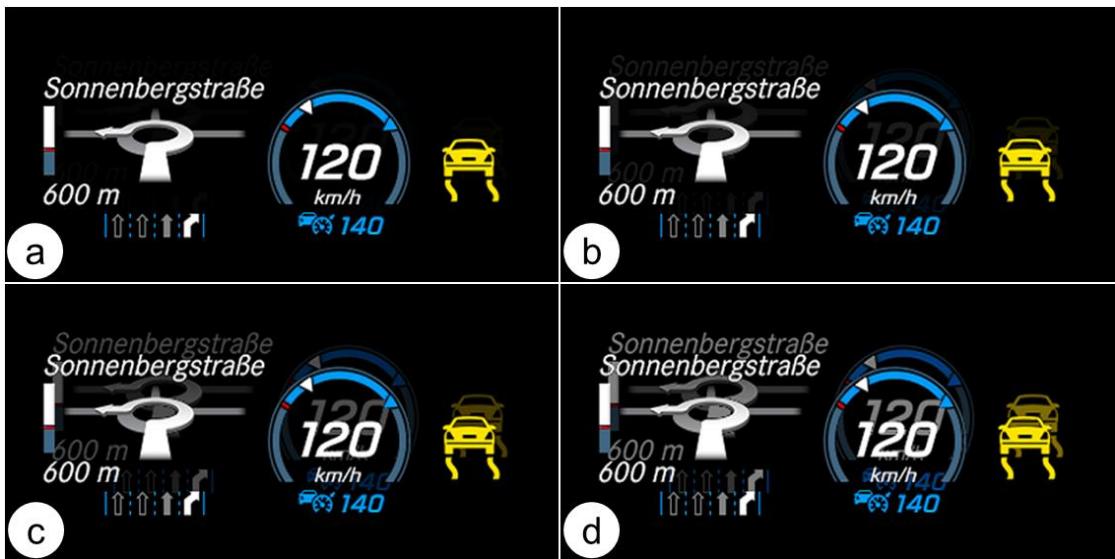


Abb. 5.18: Testbilder mit manipuliertem Doppelbildfehler - Helligkeiten des sekundären Bildes von (a) 100 % bis 50 % weniger als das primäre Bild.

Die Testbilder sind in PowerPoint erstellt. Das primäre und sekundäre Bild sind überlagert auf schwarzem Hintergrund dargestellt. Das sekundäre Bild befindet sich im Hintergrund und dessen geringere Leuchtdichte im Vergleich zum primären Bild wird über die Funktion *Transparenz* in PowerPoint umgesetzt. Bei einer Transparenz von 100 % (siehe Abb. 5.18 a) ist das sekundäre Bild nicht mehr zu erkennen. Bei einer Transparenz von 50 % ist das sekundäre Bild sehr deutlich zu erkennen und es entsteht ein sehr störender Doppelbildfehler. Die Abstufungen sind als 1 % Schritte, und damit sehr fein, umgesetzt. Neben dem standardmäßigen Warping für diese Baureihe, welches über die Image Box umgesetzt ist, sind keine weiteren Maßnahmen zur verzerrungsfreien Darstellung nötig, da die Proband:innen ausschließlich den Doppelbildfehler bewerten sollen.

## Versuchssubjekte

Die Versuchssubjekte der Studie sind die Proband:innen. Im Gegensatz zur Studie in Kapitel 4 nehmen an dieser zweiten Studie ausschließlich interne Proband:innen teil. Grund hierfür sind die durch den Corona-Virus bedingten Umstände und Regelungen zum Zeitpunkt der Studie, welche die Teilnahme externer Proband:innen ausschließen. Die getroffenen Maßnahmen zur sicheren Durchführung der Studie im Anbetracht des Infektionsrisikos sind im folgenden Abschnitt *Aufbau und Ablauf* zu finden. Die Auswahl und Akquise der Proband:innen erfolgt innerhalb des Bereichs Forschung & Entwicklung der Mercedes-Benz AG. Wie bereits in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, erfolgt auch in dieser Studie eine Selbstbeurteilung anhand der Vorgaben zur Durchführung einer Studie und zum Umgang mit Proband:innen. Diese dient der

Sicherstellung der ethisch und rechtlich korrekten Durchführung der Studie hinsichtlich des Probandenmanagements.

Das Ziel der Studie ist die Bewertung der subjektiven Wahrnehmung des Doppelbildfehlers hinsichtlich dem Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild eines p-polarisierten HUD Systems durch die Proband:innen. Daher ist es analog zur Studie in Kapitel 4 eine Voraussetzung, dass die Proband:innen bereits Erfahrung mit HUD Systemen besitzen. Hintergrund dieser Entscheidung ist erneut, dass Proband:innen, welche zum ersten Mal ein HUD erleben, von der virtuellen Bilddarstellung begeistert sind und daher keine repräsentative subjektive Bewertung des Doppelbildfehlers durchführen können.

Insgesamt nehmen 46 Proband:innen an der Studie teil. Um den Einfluss möglicher Störfaktoren auf die Bewertung der Proband:innen zu untersuchen, werden einige allgemeine Daten der Proband:innen erhoben. Die Störfaktorenanalyse ist wichtig, da durch ausschließliche Verwendung interner Proband:innen die Auswahlmöglichkeiten zur Sicherstellung eines heterogenen Probandenkollektivs begrenzt sind. Zu den allgemein erhobenen Daten gehören Alter, Größe, Geschlecht, Arbeit und Erfahrung mit HUD sowie die Verwendung von Sehhilfen der Proband:innen. Das Alter der Proband:innen reicht von 21 bis 60 Jahren, der Altersdurchschnitt beträgt 39,5 Jahre und die Standardabweichung 11,7. Das Probandenkollektiv bildet sich aus 10 weiblichen und 36 männlichen Teilnehmer:innen, wovon 13 Teilnehmer:innen direkt oder indirekt in der HUD Entwicklung tätig sind. Bezuglich der Nutzung eines HUD geben ausschließlich 9,1 % der 46 Proband:innen an, immer ein HUD im Fahrzeug zu nutzen. 20,5 % der Proband:innen geben an, ein HUD regelmäßig zu nutzen und 70,4% geben an, ein HUD selten zu nutzen. Des Weiteren erfolgt die Erhebung der Körpergröße der Proband:innen. Diese beträgt durchschnittlich 177,27 cm mit einer Standardabweichung von 7,34. Außerdem verwenden 17 Proband:innen eine Sehhilfe (Brille oder Kontaktlinsen). Die Analyse der möglichen Störfaktoren zur Bewertung der Wahrnehmungs- und Störschwelle für ein Doppelbild in einem p-polarisierten HUD System ist in Abschnitt 5.3.3 dokumentiert.

## Aufbau und Ablauf

Im letzten Schritt der Studienplanung erfolgt die Festlegung des Aufbaus und Ablaufs der Studie. Wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben, soll der Studienaufbau den Proband:innen eine möglichst reale Fahrsituation darstellen, um eine belastbare Bewertung zu ermöglichen. Da der Versuchsträger eine Mercedes-Benz CLS-Klasse ist und ein tatsächliches HUD System im Serienzustand Verwendung findet, kann eine optimale und repräsentative Bewertungssituation

realisiert werden. Trotz der Möglichkeit eine bewegliche Fahrsituation umsetzen zu können, wird hiervon abgesehen, damit die Proband:innen ihre Aufmerksamkeit ausschließlich auf die virtuellen Bildinhalte richten.

Um die Wahrnehmungs- und Störschwelle bzgl. des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  für primäres und sekundäres Bild sowohl in hellen und dunklen Lichtverhältnissen zu ermitteln, erfolgt eine Aufteilung der Studie in zwei Abschnitte. Der erste Teil der Studie findet draußen auf einem asphaltierten Parkplatz innerhalb des Geländes des Mercedes-Benz Technology Centers in Sindelfingen statt. Der Versuchsträger ist in Richtung Süden gerichtet. Am Tag der Durchführung muss heller Sonnenschein ohne Bewölkung vorliegen. Auf diese Weise kann der Doppelbildfehler eines p-polarisierten HUD an einem hellen Sonntag untersucht werden. Der zweite Teil der Studie findet drinnen in einer Tiefgarage innerhalb des Geländes des Mercedes-Benz Technology Centers in Sindelfingen statt. Im Durchführungsbereich der Studie ist die Beleuchtung stark gedimmt. Die Scheinwerfer des Versuchsträgers sind während der Studie eingeschaltet. Der zweite Teil der Studie entspricht damit einer Nachtfahrt oder Durchfahrt eines dunklen Tunnels. In beiden Situationen, sowohl draußen als auch drinnen, erfolgt die Ausrichtung des Versuchsträgers so, dass das virtuelle Bild immer vor der Fahrbahn erscheint. Es dürfen keine Überlagerungen des virtuellen Bildes mit anderen Fahrzeugen, Personen oder sonstigen Gegenständen stattfinden, welche die Betrachtung und Wahrnehmung des virtuellen Bildes durch die Proband:innen stören könnten. Dieser prinzipielle Aufbau repräsentiert die realistischen Worst-Case Fälle bei der Nutzung eines HUD. Die Ansteuerung und Bildgebung des bzw. an den HUD Projektor erfolgt wie im Abschnitt *Versuchsträger* beschrieben. Die Helligkeit des virtuellen Bildes wird mit Hilfe direkter Diagnosebefehle über einen PC an das Bordnetz des Fahrzeugs und damit den HUD Projektor kommuniziert. Für den Studienteil in heller Umgebung erfolgt die Einstellung der virtuellen Bildhelligkeit auf ca. 12.000 cd/m<sup>2</sup>. Für den Studienteil in dunkler Umgebung erfolgt die Einstellung der virtuellen Bildhelligkeit auf ca. 200 cd/m<sup>2</sup>. Die virtuellen Bildhelligkeiten werden während der ganzen Studie nicht verändert. Die anzuzeigenden Testbilder werden via Image Box an den HUD Projektor der Mercedes-Benz CLS Klasse gesendet. Der Wechsel der Testbilder erfolgt ebenfalls über die Bedienung der Image Box. Diese Aufgabe fällt der Interviewer:in zu. Außerdem wird für den Umstand eines Ausfalls des Versuchsträgers ein baugleiches Ersatzfahrzeug vorbereitet und als Back-up bereitgestellt.

Da die Befragung der Proband:innen im geschlossenen Fahrzeug stattfindet und die virtuellen Testbilder mit verschiedenen Stufen des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundärem Bild nur für die Fahrer:in zu sehen sind, sind keine zusätzlichen Maßnahmen für den Schall- und oder Sichtschutz nötig. Nach jeder Proband:in ist das Lüften und Desinfizieren des Fahrzeugs nötig. Im speziellen ist darauf zu achten, dass die Berührflächen am Lenkrad, der Sitzeinstellung und der Tür des Fahrzeugs ausreichend und gründlich desinfiziert werden. Zusätzlich müssen alle Proband:innen und Interviewer:innen während der gesamten Studie eine medizinische Mund-Nasen-Maske verwenden. Diese Maßnahmen dienen der Minimierung des Infektionsrisikos mit dem Corona-Virus. Auf diese Weise konnten Infektionen erfolgreich verhindert werden.

In Abb. 5.19 sind die zwei Mercedes-Benz CLS Klassen als Versuchsfahrzeuge vor dem Start der Studie in heller Umgebung zu sehen. Beide Fahrzeuge sind für die Studie präpariert und ermöglichen die geplante Bewertung des Doppelbildfehlers eines p-polarisierten HUD durch die Proband:innen.



**Abb. 5.19: Mercedes-Benz CLS Klassen (BR257) als Versuchsfahrzeuge vor Start der Studie in heller Umgebung**

Der Ablauf der Studie erfolgt für jede Proband:in nach demselben Schema. Bei Ankunft füllen die Proband:innen zunächst einen Fragebogen aus, welcher die im vorigen Abschnitt benannten Daten abfragt. Die Erfassung der Daten dient der nachfolgenden Störfaktoranalyse. Bevor die Proband:innen in den Versuchsträger steigen, müssen diese sich vorab die Hände desinfizieren. Zunächst muss die Proband:in eine Sitzposition finden, welche es ihr ermöglichen würde das Fahrzeug sicher zu bewegen. Dazu kann die Proband:in die Position des Sitzes und des Lenkrads einstellen. Anschließend erfragt die Interviewer:in, ob das virtuelle Bild des HUD vollumfänglich sichtbar ist oder eine vertikale Positionsanpassung nötig bzw. gewünscht ist. Bei Bedarf kann die vertikale Position des virtuellen Bildes über das Fahrzeugmenü der Mercedes-Benz CLS Klasse korrigiert werden. In Abb. 5.20 ist ein Proband beispielhaft

abgebildet, welcher bereits die korrekte Sitzposition gefunden hat und seinen Blick auf das virtuelle Bild richtet.

Das initiale Testbild enthält keinen sichtbaren Doppelbildfehler. Entsprechend besitzt das sekundäre Bild in diesem Fall eine Transparenz von 100 % und ist damit nicht vorhanden. Die Proband:in erhält nun die Anweisung das virtuelle Bild zu betrachten und Bescheid zu geben, falls Auffälligkeiten im virtuellen Bild zu erkennen sind. Dabei erfolgt kein Hinweis darauf, dass die Studie darauf abzielt den Doppelbildfehler im virtuellen Bild in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zu bewerten. Die Proband:innen erhalten ansonsten keine weiteren Anweisungen. Es ist den Proband:innen freigestellt Ihre Kopfpositionen zu verändern.



**Abb. 5.20: Proband während der Studie in dunkler Umgebung mit Sicht auf das virtuelle Bild des HUD**

Wenn die Einstellung von Sitzposition und Bildposition abgeschlossen ist, beginnt die Interviewer:in mit der schrittweisen Erhöhung der Helligkeit des sekundären Bildes. Hierfür werden nacheinander die vorbereiteten Testbilder mit verschiedenen Stufen des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundärem Bild angezeigt. Dabei bleibt die Leuchtdichte des primären Bildes  $L_P$  gleich. Durch die Verringerung der Transparenz des sekundären Bildes erhöht sich die Leuchtdichte des sekundären Bildes  $L_S$  in kleinsten Schritten. Zwischen jedem Wechsel der Testbilder lässt die Interviewer:in einige Sekunden verstrecken, um der Proband:in die Möglichkeit zu geben die Veränderungen im virtuellen Bild erkennen zu können. Auf diese Weise kann eine reproduzierbare Anzeige des sinkenden Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zur Bewertung erfolgen. Dadurch ist eine genaue Ermittlung der Wahrnehmungs- und Störschwelle möglich.

Erkennt die Proband:in erstmalig ein Doppelbild, notiert sich die Interviewer:in das Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild des aktuell angezeigten Testbilds. Alle vorigen Kommentare und Anmerkungen der Proband:innen zu anderweitigen Auffälligkeiten, bspw. Verzerrungen des virtuellen Bildes, werden ignoriert. Das erstmalige Erkennen des Doppelbilds entspricht der *Wahrnehmungsschwelle* der Proband:in. Nun erfolgt die Aufklärung der Proband:in durch die Interviewer:in, dass die Studie der Untersuchung des Doppelbildfehlers dient. Um anschließend die Störschwelle zu ermitteln erfragt die Interviewer:in, ob die aktuelle Ausprägung des Doppelbildfehlers für die Proband:in störend erscheint bzw. Probleme bei der Wahrnehmung des virtuellen Bildes darstellt. Ist dies nicht der Fall erhöht die Interviewer:in die Leuchtdichte  $L_S$  des sekundären Bildes in weiteren kleinen Schritten und weist die Proband:in an Bescheid zu geben, sobald der Doppelbildfehler eine störende Ausprägung erreicht. Empfindet die Proband:in die Ausprägung des Doppelbildfehlers als störend, notiert sich die Interviewer:in erneut das entsprechende Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild des aktuell angezeigten Testbilds. Dieses zweite Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  entspricht der *Störschwelle* der Proband:in.

Da davon auszugehen ist, dass die Proband:in den Doppelbildfehler bei erneuter Durchführung der Studie früher erkennen würde, soll in einer zweiten Iteration eine Validierung der erstmalig ermittelten Wahrnehmungs- und Störschwelle stattfinden. In der zweiten Iteration ist allerdings die Reihenfolge der Testbilder umgekehrt. Dies bedeutet, dass das initiale Testbild einen stark sichtbaren Doppelbildfehler aufweist. Das sekundäre Bild besitzt in diesem Fall eine Transparenz von lediglich 50 %. Die Interviewer:in verringert nun schrittweise die Leuchtdichte  $L_S$  des sekundären Bildes über das Anzeigen der verschiedenen Testbilder. Jedes Testbild ist erneut einige Sekunden zu sehen um der Proband:in die Möglichkeit zu geben, Veränderungen im virtuellen Bild ausreichend wahrzunehmen. Die Proband:in erhält zuvor die Anweisung Bescheid zu geben, wenn die Ausprägung des sekundären Bildes so gering ist, dass keine störende Empfindung mehr gegeben ist. Empfindet die Proband:in die Ausprägung des Doppelbildfehlers nicht mehr als störend, notiert sich die Interviewer:in das Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild des zuvor angezeigten Testbilds. Dieses Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  entspricht der Störschwelle der Proband:in in der zweiten Iteration. Anschließend verringert die Interviewer:in die Leuchtdichte  $L_S$  des sekundären Bildes in weiteren kleinen Schritten und weist die Proband:in an Bescheid zu geben,

sobald der Doppelbildfehler nicht mehr zu erkennen ist. Kann die Proband:in den Doppelbildfehler nicht mehr erkennen, notiert sich die Interviewer:in erneut das Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild des zuvor angezeigten Testbilds. Dieses Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  entspricht der Wahrnehmungsschwelle der Proband:in in der zweiten Iteration.

Der Ablauf ist für beide Teile der Studie, also in heller und dunkler Umgebung, genau gleich. Das Probandenkollektiv wird in zwei Gruppen aufgeteilt und dem Studienteil in heller oder dunkler Umgebung zugeteilt. Jede Proband:in partizipiert nur an einem Teil der Studie. Der beschriebene Aufbau und Ablauf der Studie ermöglicht eine genaue Ermittlung der Wahrnehmungs- und Störschwelle des Doppelbildfehlers in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  für ein p-polarisiertes HUD System. Zudem ist anhand der zweiten Iteration eine Validierung der ersten Iteration möglich. Darüber hinaus gibt die zweite Iteration Aufschluss darüber, ob sich die Wahrnehmungs- und Störschwelle verändern, wenn eine Fahrer:in sich dessen Bewusst ist, dass ein Doppelbildfehler im virtuellen Bild eines HUD auftreten kann bzw. den Doppelbildfehler im betroffenen HUD System zuvor schon einmal erkennen konnte. Die Aufteilung der Studie in eine helle und dunkle Umgebung ermöglicht des Weiteren die Untersuchung des erwarteten Einflusses der Umgebungshelligkeit auf die Wahrnehmungs- und Störschwelle. Die Aufteilung des Probandenkollektivs führt zu einem Between-Subjects-Design zwischen den Proband:innen welche die Studie in einer hellen Umgebung und den Proband:innen welche die Studie in einer dunklen Umgebung durchführen. Innerhalb der beiden Gruppen besteht jeweils ein Within-Subjects-Design.

Wie in Abschnitt 5.3 erläutert hat die Probandenstudie das Ziel, die Wahrnehmungs- und Störschwelle für das Leuchtdichteverhältnis des Doppelbilds  $\frac{L_P}{L_S}$  zu bestimmen. Auf diese Weise soll eine Festlegung des zulässigen Grenzwertes für die neue Qualitätskennzahl stattfinden. Die Ermittlung der Wahrnehmungs- und Störschwelle für  $\frac{L_P}{L_S}$  ist nötig, um die Maßnahmen zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD Systems zu definieren und zu prüfen ob eine kostenneutrale Realisierung möglich ist. Die Probandenstudie soll zur Beantwortung der Forschungsfragen *E* und *G* beitragen:

*(E) Wie könnte eine kostenneutrale Realisierung eines HUD Systems aussehen, welche die Sichtbarkeit des virtuellen Bildes mit polarisierender Sonnenbrille ermöglicht?*

*(G) Wie könnten Ansätze zur Quantifizierung sowie Lösung potentieller Abbildungsfehler und weiterer Schwierigkeiten aussehen?*

Daraus ergeben sich im Vorfeld der Studie bereits drei Hypothesen, welche sich aus dem Studiendesign ableiten lassen:

*Hypothese 5: Die Wahrnehmungs- und Störschwelle des Doppelbildfehlers in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses sind gleich.*

*Hypothese 6: Die Wahrnehmungs- und Störschwelle des Doppelbildfehlers in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses sind gleich für eine helle und dunkle Umgebungshelligkeit.*

*Hypothese 7: Die Wahrnehmungs- und Störschwelle des Doppelbildfehlers in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses sind gleich für die erste und zweite Studieniteration.*

Eine Prognose bzgl. der Bewertung von Hypothese H5 vor der Studie ist nur bedingt möglich, da vorab nicht klar ist, ob die Proband:innen beim ersten Erkennen eines Doppelbilds, dieses bereits als störend empfinden. Hinsichtlich Hypothese H6 ist dagegen davon auszugehen, dass sich die Wahrnehmungs- und Störschwellen zwischen heller und dunkler Umgebung unterscheiden, da die Wahrnehmung von Helligkeiten immer relativ zur Umgebungshelligkeit ausfällt. Eine Prognose zu Hypothese H7 ist erneut schwierig. Während für die Störschwelle bei den Iterationen 1 und 2 eher ähnliche Ergebnisse zu erwarten sind, sollten für die Wahrnehmungsschwelle Unterschiede zwischen den Iterationen 1 und 2 vorliegen.

Die Definition der Vorgehensweise und Prämissen (Abschnitt 5.3.1) sowie die genaue Beschreibung des Studiendesigns (Abschnitt 5.3.2) ermöglichen es die nachfolgenden Ergebnisse einordnen, bewerten und interpretieren zu können. Das gewählte Studiendesign stellt repräsentative Ergebnisse für die Bewertung des Doppelbildfehlers in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild sicher. Des Weiteren ermöglicht das Studiendesign die statistische Analyse der Ergebnisse und liefert damit wissenschaftlich fundierte Antworten zu den Hypothesen.

Im Folgenden Abschnitt 5.3.3 sind die Ergebnisse der Studie, inklusive deren statistische Auswertung und die Beantwortung der Hypothesen dokumentiert. Nachfolgend findet sich in Abschnitt 5.3.4 die Feststellung des tatsächlichen minimalen Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$ , dessen Ermittlung anhand von Leuchtdichtemessungen an einem Prüfstand stattfindet.

### 5.3.3. Ergebnisse

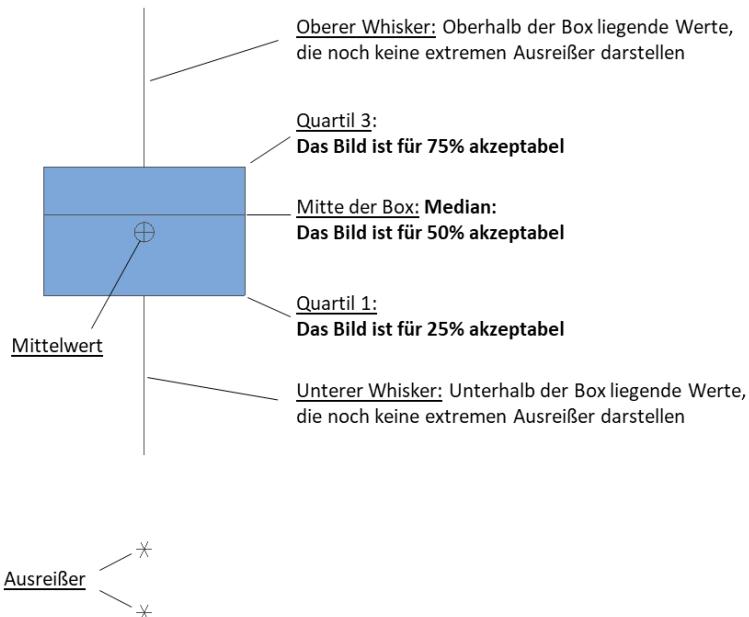
In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der Studie zum zulässigen Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  des Doppelbildes im p-polarisierten HUD dokumentiert. Die subjektiven Bewertungen zu den Wahrnehmungs- und Störschwellen der Proband:innen stellen dabei die Ergebnisse dar. Die Proband:innen bewerteten den Doppelbildfehler in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundärem Bild. Zunächst erfolgt eine allgemeine Beschreibung der Ergebnisse mit anschließender statistischer Analyse der Störfaktoren und der Hypothesen.

#### 5.3.3.1. Allgemeine Ergebnisse

Insgesamt nehmen 46 Proband:innen an der Studie teil. Aufgrund von Unregelmäßigkeiten können die Bewertungen zweier Proband:innen nicht in die Auswertung einfließen. Alle Proband:innen haben die Studie in demselben Fahrzeug durchführen können. Entsprechend kam das Ersatzfahrzeug nicht zum Einsatz. Von den letztendlich 44 Proband:innen nahmen 20 am Studienteil im heller Umgebung und 24 am Studienteil in dunkler Umgebung teil. Alle Proband:innen bewerteten jeweils vier Datenpunkte. Diese sind die Wahrnehmungs- und Störschwelle der ersten Iteration sowie die Wahrnehmungs- und Störschwelle der zweiten Iteration. Damit liegen in Summe 176 Datenpunkte für die Auswertung vor. Im Folgenden erhalten diese eine neue Nomenklatur:

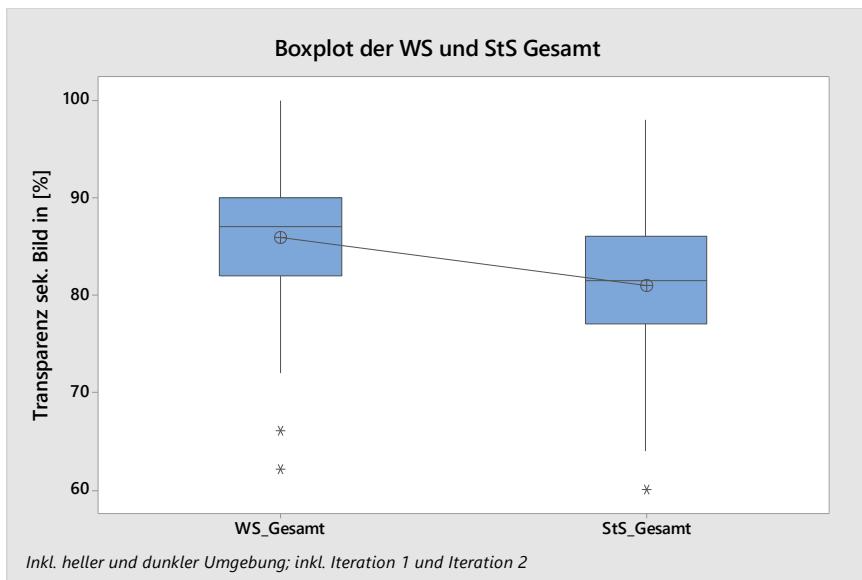
- Wahrnehmungsschwelle der ersten Iteration:  $WS_1$
- Störschwelle der ersten Iteration:  $StS_1$
- Wahrnehmungsschwelle der zweiten Iteration:  $WS_2$
- Störschwelle der zweiten Iteration:  $StS_2$

Des Weiteren erfolgt eine Unterscheidung der Bewertungen nach den Studienteilen in heller und dunkler Umgebung. Bspw. erhält die erste Iteration der Störschwelle in heller Umgebung die Bezeichnung  $H\_StS_1$  oder die zweite Iteration der Wahrnehmungsschwelle in dunkler Umgebung die Bezeichnung  $D\_WS_2$ . Sollten gesamtheitlich beide Iterationen in heller und dunkler Umgebung zu Nennen sein, wird hierauf explizit hingewiesen. Die allgemeinen Ergebnisse sind in Form von Boxplots dargestellt. In Abb. 5.21 ist eine spezifische Erläuterung des Aufbaus eines Boxplot zu sehen, welche sich bereits auf die Bewertungen der Proband:innen bezieht. Die folgenden Diagramme, Darstellungen und Auswertungen sind mit Hilfe der statistischen Software Minitab® erstellt.



**Abb. 5.21: Aufbau und Erläuterung eines Boxplot Diagramms**

In Abb. 5.22 ist ein Boxplot zu sehen, welches alle Bewertungen der 44 Proband:innen jeweils für die WS und StS beider Iterationen sowie in heller und dunkler Umgebung abbildet. Entsprechend enthält das Diagramm alle 176 Datenpunkte der Studie. Die X-Achse des Boxplot zeigt die Aufteilung der Bewertung nach WS und StS. Die Y-Achse des Diagramms gibt die Bewertungen der Proband:innen für die WS und StS an. Die Bewertungen zeigen jeweils die Transparenz des sekundären Bildes in Prozent an, bei denen die Proband:innen erstmalig den Doppelbildfehler erkennen (WS) bzw. den Doppelbildfehler als störend empfinden (StS). Desto höher ein Wert in diesem Diagramm ist, desto höher ist die Transparenz des sekundären Bildes und entsprechend höher ist das Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_p}{L_s}$ . Die gewählte Skala reicht in allen Diagrammen von 100 %, was keinem sichtbaren Doppelbild entspricht, bis 60 %, was einem sehr starken Doppelbild entspricht. Die Bewertung der WS besitzen im Durchschnitt einen Wert von 86 % und die StS einen Wert von 81 %. Hieran ist zu erkennen, dass die Proband:innen nicht beim ersten Erkennen des sekundären Bildes dieses auch direkt als störend empfinden.



**Abb. 5.22: Boxplot der gesamtheitlichen Wahrnehmungs- und Störschwelle für den Doppelbildfehler in Abhängigkeit der Leuchtdichte des sekundären Bildes  $L_s$**

In Abb. 5.23 sind die WS und StS anhand der Studienteile in dunkler und heller Umgebung aufgeteilt. Dabei ist auffällig, dass die Proband:innen in einer dunkleren Umgebung empfindlicher hinsichtlich des Doppelbildfehlers sind, da WS und StS jeweils für höhere Transparenzen des sekundären Bildes eintreten. Dies spiegelt sich auch in den Mittelwerten wieder. Während in heller Umgebung die H\_WS bei 83 % und die H\_StS bei 77 % liegen, betragen diese in dunkler Umgebung für die D\_WS 88 % und D\_StS 84 %. Mit ausstehender Untersuchung zum Nachweis der statistischen Signifikanz dieser Beobachtung, bestätigen die Ergebnisse die Erwartungen hinsichtlich der Abhängigkeit zu den Lichtverhältnissen der Umgebung und damit die Arbeit von Qin et al. (2017). Um schlussendlich die Kundenbedürfnisse zu erfüllen, ist das minimal zulässige Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_p}{L_s}$  in einer dunklen Umgebung entscheidend. Aus diesem Grund liegt nachfolgend die Fokussierung auf die D\_WS und D\_StS in dunkler Umgebung.

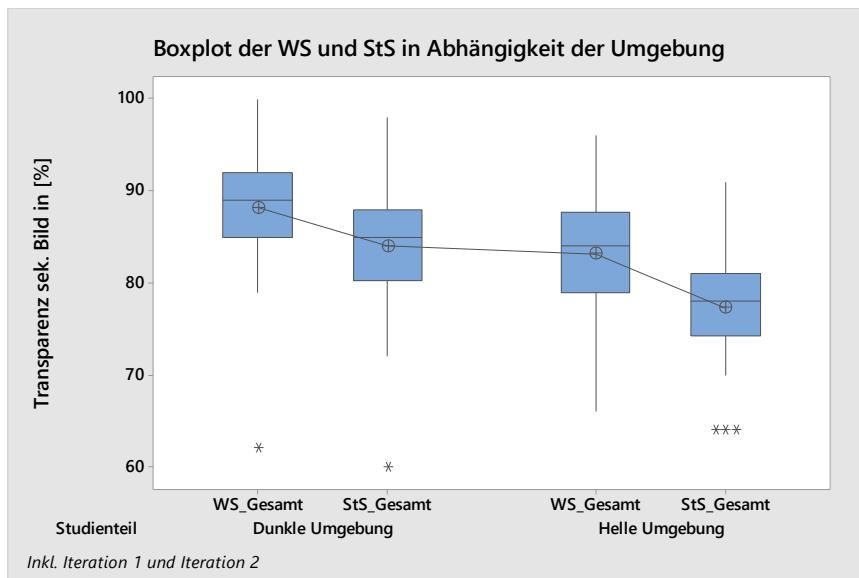


Abb. 5.23: Boxplot der WS und StS getrennt nach dunkler und heller Umgebung

Zuletzt muss an dieser Stelle ein Vergleich zwischen Iteration 1 und Iteration 2 in dunkler Umgebung stattfinden. In Abb. 5.24 sind die D\_WS und D\_StS in dunkler Umgebung in Abhängigkeit von Iteration 1 und Iteration 2 zu sehen. In Iteration 1 liegt der Mittelwert für die D\_WS1 bei 85 % und in Iteration 2 bei D\_WS2 92 %. Für die D\_StS verhält sich das Ergebnis gleichermaßen. In Iteration 1 liegt die D\_StS1 bei durchschnittlich 83 % und in Iteration bei D\_StS2 85 %.

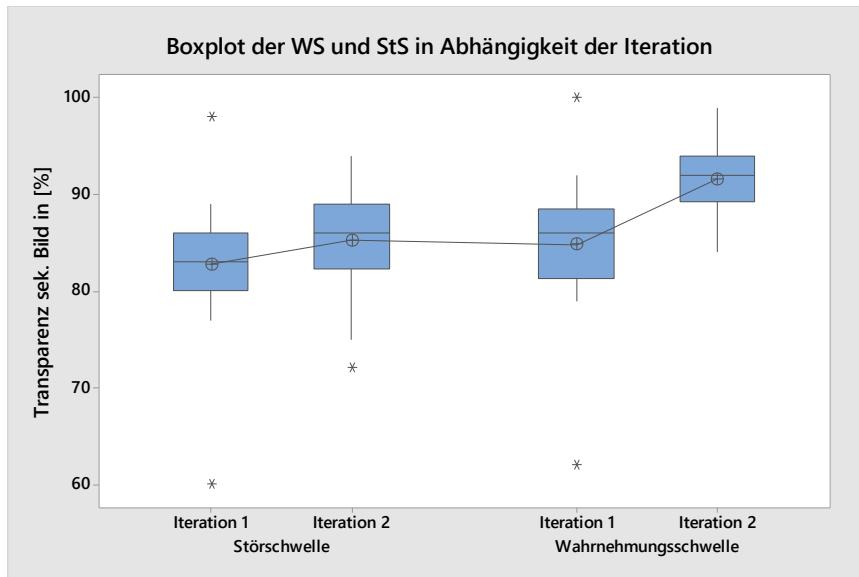


Abb. 5.24: Boxplot der WS und StS in dunkler Umgebung getrennt nach Iteration 1 und Iteration 2

Gemäß der Erwartung erhalten sowohl die WS als auch die StS in Iteration 2 höhere Werte bzgl. der Transparenz des sekundären Bildes. Das heißt, dass die Proband:innen in der zweiten Iteration jeweils empfindlicher hinsichtlich des minimal zulässigen Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  sind. Dies bestätigt die Annahme, wonach eine Proband:in nach erstmaliger Wahrnehmung

eines Doppelbildfehlers diesen auch bei geringerer Intensität erkennen kann und gleichzeitig diesen auch bei geringerer Intensität als störend empfindet.

Zusammenfassend deuten die Ergebnisse daraufhin, dass alle kontrollierten Faktoren (Transparenz des sekundären Bildes, Lichtverhältnisse der Umgebung, Iterationen) die Bewertung der Proband:innen beeinflussen. Entsprechend besteht immer ein Unterschied zwischen der WS und StS, welcher abhängig ist von einer hellen oder dunklen Umgebung und ob der ersten oder zweiten Iteration. Letzteres deutet daraufhin hin, dass die Proband:innen in einer ersten Iteration bzgl. des Doppelbildfehlers eine Sensibilisierung erhalten und somit in der zweiten Iteration empfindlicher für dessen Auftreten sind.

Folglich lassen die Ergebnisse bereits erste Rückschlüsse auf die Hypothesen H5, H6 und H7 zu, welche am Ende in Abschnitt 5.3.3 zu finden sind. In Abb. 5.22 ist zu erkennen, dass WS und StS unterschiedlich sind. Dies spricht für eine Ablehnung der Hypothese H5:

*Hypothese 5: Die Wahrnehmungs- und Störschwelle des Doppelbildfehlers in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses sind gleich.*

Abb. 5.23 zeigt, dass Unterschiede in der Bewertung für die WS und StS durch die Proband:innen in Abhängigkeit einer hellen oder dunklen Umgebung bestehen. Entsprechend ist auch hier eine Ablehnung der Hypothese H6 zu erwarten:

*Hypothese 6: Die Wahrnehmungs- und Störschwelle des Doppelbildfehlers in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses sind gleich für eine helle und dunkle Umgebungshelligkeit.*

Zuletzt ist Abb. 5.24 zu entnehmen, dass die Proband:innen in der zweiten Iteration empfindlicher ggü. auftretenden Doppelbildfehlern sind als in der ersten Iteration. Auch diese Beobachtung spricht für eine Ablehnung Hypothese H7:

*Hypothese 7: Die Wahrnehmungs- und Störschwelle des Doppelbildfehlers in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses sind gleich für die erste und zweite Studieniteration.*

Allerdings ist ebenfalls zu beachten, dass die Werte für die WS und StS jeweils eng beieinanderliegen und eine große Überschneidung besitzen. Daraus lässt sich schließen, dass ein erkannter Doppelbildfehler bereits bei geringer Erhöhung der Intensität als störend empfunden wird. Hierfür sprechen auch die ähnlichen Spannweiten zwischen WS und StS für

die unterschiedlichen Betrachtungen. Schlussendlich zeigt der Abschnitt zur statistischen *Analyse der subjektiven Bewertung zum Doppelbild* ob die beschriebenen Tendenzen auch tatsächlich statistische Signifikanzen aufweisen. Grundsätzlich ist außerdem festzustellen, dass die Proband:innen bereits bei geringsten Helligkeiten des sekundären Bildes einen Doppelbildfehler erkennen können und diesen auch als störend wahrnehmen. Daraus lässt sich bereits schließen, dass die Leuchtdichte des sekundären Bildes im Vergleich zur Leuchtdichte des primären Bildes um ein Vielfaches geringer ausfallen muss, um die Kundenerwartungen erfüllen zu können.

Abschließend ist zu definieren, welcher der ermittelten Schwellenwerte als Basis für das minimal zulässige Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild in einem p-polarisierten HUD System herangezogen werden kann. Die Studie zeigt, dass WS und StS zwar eng beieinanderliegen, aber dennoch einen Mittelwertunterschied von 4 % bzgl. der Transparenz des sekundären Bildes im Verhältnis zum primären Bild aufweisen. Da im allgemeinen Abbildungsfehler im virtuellen Bild eines HUD Systems auftreten, welche zwar von einer Fahrer:in erkannt aber nicht als störend empfunden werden, ist die *Störschwelle* maßgeblich für die Akzeptanz eines Abbildungsfehlers. Wichtig ist hierbei, dass eine störende Empfindung sowohl eine ästhetische Störung im Sinne eines *nicht Gefallens* als auch eine wahrnehmungsbezogene Störung im Sinne eines *nicht Erkennens* sein kann. Insbesondere Letzteres ist zwingend zu vermeiden, da eine Störung in der Wahrnehmung der virtuellen Bildinhalte zu einer Beeinträchtigung der Fahrsicherheit führen kann. Gründe hierfür können eine erhöhte kognitive Belastung oder das nicht Erkennen bzw. die Falschinterpretation möglicherweise sicherheitsrelevanter Inhalte sein. Mit dem Hintergrund vorliegender Studie und dem expliziten Hinweis der Interviewer:innen an die Proband:innen, dass sowohl eine ästhetische als auch wahrnehmungsbezogene Störung mit der StS gleichzusetzen sind, soll die *Störschwelle* als Basis der neuen Qualitätskennzahl fungieren.

Des Weiteren ist festzulegen ob die StS in heller oder dunkler Umgebung sowie die StS der ersten, der zweiten oder beider Iterationen den maßgebenden Schwellenwert darstellt. Aus den vorausgehenden Untersuchungen wird deutlich, dass die Proband:innen in dunkler Umgebung früher eine störende Wahrnehmung empfinden. Daher ist die StS in dunkler Umgebung heranzuziehen. Die Studie zeigt, dass die Proband:innen nach dem erstmaligen Erkennen und Bewerten eines Doppelbildfehlers (Iteration 1) anschließend empfindlicher beim Erkennen und Bewerten des Doppelbildfehlers sind (Iteration 2). Daher muss letzterer Fall, welcher durch die Iteration 2 abgedeckt ist, herangezogen werden, um die Erfüllung der Kundenanforderungen

sicherzustellen. Folglich stellt die *Störschwelle der zweiten Iteration in dunkler Umgebung D\_StS<sub>2</sub>* die Basis für die Definition des minimal zulässigen Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  dar (siehe Abb. 5.25).

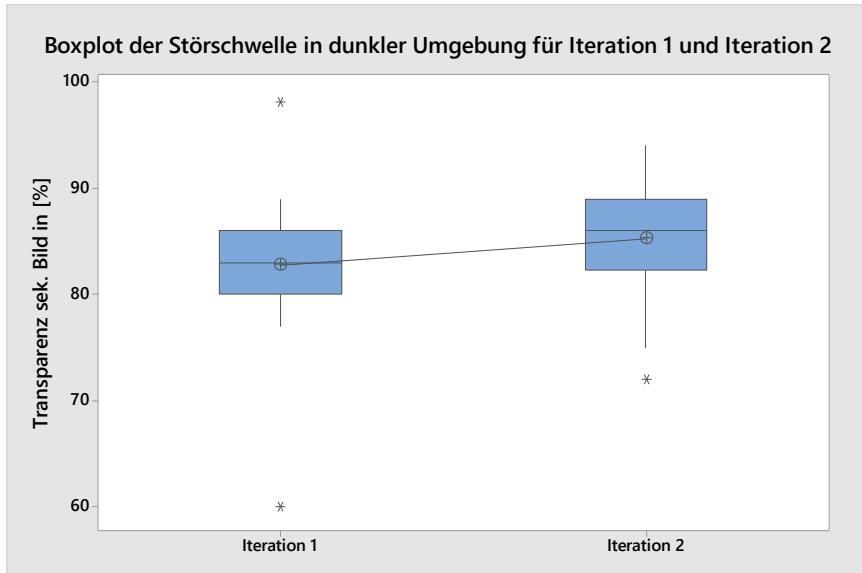
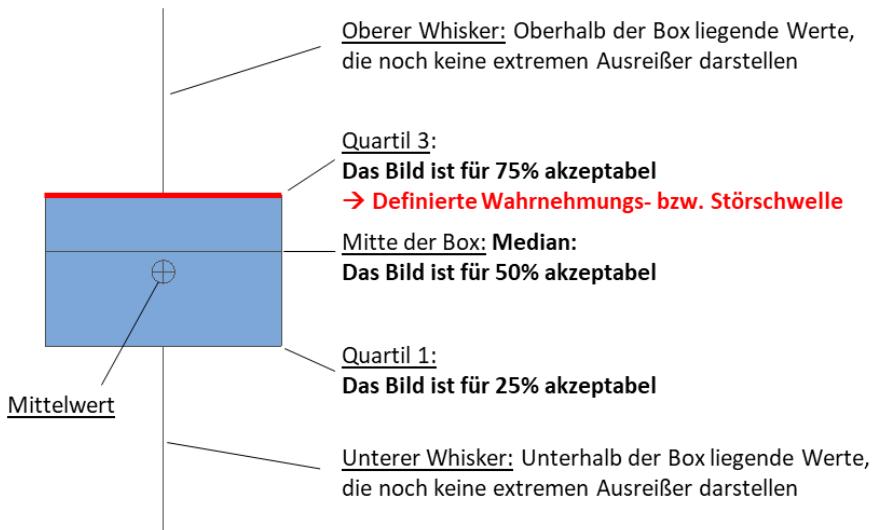


Abb. 5.25: Boxplot der Störschwelle in dunkler Umgebung für Iteration 1 und Iteration 2

Zuletzt erfolgt die Entscheidung ob tatsächlich die D\_StS<sub>2</sub> aller Proband:innen zur Festlegung des maßgeblichen Schwellenwertes herangezogen werden muss. Dies würde sicherstellen, dass alle potentiellen Kund:innen, welche durch die Proband:innen der Studie repräsentiert werden, den Doppelbildfehler als nicht störend empfinden. Allerdings könnten zur Erreichung zusätzliche technische Maßnahmen nötig sein, welche mit zusätzlichen Kosten verbunden wären. Im Spannungsfeld zwischen Qualität und Kosten, vor allem bei der Beurteilung subjektiver Qualität, kann auch ein Rückfall auf das dritte Quartil eine Lösung darstellen. Wie in Abb. 5.26 dargestellt, bedeutet dies, dass für 75 % der Proband:innen und damit der potentiellen Kund:innen die Erwartungen erfüllt werden können.

Darüber hinaus ist die Wahl des dritten Quartils zusätzlich dadurch zu rechtfertigen, dass die vorliegende Studie einem Worst-Case-Szenario entspricht, da Proband:innen sich ausschließlich auf das virtuelle Bild und mögliche Veränderungen darin fokussieren. Im tatsächlichen Fahrbetrieb ist nicht davon auszugehen, dass potentielle Kund:innen im gleichen Maße das virtuelle Bild beobachten und entsprechend sensibel für Abbildungsfehler sind.



**Abb. 5.26: Drittes Quartil der Bewertungen durch die Proband:innen als Schwellenwert für eine subjektive Qualitätskennzahl**

Daraus schließend erfolgt die Festlegung der Basis für das Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild im p-polarisierten HUD gemäß dem dritten Quartil der Störschwelle für die zweite Iteration in dunkler Umgebung  $D_{StS_2}$ . Das sekundäre Bild des entsprechenden Testbilds besitzt eine Transparenz von 89 % und stellt damit das gesuchte Ergebnis der Studie dar. Um hieraus das tatsächliche messbare Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  abzuleiten, erfolgt in Abschnitt 5.3.4 die Beschreibung und Entwicklung eines geeigneten Messsystems zur Feststellung der Leuchtdichte des primären und sekundären Bildes. Zuvor sind in den beiden nachfolgenden Abschnitten die statistische *Analyse der Störfaktoren* sowie die statistische *Analyse der subjektiven Bewertung zum Doppelbild* zur Bewertung der Hypothesen H5, H6 und H7 dokumentiert.

### 5.3.3.2. *Analyse der Störfaktoren*

In diesem Abschnitt findet die Analyse der Störfaktoren statt, um deren mögliche Einflüsse auf die Studienergebnisse durch das Probandenkollektiv zu untersuchen. Wie in Abschnitt 5.3.2 unter Versuchssubjekte beschrieben ist, zählen hierzu die erhobenen Daten der Proband:innen. Diese sind das Geschlecht, das Alter, die Körpergröße, die Sehhilfe und die HUD Erfahrung der Proband:innen. In Tabelle 32 ist die Verteilung des Probandenkollektivs anhand dieser Faktoren zu sehen.

**Tabelle 32: Verteilung der Proband:innen nach den Stufen der Faktoren der Versuchssubjekte**

	Alter [Jahre]				Größe [cm]			Geschlecht	Sehhilfe	HUD Erfahrung				
	18 - 30	31 - 40	41 - 50	51 - 60	≤ 160 - 170	171 - 180	181 - ≥ 190	männlich	weiblich	Ja	nein	selten	häufig	immer
Anzahl	12	10	11	11	8	18	18	34	10	17	27	31	9	4

Im Gegensatz zur Probandenstudie in Kapitel 4 kann aufgrund begrenzter Auswahlmöglichkeiten bei internen Proband:innen kein Verteilerschlüssel Anwendung finden. In Tabelle 33 sind die Mittelwerte für die WS und StS je Faktorstufe zu sehen. Die Mittelwerte je Faktorstufe für die WS bzw. die StS sind sowohl innerhalb eines Faktors, als auch über alle Faktorstufen hinweg nah beieinander. Die größte Differenz sowohl innerhalb eines Faktors als auch über alle Faktoren hinweg, tritt für die StS des Faktors *HUD Erfahrung* mit einer Differenz von 4,7 % auf. Diese Differenz tritt zwischen Proband:innen auf, welche *immer* oder *häufig* ein HUD verwenden. Da Proband:innen die *selten* ein HUD verwenden zwischen den beiden anderen Faktorstufen stehen, ist hier keine klare Tendenz erkennbar. Die große Diskrepanz ist vermutlich auf die geringe Stichprobengröße von ausschließlich vier Proband:innen, welche angeben *immer* ein HUD zu verwenden, zurückzuführen. Ansonsten sind keine weiteren Auffälligkeiten zu beobachten und daher auch keine Einflüsse der Störfaktoren zu erwarten. Die folgende Analyse der Störfaktoren auf statistische Signifikanzen erfolgt analog der Einflussanalyse der Störfaktoren in Abschnitt 4.3.2 unter Verwendung der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA). Weitere Details zur Methodik sind dort aufzufinden.

**Tabelle 33: Mittelwerte der Transparenz des sekundären Bildes in % für die Wahrnehmungs- und Störschwelle für die Stufen je Faktor**

	Alter in Jahren				Körpergröße in cm			Geschlecht	Sehhilfe	HUD Erfahrung				
Schwelle	18 - 30	31 - 40	41 - 50	51 - 60	≤ 170	171 - 180	≥ 180	Weiblich	Männlich	Ja	Nein	Seitens	Häufig	Immer
WS	86,0	87,4	85,8	84,6	86,6	85,6	85,9	86,4	85,8	85,0	86,5	85,9	85,3	87,9
StS	81,1	81,8	80,6	80,4	81,6	80,8	80,9	81,8	80,7	80,5	81,2	81,1	79,1	83,8

Die unterschiedlichen Stufen innerhalb eines Störfaktors stellen jeweils die unabhängigen Gruppen und damit die unabhängigen Variablen dar. Da zwei Antwortvariablen vorliegen, die WS und die StS, müssen diese unabhängig voneinander je Antwortvariable und Faktor

untersucht werden. Folglich wird für alle fünf Störfaktoren je Antwortvariable eine eigene ANOVA durchgeführt. Dies resultiert in insgesamt zehn einfaktoriellen Varianzanalysen. Die Prüfung auf Normalverteilung und jeweilige Darstellung der Datenpunkte einer Faktorstufe in Wahrscheinlichkeitsnetzen sind in LXIX dargestellt. Da teilweise nur wenige Datenpunkte je Faktorstufe vorliegen, ist zu erwarten, dass nicht alle Faktorstufen normalverteilte Daten aufweisen. Trotz der zum Teil nicht normalverteilten Daten einzelner Faktorstufen findet die ANOVA an dieser Stelle Anwendung. Die Argumentation hierfür ist ebenfalls Abschnitt 4.3.2 zu entnehmen. Daher erfolgt an dieser Stelle keine Transformation der Daten zur Verbesserung der Normalverteilung.

Die Nullhypothese der ANOVA  $H0_{ANOVA}$  zur Untersuchung möglicher Einflüsse der Störfaktoren lautet: *Alle Mittelwerte sind gleich*. Das gewählte Alpha-Niveau beträgt  $\alpha = 0,05$  und entspricht einem Konfidenzniveau von 95 %. Die Zuordnung der Antwortvariablen für die WS und die StS je Faktorstufe ist unter Anhang

A.5 Statistische Kennzahlen und Grafiken zur Analyse der Störfaktoren in Abschnitt 5.3.3in Tabelle 66 und Tabelle 67 zu finden. Die Analyse der möglichen Störfaktoren zur Bewertung der WS und StS für ein Doppelbild in einem p-polarisierten HUD System durch die Proband:innen basiert auf ANOVAs für jeden der genannten Störfaktoren. Die daraus resultierenden F- und p-Werte sind in Tabelle 34 zu sehen. Die Analyse der Störfaktoren ist nach Wahrnehmungs- und Störschwelle aufgeteilt. Der p-Wert liegt mit  $p \geq 0,27$  deutlich über dem Grenzwert für statistische Signifikanz von  $p \leq 0,05$ . Folglich weist die Analyse der möglichen Störfaktoren keinerlei signifikanten Störeinflüsse auf.

**Tabelle 34: F- und p-Werte der Störfaktorenanalyse für die Wahrnehmungs- und Störschwelle**

Störfaktor	Wahrnehmungs-/Störschwelle	F-Wert	p-Wert
Geschlecht	Wahrnehmungsschwelle	0.13	0.72
Alter	Wahrnehmungsschwelle	0.56	0.64
Körpergröße	Wahrnehmungsschwelle	0.10	0.90
Sehhilfe	Wahrnehmungsschwelle	1.10	0.30
HUD Erfahrung	Wahrnehmungsschwelle	0.42	0.66
Geschlecht	Störschwelle	0.38	0.54
Alter	Störschwelle	0.15	0.93
Körpergröße	Störschwelle	0.08	0.93
Sehhilfe	Störschwelle	0.22	0.64
HUD Erfahrung	Störschwelle	1.34	0.27

Beispielhaft sind für den Störfaktor *HUD Erfahrung* auf der linken Seite von Tabelle 35 die Mittelwerte, Standardabweichungen und Anzahl der Datenpunkte für die Faktorstufen des Störfaktors aufgelistet. Auf der rechten Seite finden sich die Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor *HUD Erfahrung*. Anhand des p-Wertes  $p = 0,267$  erfolgt die Annahme der Nullhypothese  $H0_{ANOVA}$ . Folglich unterscheiden sich die Mittelwerte der verschiedenen Faktorstufen nicht statistisch signifikant voneinander.

**Tabelle 35: Ergebnisse der ANOVA für die Störschwelle des Störfaktors *HUD Erfahrung***

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
selten	62	81,145	6,935	(79,41; 82,88)	Faktor	2	1,34	0,267
häufig	18	79,11	6,15	(75,90; 82,32)	Fehler	85		
immer	8	83,75	7,67	(78,93; 88,57)	Gesamt	87		

Zusammengefasste StdAbw = 6,85048

In den Abb. 5.27, Abb. 5.28 und Abb. 5.29 sind die 95 % Konfidenzintervalle als standardisiertes Fehlerbalkendiagramm, sowie als simultan ermittelte Konfidenzintervalle nach Tukey bzw. individuell ermittelte Konfidenzintervalle nach Fisher dargestellt. Das Fehlerbalkendiagramm sowie die Vergleichsverfahren nach Tukey und Fisher veranschaulichen das Ergebnis gleicher Mittelwerte der verschiedenen Faktorstufen und bestätigen, dass keine signifikanten Einflüsse durch den Störfaktor gegeben sind.

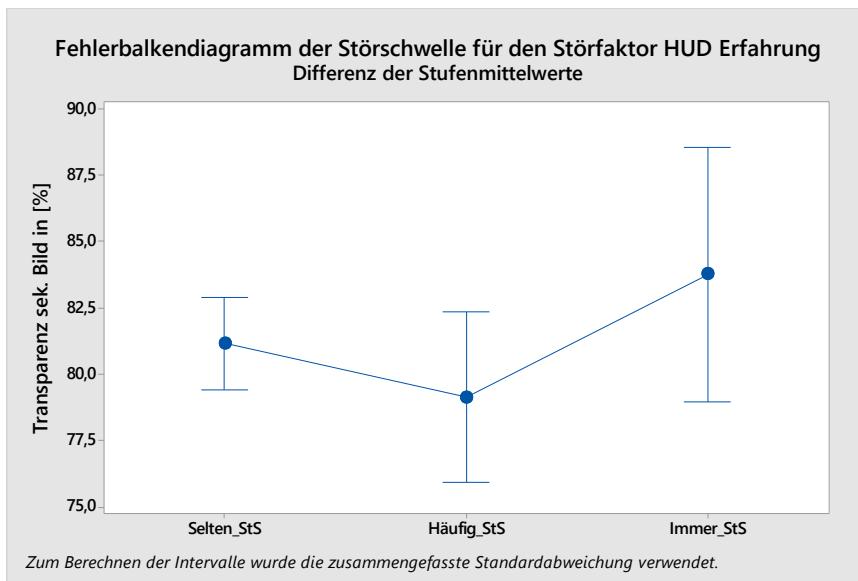


Abb. 5.27: Fehlerbalkendiagramm der Störschwelle für den Störfaktor *HUD Erfahrung*

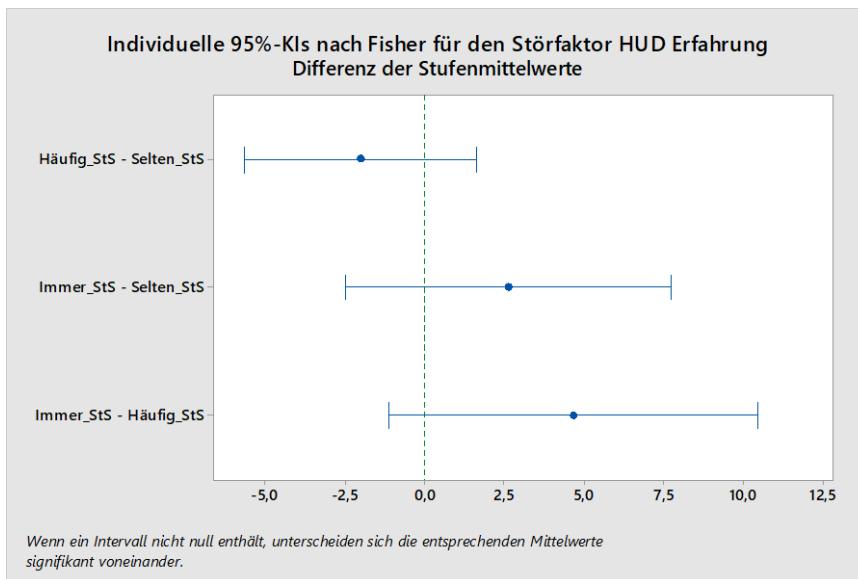
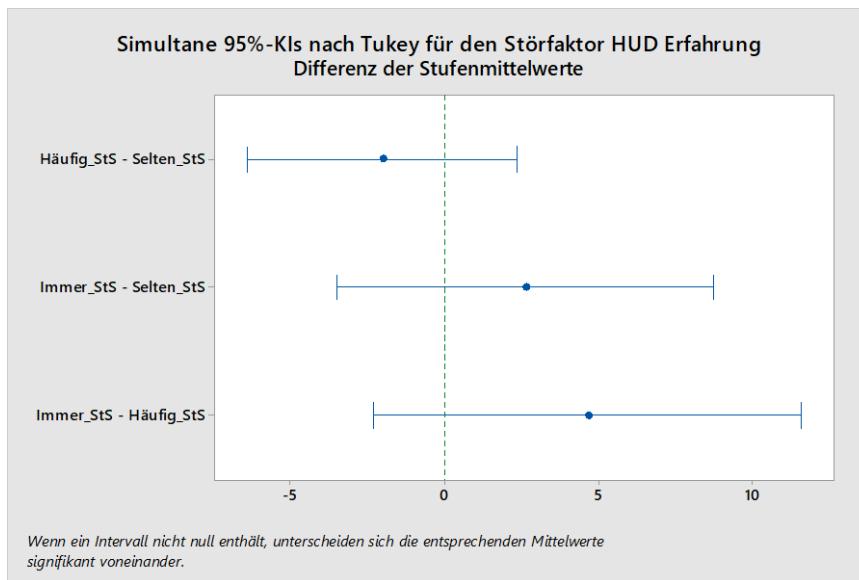


Abb. 5.28: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fisher für die Störschwelle des Störfaktors *HUD Erfahrung*



**Abb. 5.29: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey für die Störschwelle des Störfaktors *HUD Erfahrung***

Da auch für alle anderen Störfaktoren keine statistisch signifikanten Einflüsse bestehen, kann im Folgenden die statistische Analyse der subjektiven Bewertung des Doppelbildfehlers durch die Proband:innen stattfinden.

Schlussendlich gibt die Analyse der Störfaktoren in diesem Abschnitt darüber Aufschluss, dass das Probandenkollektiv keine Einflüsse auf das Studienergebnis hat. Die Eigenschaften der Proband:innen beeinflussen damit nicht deren Bewertung zur Wahrnehmungs- und Störschwelle des Doppelbildfehlers. Dies spricht trotz Rekrutierung ausschließlich interner Proband:innen für ein heterogenes und damit repräsentatives Probandenkollektiv.

### 5.3.3.3. Analyse der subjektiven Bewertung zum Doppelbild

In diesem Abschnitt findet die statistische Analyse der Untersuchungshypothesen *H5*, *H6* und *H7* unter Anwendung einfaktorieller Varianzanalysen statt. Die Durchführung der Varianzanalysen erfolgt analog der statistischen Analysen in Abschnitt 4.3.3.1.

#### ANOVA zu Hypothese H5

Im ersten Schritt wird *Hypothese H5* untersucht:

*Die Wahrnehmungs- und Störschwelle des Doppelbildfehlers in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses sind gleich.*

*Hypothese H5* beschreibt die Annahme, dass die Proband:innen einen Doppelbildfehler zwar wahrnehmen und erkennen können, dieser aber nicht zwingendermaßen störend sein muss. Erst

eine erhöhte Ausprägung des Doppelbildfehlers, im Rahmen dieser Untersuchung eine höhere Leuchtdichte des sekundären Bildes eines p-polarisierten HUD, führt zu einer Störung der Fahrer:in in der Wahrnehmung des virtuellen Bildes. Aus diesem Grund sieht das Studiendesign eine getrennte Bewertung der *Wahrnehmungs- und Störschwelle* vor. Die Auswertung der allgemeinen Ergebnisse unterstützt diese Annahme, da die durchschnittliche WS vor der durchschnittlichen StS eintritt. Dies ist für alle Betrachtungsfälle, in dunkler und heller Umgebung oder der ersten und zweiten Iteration, zutreffend. Folgend ist die einfache ANOVA zur statistischen Analyse von *Hypothese H5* beschrieben.

Das beidseitig gewählte Konfidenzniveau der ANOVA beträgt 95 %. Die unabhängige Variable ist das Testbild mit unterschiedlichen Ausprägungen des Doppelbildfehlers. Die Faktorstufen der unabhängigen Variable sind entsprechend die verschiedenen Transparenzen des sekundären Bildes. Die abhängige Variable ist die Wahrnehmungs- bzw. Störschwelle der Proband:innen. Dabei bewertet jede Proband:in die WS und StS. Zunächst wird die ANOVA für die Gesamtheit der Bewertungen *WS\_Gesamt* und *StS\_Gesamt* durchgeführt. Dabei erfolgt keine Unterscheidung zwischen heller und dunkler Umgebung oder der ersten und zweiten Iteration.

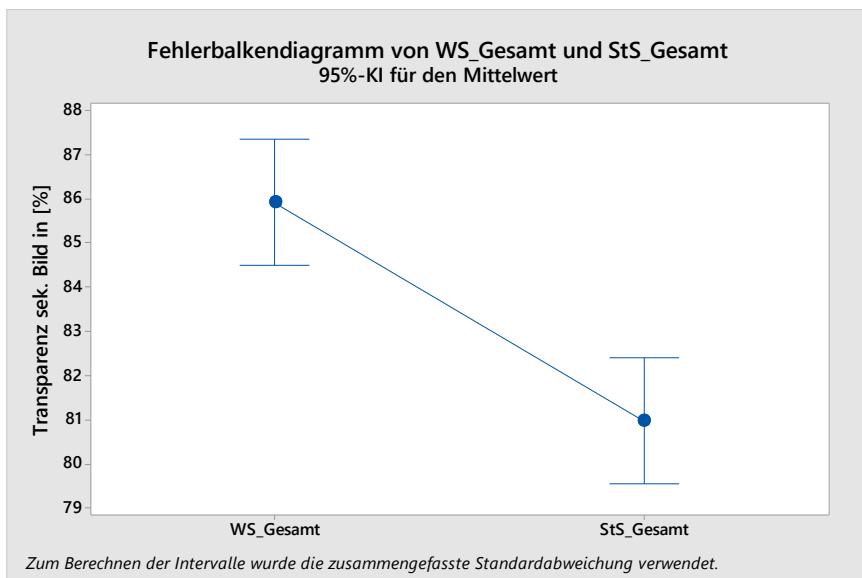
Für diese und die folgenden ANOVA wird die Annahme normalverteilter Daten sowie gleicher Varianzen vorausgesetzt. In Anhang LXXIV sind die Wahrscheinlichkeitsnetze inkl. Ergebnisse des jeweiligen Anderson-Darling-Tests sowie der Test auf gleiche Varianzen dokumentiert. Die Prüfungen berücksichtigen ebenfalls ein Konfidenzniveau von 95 %.

Die Ergebnisse der ANOVA für *Hypothese H5* sind in Tabelle 36 zu sehen. Auf der linken Seite sind die Mittelwerte, Standardabweichungen und Anzahl der Datenpunkte der unabhängigen Variable aufgelistet. Auf der rechten Seite finden sich die Ergebnisse der ANOVA für die Hypothese H5. Anhand des minimalen p-Wertes  $p = 0,000$  lässt sich die Nullhypothese  $H0_{ANOVA}$  für *H5* eindeutig ablehnen. Entsprechend unterscheiden sich die Mittelwerte der zwischen WS\_Gesamt und StS\_Gesamt statistisch signifikant voneinander. Diese Annahme bestätigt auch der empirische F-Wert  $F_{emp} = 23,29$ . Dieser ist deutlich größer als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 3,9$ .

**Tabelle 36: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H5**

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
WS_Gesamt	88	85,920	6,742	(84,488; 87,353)	Faktor	1	23,29	0,000
StS_Gesamt	88	80,966	6,877	(79,533; 82,399)	Fehler	174		
					Gesamt	175		

In Abb. 5.30 ist das 95 % Konfidenzintervall als standardisiertes Fehlerbalkendiagramm dargestellt. Das Fehlerbalkendiagramm veranschaulicht das Ergebnis unterschiedlicher Mittelwerte und bestätigt damit die Feststellung eindeutig statistischer Signifikanz hinsichtlich Unterschieden der Mittelwerte zwischen WS\_Gesamt und StS\_Gesamt.



**Abb. 5.30: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die WS\_Gesamt und StS\_Gesamt der unabhängigen Variable von H5**

In Anhang LXXIV sind zusätzlich die 95 % Konfidenzintervalle als simultan ermitteltes Konfidenzintervall nach Tukey bzw. individuell ermitteltes Konfidenzintervall nach Fisher dargestellt. Die Vergleichsverfahren nach Tukey und Fisher bestätigen die Ablehnung von Hypothese H5. Die statistische Verfahrensweise zur Feststellung signifikanter Mittelwertsunterschiede weißt nach beiden Verfahren einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der WS\_Gesamt und StS\_Gesamt auf. Dieses Ergebnis bestätigt folglich, dass die Proband:innen im Generellen zwischen *Wahrnehmungsschwelle* und *Störschwelle* unterscheiden. Dass für die Untersuchung von Hypothese H5 keine Trennung zwischen heller und dunkler Umgebung oder erster und zweiter Iteration vorliegt, welche die Signifikanz eigentlich vermindern sollte, unterstreicht zusätzlich die Feststellung der statistischen Signifikanz.

## ANOVA zu Hypothese H6

Als nächstes erfolgt die Untersuchung von *Hypothese H6*:

*Die Wahrnehmungs- und Störschwelle des Doppelbildfehlers in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses sind gleich für eine helle und dunkle Umgebungshelligkeit.*

*Hypothese H6* beschreibt die Annahme, dass die Proband:innen in Abhängigkeit der Umgebungshelligkeit unterschiedliche WS und StS besitzen. Diese Annahme beruht auf der Arbeit von Qin et al. (2017) wonach die Proband:innen in einer dunklen Umgebung eine empfindlichere Wahrnehmung des Doppelbildfehlers entwickeln als in einer helleren Umgebung. Aus diesem Grund erfolgte die Aufteilung der Studie in eine helle und eine dunkle Umgebung. Die Auswertung der allgemeinen Ergebnisse unterstützt diese Annahme, da die durchschnittliche WS und StS in dunkler Umgebung früher eintreffen als in heller Umgebung. Folgend ist die einfache ANOVA zur statistischen Analyse von *Hypothese 6* beschrieben.

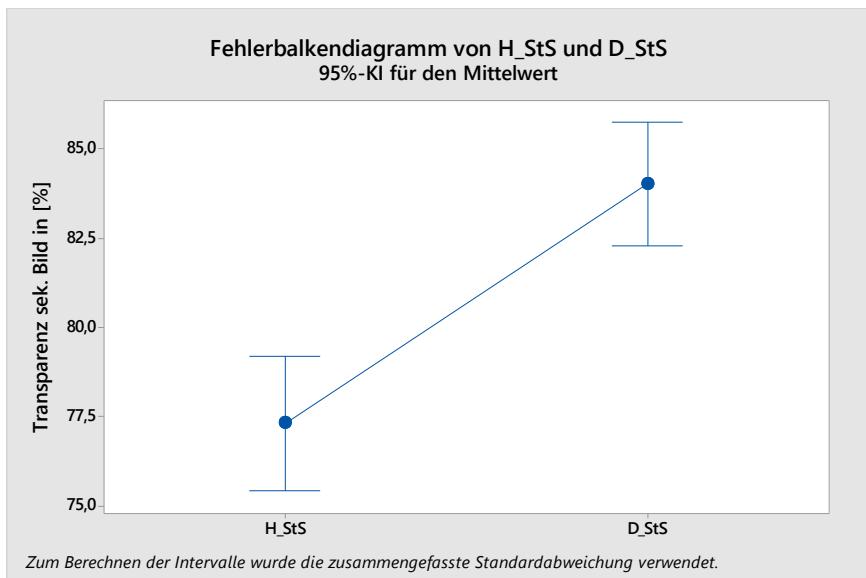
Das beidseitig gewählte Konfidenzniveau der ANOVA beträgt 95 %. Die unabhängige Variable ist das Testbild mit unterschiedlichen Ausprägungen des Doppelbildfehlers. Die Faktorstufen der unabhängigen Variable sind entsprechend die verschiedenen Transparenzen des sekundären Bildes. Beispielhaft wird die ANOVA für *H\_StS* und *D\_StS* durchgeführt. Entsprechend ist die abhängige Variable die Störschwelle der Proband:innen in heller bzw. dunkler Umgebung. Dabei erfolgt keine Unterscheidung zwischen der ersten und zweiten Iteration.

Die Ergebnisse der ANOVA für *Hypothese H6* sind in Tabelle 37 zu sehen. Anhand des minimalen p-Wertes  $p = 0,000$  lässt sich die Nullhypothese  $H0_{ANOVA}$  auch für *H6* eindeutig ablehnen. Entsprechend unterscheiden sich die Mittelwerte der zwischen *H\_StS* und *D\_StS* statistisch signifikant voneinander. Diese Annahme bestätigt auch der empirische F-Wert  $F_{emp} = 27,08$ . Dieser ist deutlich größer als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 3,95$ .

**Tabelle 37: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H6**

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
<i>H_StS</i>	40	77,300	5,867	(75,404; 79,196)	Faktor	1	27,08	0,000
<i>D_StS</i>	48	84,021	6,166	(82,290; 85,752)	Fehler	86		
					Gesamt	87		

In Abb. 5.31 ist das 95 % Konfidenzintervall als standardisiertes Fehlerbalkendiagramm dargestellt. Das Fehlerbalkendiagramm veranschaulicht das Ergebnis unterschiedlicher Mittelwerte und bestätigt damit die Feststellung eindeutig statistischer Signifikanz hinsichtlich Unterschieden der Mittelwerte zwischen *H\_StS* und *D\_StS*.



**Abb. 5.31: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die H\_StS und D\_StS der unabhängigen Variable von H6**

In Anhang LXXIV sind zusätzlich die 95 % Konfidenzintervalle als simultan ermitteltes Konfidenzintervall nach Tukey bzw. individuell ermitteltes Konfidenzintervall nach Fisher dargestellt. Die Vergleichsverfahren nach Tukey und Fisher bestätigen die Ablehnung von Hypothese H6. Die statistische Verfahrensweise zur Feststellung signifikanter Mittelwertsunterschiede weißt nach beiden Verfahren einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der H\_StS und D\_StS auf. Dieses Ergebnis bestätigt folglich, dass die Proband:innen in dunkleren Umgebungen niedrigere *Wahrnehmungsschwellen* und *Störschwellen* aufweisen und entsprechend empfindlicher ggü. auftretenden Doppelbildfehlern sind. Dass für die Untersuchung von Hypothese H6 keine Trennung zwischen erster und zweiter Iteration vorliegt, welche die Signifikanz vermindern sollte, unterstreicht auch in diesem Fall zusätzlich die Feststellung der statistischen Signifikanz. Die festgestellte statistische Signifikanz ist ebenso für die WS vorhanden. Auf diese Weise kann die Annahme höherer Sensibilität ggü. Doppelbildfehlern im virtuellen Bild nach Qin et al. (2017) bestätigt werden.

## ANOVA zu Hypothese H7

Zuletzt findet die Untersuchung von *Hypothese H7* statt:

*Die Wahrnehmungs- und Störschwelle des Doppelbildfehlers in Abhängigkeit des Leuchtdichteverhältnisses sind gleich für die erste und zweite Studieniteration.*

*Hypothese H7* beschreibt die Annahme, dass die Proband:innen in der zweiten Iteration empfindlicher hinsichtlich des Doppelbildfehlers sind und daher eine geringere WS und StS besitzen. Diese Annahme ist darauf zurückzuführen, dass die Proband:innen durch nach der ersten Iteration ggü. einem auftretenden Doppelbildfehler im virtuellen Bild sensibilisiert sind.

Aus diesem Grund sieht das Studiendesign eine zweite Iteration vor. In dieser sehen die Proband:innen zunächst einen starken Doppelbildfehler, welcher schrittweise verringert wird. Auf diese Weise kann eine Validierung der WS und StS der ersten Iteration sowie die gleichzeitige Untersuchung von Hypothese H7 stattfinden. Die Auswertung der allgemeinen Ergebnisse unterstützt diese Annahme, da die durchschnittliche WS und StS in der zweiten Iteration früher eintreffen als in der ersten Iteration. Folgend ist die einfache ANOVA zur statistischen Analyse von *Hypothese 7* beschrieben.

Das beidseitig gewählte Konfidenzniveau der ANOVA beträgt 95 %. Die unabhängige Variable ist das Testbild mit unterschiedlichen Ausprägungen des Doppelbildfehlers. Die Faktorstufen der unabhängigen Variable sind entsprechend die verschiedenen Transparenzen des sekundären Bildes. Beispielhaft wird die ANOVA für  $WS_1$  und  $WS_2$  sowie  $StS_1$  und  $StS_2$  durchgeführt. Entsprechend ist die abhängige Variable die Störschwelle der Proband:innen für die erste bzw. zweite Iteration. Dabei erfolgt keine Unterscheidung zwischen heller und dunkler Umgebung. In diesem Fall erfolgt die Untersuchung von WS und StS, da diese unterschiedliche Ergebnisse liefern. Eine zusätzliche Aufteilung in jeweils helle und dunkle Umgebung ist nicht nötig, da diese den Ergebnissen beider Umgebungshelligkeiten entsprechen.

Die Ergebnisse der ANOVA für *Hypothese H7* bzgl. der WS sind in Tabelle 38 zu sehen. Anhand des minimalen p-Wertes  $p = 0,000$  lässt sich die Nullhypothese  $H0_{ANOVA}$  für *H7* bzgl. der WS eindeutig ablehnen. Entsprechend unterscheiden sich die Mittelwerte der zwischen  $WS\_1$  und  $WS\_2$  statistisch signifikant voneinander. Diese Annahme bestätigt auch der empirische F-Wert  $F_{emp} = 22,58$ . Dieser ist deutlich größer als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 3,95$ .

**Tabelle 38: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H7 anhand WS\_1 und WS\_2**

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
WS_1	44	82,86	7,22	(81,06; 84,67)	Faktor	1	27,58	0,000
WS_2	44	88,977	4,552	(87,169; 90,786)	Fehler	86		
					Gesamt	87		

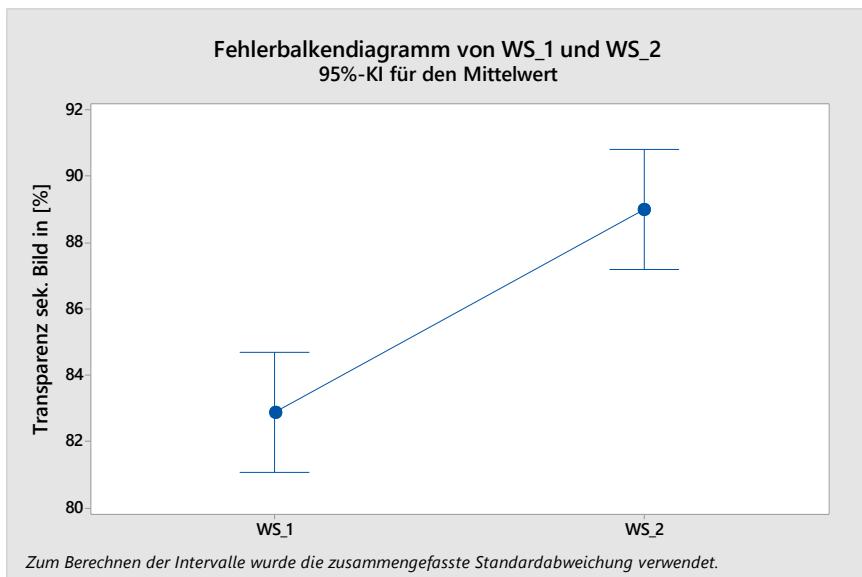
Die Ergebnisse der ANOVA für *Hypothese H7* bzgl. der StS sind in Tabelle 39 zu sehen. Im Gegensatz zur vorigen Bewertung der WS, ist anhand des p-Wertes  $p = 0,126$  keine Ablehnung der Nullhypothese  $H0_{ANOVA}$  für *H7* bzgl. der StS möglich. Entsprechend unterscheiden sich die Mittelwerte der zwischen  $StS\_1$  und  $StS\_2$  nicht statistisch signifikant

voneinander. Diese Annahme bestätigt auch der empirische F-Wert  $F_{emp} = 2,39$ . Dieser ist kleiner als der *kritische F-Wert*  $F_{krit} = 3,95$ .

**Tabelle 39: Ergebnisse der ANOVA für Hypothese H7 anhand StS\_1 und StS\_2**

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
StS_1	44	79,84	7,17	(77,80; 81,89)	Faktor	1	2,39	0,126
StS_2	44	82,091	6,462	(80,046; 84,136)	Fehler	86		
					Gesamt	87		

In Abb. 5.32 und Abb. 5.33 sind jeweils die 95 % Konfidenzintervalle als standardisierte Fehlerbalkendiagramme dargestellt. Die Fehlerbalkendiagramme veranschaulichen das Ergebnis unterschiedlicher Mittelwerte zwischen WS\_1 und WS\_2 sowie gleicher Mittelwerte zwischen StS\_1 und StS\_2. Daraus lässt sich schließen, dass die Proband:innen in der zweiten Iteration ausschließlich für die WS statistisch signifikant sensibler ggü. dem Doppelbildfehler in Abhängigkeit der Leuchtdichte  $L_S$  sind. Für die StS lässt sich zwar eine Tendenz erkennen, aber keine statistische Signifikanz feststellen. Daraus lässt sich schließen, dass die Proband:innen in der zweiten Iteration ausschließlich für die WS statistisch signifikant sensibler ggü. dem Doppelbildfehler in Abhängigkeit der Leuchtdichte des sekundären Bildes  $L_S$  sind. Für die StS lässt sich zwar eine Tendenz erkennen, aber keine statistische Signifikanz feststellen.



**Abb. 5.32: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die WS\_1 und WS\_2 der unabhängigen Variable von H7**

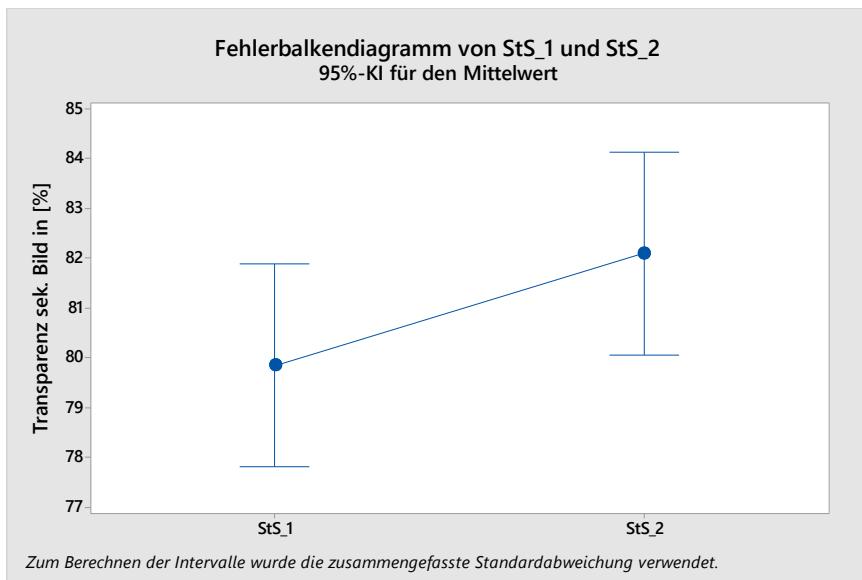


Abb. 5.33: Fehlerbalkendiagramm des Mittelwerts für die StS\_1 und StS\_2 der unabhängigen Variable von H7

Das bedeutet, dass die Proband:innen nach erstmaligem Erkennen eines Doppelbildes dieses auch bei geringeren Leuchtdichten des sekundären Bildes wahrnehmen und entsprechend die WS sinkt. Gleichzeitig verändert sich die StS nach erstmaligem Erkennen eines Doppelbildes nicht statistisch signifikant in der zweiten Iteration. Die StS scheint entsprechend unabhängig davon zu sein, ob eine Proband:in bereits Doppelbildfehler im virtuellen Bild erkennen konnte oder diesen noch nicht wahrgenommen hat.

In Anhang LXXIV sind zusätzlich die 95 % Konfidenzintervalle als simultan ermitteltes Konfidenzintervall nach Tukey bzw. individuell ermitteltes Konfidenzintervall nach Fisher dargestellt. Die Vergleichsverfahren nach Tukey und Fisher bestätigen die Ablehnung von Hypothese H7 bzgl. der WS bzw. die Annahme von Hypothese H7 bzgl. der StS. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Proband:innen in der zweiten Iteration niedrigere *Wahrnehmungsschwellen* aufweisen als in der ersten Iteration. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse ebenfalls, dass dieser Fall für die *Störschwelle* nicht zutreffend ist.

Abschließend erfolgt eine kurze Zusammenfassung und Einordnung der durchgeföhrten statistischen Untersuchungen zu den Hypothesen H5, H6 und H7 dieses Abschnittes 5.3.3.3.

Die eindeutige statistisch signifikante Ablehnung von Hypothese H5 bestätigt die Annahme, dass für die Proband:innen ganz klar ein Unterschied zwischen der *Wahrnehmungs-* und *Störschwelle* für den Doppelbildfehler vorliegt. Das Ergebnis zeigt, dass Kund:innen Abbildungsfehler im virtuellen Bild eines HUD zwar wahrnehmen, diese aber nicht zwingend störend für Sie sind. Erst die Überschreitung der Störschwelle durch eine bestimmte Ausprägung des Abbildungsfehlers führt zur Nicht-Erfüllung der Kundenerwartungen. Damit

wird zudem die Notwendigkeit eines Grenzwertes deutlich, da alle Proband:innen den Doppelbildfehler ab einer gewissen Ausprägung als störend empfinden.

Für Hypothese H6 kann ebenfalls eine eindeutig statistisch signifikante Ablehnung erfolgen. Entsprechend den Erwartungen sind die Proband:innen in einer *dunklen Umgebung* sensibler ggü. dem Doppelbildfehler als in *heller Umgebung*. Dies zeigt sich dadurch, dass sich die Wahrnehmungs- und Störschwelle in dunkler Umgebung bereits bei geringerer Ausprägung der Helligkeit des sekundären Bildes einstellen. Dieses statistisch signifikante Ergebnis bestätigt damit die Arbeit von Qin et al. (2017), wonach das Empfinden des Doppelbildfehlers von der Umgebungshelligkeit abhängig ist. Damit sollte für die Festlegung des Grenzwertes zum Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild eines p-polarisierten HUD in jedem Fall die WS und SS in dunkler Umgebung herangezogen werden.

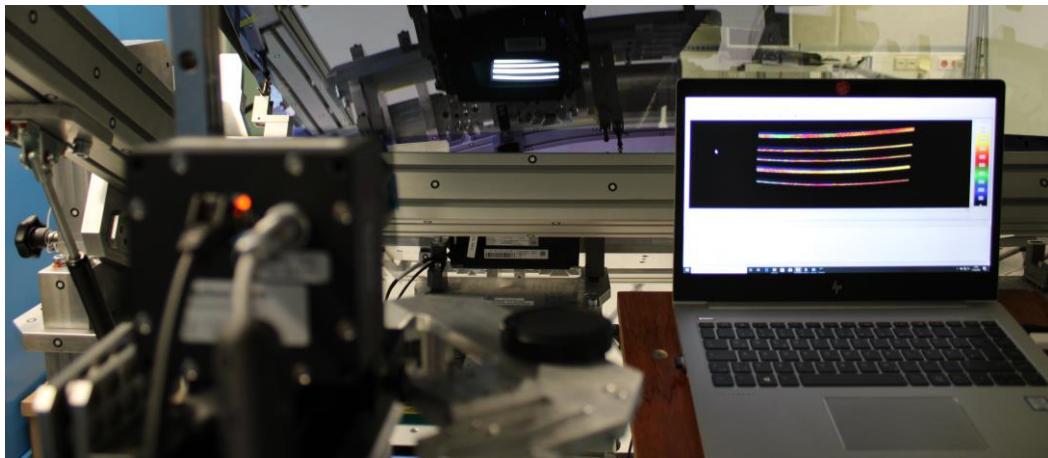
Für Hypothese H7 zeigen sich unterschiedliche Ergebnisse für die WS und StS. Während für Hypothese H7 bei der WS die eindeutig statistisch signifikante Ablehnung erfolgt, ist dies für die StS nicht der Fall. Für die StS ist an dieser Stelle nur eine Tendenz zu erkennen. Daraus lassen sich zwei Feststellungen ableiten. Zum einen zeigt sich bzgl. der WS, dass die Proband:innen in der zweiten Iteration den Doppelbildfehler auch bei geringeren Ausprägung wahrnehmen können. Sieht ein Kunde also einmalig den Doppelbildfehler, kann er diesen auch bei geringer Ausprägung weiterhin wahrnehmen. Zum anderen zeigt sich bzgl. der StS, dass die Proband:innen auch nach Erkennen eines Doppelbildfehlers keine statistisch signifikante Änderung für die StS empfinden. Dies zeigt, dass die StS unabhängig davon ist, ob Kund:innen im Wissen darüber sind, dass ein Doppelbildfehler auftreten kann.

Die eindeutigen statistischen Ergebnisse der Analyse für die Probandenstudie zeigen, dass die Studie ein generell robustes Design sowie sinnhaften Aufbau, Ablauf und Untersuchungsgegenstand darstellt. Außerdem sind die Erkenntnisse essentiell für die richtige Definition des Grenzwertes des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primärem und sekundären Bild eines p-polarisierten HUD. Damit bildet die Probandenstudie die Basis der Umsetzung eines p-polarisierten HUD Systems, da es das zureichende Ziel hinsichtlich der zulässigen Ausprägung des Doppelbildfehlers klar definiert.

### 5.3.4. Minimal zulässiges Leuchtdichteverhältnis $\frac{L_P}{L_S}$

Im letzten Schritt erfolgt die finale Bestimmung des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$ . Dieses bestimmt das Leuchtdichteverhältnis zwischen primärem und sekundärem Bild eines p-polarisierten HUD, welches erreicht werden muss, um die in Abschnitt 5.3.3.1 ermittelte Störschwelle zu erreichen. Die Bestimmung des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  findet mit Hilfe von Leuchtdichtemessungen eines Testbildes statt. Wie in Abschnitt 5.3.3.1 ermittelt, beträgt hierfür die Transparenz des sekundären Bildes 89 %. Diese Messung ist nötig, da die manipulierten Testbilder mit unterschiedlichen Transparenzen des sekundären Bildes digital erstellt wurden und daher keiner messbaren Qualitätskennzahl entsprechen.

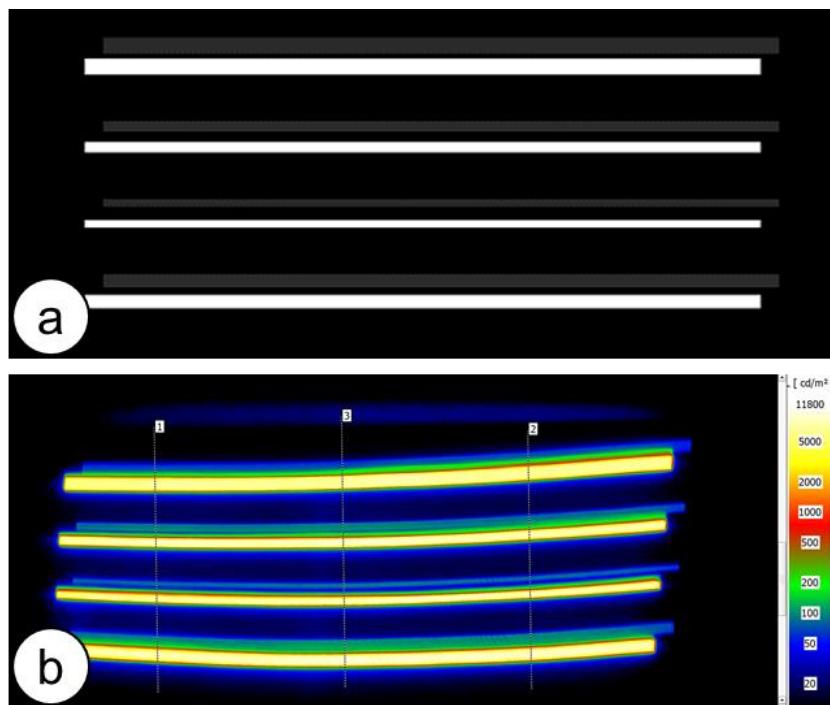
Die Durchführung der Leuchtdichtemessungen erfolgt am HUD Prüfstand (siehe Abschnitt 2.3.3). Anstatt einer monochromen Kamera, findet eine Leuchtdichtekamera Verwendung. Im vorliegenden Fall ist dies eine kalibrierte LMK6-12 des Herstellers Techno Team® mit einer Auflösung von  $4112 \times 3008$  Pixel. Der Betrieb des Messgeräts und die Auswertung der aufgenommenen Testbilder findet anhand der Software LMK Labsoft Simple® statt. Die Leuchtdichtekamera misst die Helligkeiten des kompletten virtuellen Bildes und gibt diese in  $cd/m^2$  an. Der grundsätzliche Messaufbau zur Ermittlung des minimal zulässigen Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  anhand der Leuchtdichten für primäres und sekundäres Bild am HUD Prüfstand ist in Abb. 5.34 zu sehen.



**Abb. 5.34:** Messaufbau zur Bestimmung der Leuchtdichten für primäres und sekundäres Bild am HUD Prüfstand

Analog zur Probandenstudie findet auch für diesen Messvorgang ein s-polarisiertes HUD System der Baureihe C257 (Mercedes-Benz CLS Klasse) Verwendung. Hierfür werden der HUD Projektor und die WSS in CAD-0-Position auf dem Prüfstand montiert. Die

Leuchtdichtheitkamera befindet sich in der Mitte der Head-Motion-Box. Die verwendete WSS enthält entsprechend eine keilwinklige PVB Folie. Bei der Auswahl der WSS wird darauf geachtet, dass diese in der gewählten Messposition keinen sichtbaren Doppelbildfehler aufweist. Grund hierfür ist, dass ausschließlich der Doppelbildfehler eines p-polarisierten HUD untersucht werden soll. Für die Messung findet ein manipuliertes Testbild Verwendung, welches sich von den Testbildern der Probandenstudie unterscheidet. Das manipulierte Testbild weist, analog zu den in der Probandenstudie verwendeten Testbildern, einen künstlich erzeugten Doppelbildfehler auf. Allerdings enthält das Bild keine tatsächlichen UI Anzeigeninhalte, sondern nur einfache weiße Linien mit verschiedenen Breiten, da hierdurch eine vereinfachte Auswertung der festgestellten Leuchtdichten für primäres und sekundäres Bild möglich ist. Um Messungenauigkeiten durch Streulicht zu vermeiden, wird eine schwarze, blickdichte Decke auf die WSS gelegt und zusätzlich das Licht stark gedimmt. Das verwendete Testbild weist für das sekundäre Bild eine Transparenz von 89 % auf und entspricht damit der ermittelten Störschwelle. In Abb. 5.35 (a) ist das manipulierte Testbild als Input, sowie in Abb. 5.35 (b) das gemessene Testbild der Leuchtdichtheitkamera zu sehen.



**Abb. 5.35:** Manipuliertes Testbild mit einer Transparenz von 89 % für das sekundäre Bild. (a) Digitales Testbild und (b) gemessenes Testbild mit Leuchtdichtheitkamera

Im rechten Bereich von Abb. 5.35 (b) ist die algorithmische Farbskala für die Leuchtdichte [ $cd/m^2$ ] dargestellt. Die leicht bananenförmige Verzerrung des Testbildes in Abb. 5.35 (b) ist auf ein fehlendes Warping zurückzuführen. Für die Messaufgabe ist diese Verzerrung nicht weiter relevant. Obwohl für die gewählte WSS der Messaufgabe subjektiv kein Doppelbild

erkenntlich ist, zeichnet sich neben dem durch das Testbild künstlich hinzugefügten sekundären Bild auch ein tatsächliches leichtes sekundäres Bild ab. Dieses entsteht durch die Reflektion der s-polarisierten Lichtstrahlen an der Außenseite der WSS. In Abb. 5.35 (b) ist das helle Primärbild durch seine *weiße* bis *gelbe* und in Teilen *rote* Darstellung erkennbar. Das tatsächliche Sekundärbild ist anhand der hellen *grünen* Bereiche direkt über dem Primärbild zu erkennen. Das gesuchte künstlich erzeugte Sekundärbild liegt etwas darüber und ist *blau* dargestellt. Eine klare Trennung zwischen Primär- und Sekundärbild ist nur für die beiden schmäleren Linien in der Mitte zu erkennen. Trotz des teilweise fließenden Übergangs zwischen Primär- und Sekundärbild wird davon abgesehen neue Testbilder zu gestalten, bei welchen der Abstand zwischen Primärbild und künstlich erzeugtem Sekundärbild größer ist um die Überlagerung zu vermeiden. Grund hierfür ist, dass das Testbild bestmöglich das virtuelle Bild eines p-polarisierten HUD Systems wiedergeben soll. Da die Bestimmung der Leuchtdichten für primäres und sekundäres Bild anhand der Farbskala in Abb. 5.35 (b) nur ungenau möglich ist, wird die Kurvendarstellung der Leuchtdichte der Software LMK Labsoft Simple® genutzt.

In Abb. 5.36 sind drei Leuchtdichtekurven zu sehen. Der Messverlauf der Kurven durch das Testbild ist anhand der drei senkrechten Linien in Abb. 5.35 (b) erkennbar. Die linke *Linie 1* ist in Abb. 5.36 durch die rote Leuchtdichtekurve dargestellt. Die rechte *Linie 2* ist durch die grüne Leuchtdichtekurve dargestellt. Die mittlere *Linie 3* ist zuletzt durch die blaue Leuchtdichtekurve dargestellt. Über die Analyse der lokalen Maxima lassen sich die Leuchtdichten des primären und sekundären Bildes darstellen. Für alle drei Leuchtdichtekurven beträgt schlussendlich das minimal zulässige Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primären und sekundären Bild für p-polarisiertes HUD **90**. Um in einem p-polarisierten HUD System ein virtuelles Bild zu erzeugen, welches für mindestens 75 % der Kund:innen zufriedenstellend ist, muss das Primärbild eine 90-fach höhere Leuchtdichte besitzen als das Sekundärbild.

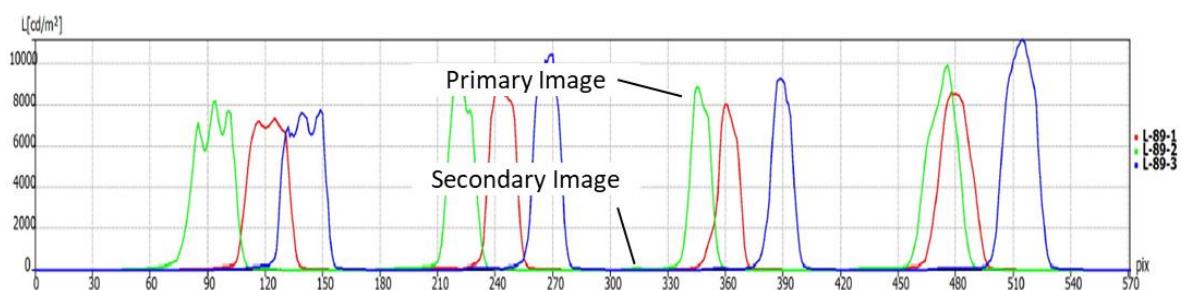


Abb. 5.36: Leuchtdichtekurven des gemessenen Testbilds mit einer Transparenz des sekundären Bildes von 89 %

## 5.4. Diskussion und Zusammenfassung

In Kapitel 5 *Proof of Concept: P-polarisiertes H* ist die genaue Untersuchung zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD Systems beschrieben, welche es ermöglichen soll das virtuelle Bild auch bei Verwendung einer polarisierenden Sonnenbrille zu sehen. Hintergrund der Untersuchung ist, dass das HUD eine zunehmend wichtige Rolle als visuelle Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Fahrer:in einnimmt und zur Erhöhung der Fahrsicherheit beiträgt. Daher ist es wichtig der Fahrer:in das virtuelle Bild in möglichst allen Fahrsituationen zugänglich zu machen. Kapitel 5 orientiert sich dabei an den folgenden drei Forschungsfragen:

- (E) *Wie könnte eine kostenneutrale Realisierung eines HUD Systems aussehen, welche die Sichtbarkeit des virtuellen Bildes mit polarisierender Sonnenbrille ermöglicht?*
- (F) *Welche potentiellen Abbildungsfehler und Industrialisierungsschwierigkeiten könnten bei der Realisierung eines HUD Systems auftreten, das mit polarisierender Sonnenbrille sichtbar ist?*
- (G) *Wie könnten Ansätze zur Quantifizierung sowie Lösung potentieller Abbildungsfehler und weiterer Schwierigkeiten aussehen?*

Zunächst erfolgt die Erläuterung des grundsätzlichen technischen Konzeptes eines p-polarisierten HUD sowie verschiedener Umsetzungsmöglichkeiten und beantwortet damit Forschungsfrage (E). Die in dieser Arbeit beschriebenen Umsetzungsmöglichkeiten bedingen technische Modifikationen der WSS und des HUD Projektors. Für die WSS bedeutet dies die Integration einer reflektierenden Schicht für p-polarisiertes Licht oder eines Retarders. Außerdem muss die Polarisationsrichtung des emittierten Lichts des HUD Projektors um 90° gedreht werden, nämlich von s- auf p-polarisiertes Licht. Bereits zu Beginn der Untersuchung wird dabei die Prämisse aufgestellt, die Umsetzung eines p-polarisierten HUD möglichst kostenneutral umzusetzen. Aus diesem Grund ist von einem Einsatz der keilwinkligen PVB-Folie in der WSS abzusehen (siehe Abschnitt 5.1).

Die weiteren Untersuchungen zur Umsetzung eines p-polarisierten HUD zeigen, dass beim Entfall der keilwinkligen PVB-Folie in der WSS mit Sicherheit vom Auftreten eines Doppelbildfehlers im virtuellen Bild auszugehen ist. Die Gründe hierfür sind vor allem die Lichtemission nicht linear p-polarisierter Anteile aus dem HUD Projektor und die Abweichung vom Brewster-Winkel für die einfallenden Lichtstrahlen an der WSS. Diese Erkenntnisse geben Antworten auf Forschungsfrage (F). Anschließend sind mögliche Ansätze zur Reduktion

auftrtender Doppelbildfehler im virtuellen Bild eines p-polarisierten HUD beschrieben. Sie stellen bereits Antworten für Forschungsfrage (G) dar. Diese betreffen vor allem die Optimierung der Emission linear p-polarisierten Lichts durch eine verbesserte Anordnung der PGU und Spiegel, den Einsatz eines Retarders sowie den Einsatz eines Polarisationsfilters im Projektor (siehe Abschnitt 5.2).

Um letztendlich entscheiden zu können, ob die virtuelle Bildqualität eines p-polarisierten HUD hinsichtlich des Doppelbildfehlers die Kundenerwartungen erfüllen kann, muss eine Ermittlung der Störschwelle stattfinden. Nur wenn diese bekannt ist, kann die Überprüfung erfolgen, ob mit Hilfe der untersuchten Maßnahmen eine zufriedenstellende Lösung für die Kund:innen und gleichzeitig eine kosteneffiziente Umsetzung des p-polarisierten HUD Systems möglich ist. Aus diesem Grund erfolgt im letzten Schritt die Ermittlung der Störschwelle des Doppelbildfehlers hinsichtlich des Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  zwischen primären und sekundärem Bild. Dieser Bereich der Untersuchung liefert ebenfalls Antworten zu Forschungsfrage (G). Das minimal zulässige Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  beträgt letztendlich einen Wert von **90**. Dieser Wert muss erreicht werden, um die Kundenerwartungen zu erfüllen und ein einwandfreies Erkennen der virtuellen Bildinhalte sicherstellen zu können. Zusätzlich zeigen die statistischen Auswertungen der Probandenstudie, dass sich:

- die *Wahrnehmungs- und Störschwelle* statistisch signifikant voneinander unterscheiden,
- die Wahrnehmungs- und Störschwellen in Abhängigkeit *einer hellen und dunklen Umgebung* statistisch signifikant voneinander unterscheiden und
- die Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit *der ersten und zweiten Iteration* statistisch signifikant voneinander unterscheiden, allerdings
- die Störschwellen in Abhängigkeit *der ersten und zweiten Iteration* nicht statistisch signifikant voneinander unterscheiden.

Damit stellt dieses Kapitel eine vollumfängliche Grundsatzuntersuchung eines p-polarisierten HUD Systems dar und zeigt dabei die Prämissen und gleichzeitig noch zu lösenden Herausforderungen auf.

Für die tatsächliche Umsetzung eines p-polarisierten HUD Systems, welches die Kundenerwartungen gesamtheitlich erfüllt, sind zukünftig noch weitere Untersuchungen nötig. Grundsätzlich ist zu überprüfen, welche Maßnahmen nötig sind um das minimal zulässige

Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zu erreichen. Auf Seiten des HUD Projektors ist eine Optimierung der linear p-polarisierten Lichtemission zwingend nötig. Dafür sind insbesondere Untersuchungen bzgl. einzusetzender Polarisationsfilter, Retarder sowie die Anordnung der PGU und Spiegel notwendig. Hinsichtlich des Polarisationsfilter sind vor allem dessen Effizienz sowie Beständigkeit zu überprüfen. Für den möglichen Einsatz eines Retarders, muss die Effizienz über das Spektrum des sichtbaren Lichts weiter geprüft werden, da Retarder in der Regel nur für einen bestimmten Wellenlängenbereich ausgelegt sind. Gleches ist auch für den Einsatz eines Retarders in der WSS gültig.

Bzgl. der Anordnung von PGU und Spiegel zur Reduktion nicht linear p-polarisierter Lichtemission müssen ebenfalls Analysen stattfinden. Zum einen gilt es zu überprüfen, welche Verbesserung durch die Neuanordnung von PGU und Spiegel hinsichtlich der Reduktion nicht linear p-polarisierter Lichtemission des Projektors möglich ist. Zum anderen müssen auch die Auswirkungen der Neuanordnung hinsichtlich zu erreichender Bildqualität und weiterer optischer Bildparameter, bspw. FOV und HMB, analysiert werden.

Auf Seiten der WSS ist neben einer Optimierung ihrer Einbaulage, welche allerdings von der Gesamtfahrzeugarchitektur abhängt, vor allem die Erhöhung der Reflektivität für p-polarisiertes Licht ein möglicher Stellhebel. Auf diese Weise kann die Helligkeit des primären Bildes im Vergleich zum sekundären Bild verbessert und damit das Leuchtdichteverhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  erhöht werden. Allerdings korreliert die Erhöhung der Reflektivität für p-polarisiertes Licht an der WSS negativ mit der Lichttransmission  $T_V$  im sichtbaren Bereich. Diese muss für die WSS mindestens 70 % betragen. Zudem führt eine höhere Reflektivität p-polarisierten Lichts auch zur Erhöhung der Reflexionen des Fahrzeuginnenraums an der WSS, welche die Fahrer:in bei der Sicht durch die WSS stören könnten. Dies betrifft bspw. die Oberfläche der Instrumententafel, Luftpumpen und verchromte Zierteile, Lichtleiter für Ambientebeleuchtung oder Displays. Folglich ist die Erhöhung der Reflektivität p-polarisierten Lichts an der WSS nur begrenzt umsetzbar. Des Weiteren ist trotz Einsatz der möglichen optisch aktiven Schichten, welche in den Windschutzscheibenverbund integriert werden, die Bewitterungs- und Altersbeständigkeit der WSS sicherzustellen. Außerdem dürfen keine unerwünschten optischen Effekte auftreten, welche die Fahrer:in beim Steuern des Fahrzeugs stören könnten.

Zuletzt müssen sowohl für den HUD Projektor als auch die WSS Messmethoden zur Endprüfung der Komponenten bei den Lieferanten entwickelt werden, welche das Auftreten störender Doppelbildfehler erkennen. Für den HUD Projektor bedeutet dies primär, dass die

Lichtemission nicht linear p-polarisierter Anteile einen bestimmten Schwellenwert nicht überschreiten darf. Für die WSS muss eine Messung zur Feststellung des spezifischen Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  Anwendung finden, unter der Berücksichtigung eines Worst-Case HUD Projektors, welcher die maximal zulässige Lichtemission nicht linear p-polarisierter Lichtanteile aufweist.

Um schlussendlich zu klären, ob die kostenneutrale Umsetzung eines p-polarisierten HUD bei gleichzeitiger Erreichung der Kundenerwartungen hinsichtlich des Doppelbildfehlers möglich ist, müssen Preisindikationen bei Lieferanten für HUD Projektoren und WSS eingeholt werden.

Die Probandenstudie legt gemeinsam mit den Untersuchungen den Grundstein für die weitere Entwicklung eines p-polarisierten HUD Systems. Zukünftige Studien zur Analyse des Doppelbildfehlers könnten zudem unterschiedliche Anzeigeninhalte und Designs berücksichtigen. Des Weiteren könnte auch eine Anpassung des Studiendesigns sinnvoll sein. Wie bereits angedeutet, führt die statische Begutachtung des virtuellen Bildes durch die Proband:innen möglicherweise zu einer erhöhten Sensibilität ggü. auftretenden Abbildungsfehlern. Grund hierfür ist, dass sich die Proband:innen ausschließlich auf das virtuelle Bild fokussieren und sich weder der Hintergrund noch das virtuelle Bild verändern. Es ist davon auszugehen, dass hierbei bereits kleine Änderungen sichtbar und Abbildungsfehler entsprechend früher erkannt sowie als störend empfunden werden. Entsprechend könnten erneute Untersuchungen in tatsächlichen Fahrsituationen zu anderen Wahrnehmungs- und Störschwellen führen, da Abbildungsfehler in dynamischen Umgebungen mit sich verändernden Hintergründen weniger stark wahrgenommen werden. Vor diesem Hintergrund ist das gewählte Akzeptanzlevel für 75 % der Proband:innen hinsichtlich ihrer Störschwelle in dunkler Umgebung dennoch ein repräsentativer Wert, welcher die Worst-Case Bewertung der Studie berücksichtigt.

Die Probandenstudie zeigt, dass Kund:innen sensibel ggü. dem Doppelbildfehler in einem p-polarisierten HUD sind. Wie erwartet ist die Wahrnehmungsschwelle geringer als die Störschwelle, allerdings liegen diese nahe beieinander. Dieses Ergebnis zeigt, dass ein Doppelbild bereits nach erstmaligem Erkennen zu einer störenden Wahrnehmung durch die Fahrer:in führen kann. Der störende Doppelbildfehler kann zur Verfehlung der Kundenerwartungen an die virtuelle Bildqualität führen. Darüber hinaus erschwert der Doppelbildfehler die Wahrnehmung des virtuellen Bildes, erhöht die kognitive Belastung der Fahrer:in und resultiert möglicherweise in der Fehlinterpretation der HUD Anzeigeninhalte.

Aus diesem Grund ist es essentiell den Doppelbildfehler im virtuellen Bild eines HUD zu vermeiden.

Die Erkenntnisse der Untersuchungen eines p-polarisierten HUD stellen einen ersten Schritt in Richtung dessen möglichst kostenneutraler Realisierung dar. Grundlegend hierfür sind die Untersuchungen zum grundsätzlichen Auftreten des Doppelbilds und mögliche Lösungsansätze, sowie die schlussendliche Einführung und Ermittlung des minimal zulässigen Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  mit einem Zielwert von **90**. Zudem können die Erkenntnisse hinsichtlich der Sensibilität ggü. Leuchtdichteverhältnissen in virtuellen Bildern von AR/VR Systemen auf weitere Gebiete der HMI übertragen werden.

## 6. Ausblick

Mit dem AR HUD der Mercedes-Benz S-Klasse kam im Jahr 2020 die erste Generation eines tatsächlich kontaktanalogen HUD im automobilen Bereich auf den Markt. Inzwischen bieten verschiedene OEM, darunter VW, Audi oder Hyundai, ebenfalls als AR HUD betitelte Systeme an. Dies bestätigt den zu Beginn der Dissertation beschriebenen Trend hin zu immer größeren HUD sowie dessen steigender Bedeutung. Analog der Weiterentwicklung von Displays im Innenraum des Fahrzeugs aufgrund steigender Kundenanforderungen, ist auch von steigenden Kundenanforderungen hinsichtlich des HUD, sowie von einer entsprechenden Weiterentwicklung des HUD Systems auszugehen. Das heißt, dass sowohl die virtuelle Bildqualität, als auch das UI des HUD zukünftig weiterzuentwickeln sind.

Die Abbildungsfehler eines konventionellen HUD Systems, welche auf die WSS zurückzuführen sind, wurden in dieser Arbeit ausführlich beschrieben und untersucht. Damit leistet die vorliegende Dissertation einen großen Beitrag zum Verständnis der subjektiven Wahrnehmung von Abbildungsfehlern eines AR HUD.

Bezogen auf die virtuelle Bildqualität eines AR HUD, welche im Rahmen der Probandenstudie und anschließender Ergebnisanalysen in Kapitel 4 behandelt wurde, bedeutet dies, dass das Verständnis zur subjektiven Qualitätswahrnehmung des virtuellen Bildes weiterhin vertieft werden muss. Dieses Verständnis ist die Voraussetzung für die Weiterentwicklung der IQN, um die subjektive Wahrnehmung der Kund:innen bestmöglich messbar darzustellen. Die Verbesserung der virtuellen Bildqualität ist nur anhand repräsentativer Qualitätskennzahlen möglich. Die in den Analysen festgestellten Zusammenhänge zwischen bestehenden IQN und subjektiver Wahrnehmung der Proband:innen, welche auf die Annahme von Hypothese H2 deuten (siehe Abschnitt 4.3.4), verlangen zwingend eine Verifizierung in weiteren Untersuchungen.

Auf Basis aktueller Qualitätskennzahlen ist es nicht immer möglich eine schnelle Beurteilung der WSS hinsichtlich ihrer virtuellen Bildqualität durchzuführen. Ein Grund hierfür ist die teilweise sehr individuelle subjektive Qualitätswahrnehmung sowie die Vielzahl an IQN zur Bewertung einer einzigen WSS. Daher ist die aktuelle Aussagekraft der Qualitätskennzahlen nur in Teilen zufriedenstellend. Folglich ist es zukünftig nötig neue Qualitätskennzahlen einzuführen, welche eine schnelle Beurteilung der WSS hinsichtlich ihrer virtuellen

Bildqualität erlauben. Eine potentielle Lösung könnte die *Summe prozentualer Abweichungen* (siehe Abschnitt 4.3.4) darstellen. Dieser Ansatz ist in weiteren Untersuchungen zu verifizieren bzw. sind weitere Ansätze zur schnellen und aussagefähigen Qualitätsbeurteilung der WSS zu entwickeln. Vor allem der Ansatz zur geteilten Bewertung statischer, dynamischer und stereoskopischer Abbildungsfehler scheint eine sinnvolle Lösungsmöglichkeit darzustellen. Ob die Kombination aus arithmetischem Mittel, Standardabweichung und maximalem Delta innerhalb eines Bereichs die wahrgenommene virtuelle Bildqualität eines AR HUD am stärksten beeinflusst, muss im Rahmen weiterer Probandenstudien untersucht werden.

Bezüglich des grundsätzlichen Studiendesigns, zeigt die Probandenstudie im Rahmen von Kapitel 4 zudem, dass in zukünftigen Studien ein *Within-Subjects-Design* Anwendung finden sollte. Hintergrund ist an dieser Stelle, dass den Proband:innen in der Regel eine Referenz zur Beurteilung der Qualität fehlte. Bestätigt wird diese Annahme durch die Bewertung verschiedener Bereiche innerhalb eines virtuellen Bildes durch unterschiedliche Punktbewertungen der Bereiche sowie explizite Nennungen zu störenden Bildbereichen durch die Proband:innen. Außerdem sind in zukünftigen Probandenstudien Proband:innen einzubinden, welche bereits Erfahrung mit einem AR HUD besitzen.

Auf diesen Erkenntnissen basiert die weitere Optimierung des HUD Systems. Auf Seiten der WSS muss entsprechend eine Verbesserung des Herstellungsprozesses stattfinden. Dies betrifft vor allem den Biegeprozess der WSS-Singlets, da in diesem Produktionsschritt die maßgebliche Form und Geometrie der WSS entsteht. Den aktuellen Stand der Technik stellt das sogenannte *Single-Sheet-Press-Bending* dar, bei welchem einzelne WSS-Singlets mit Hilfe eines Press-Biege-Werkzeugs in die gewünschte Form gebracht werden. Da die Innovationszyklen des Biegeprozesses aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten sehr träge sind, ist davon auszugehen, dass kurz- und mittelfristig an dieser Stelle nur geringes Verbesserungspotential besteht. Hinzu kommt, dass eine Verbesserung der HUD Reflektionsfläche einer WSS in Kontrast zu anderen Funktionen der WSS steht. Dazu gehört bspw. die Transmissionsoptik.

Input zu möglichen weiteren Entwicklungsfeldern werden die zukünftig verfügbaren Kundenrückmeldungen der nun im Markt befindlichen AR HUD Systeme geben können. Daraus sind folglich auch Rückschlüsse zur Weiterentwicklung der WSS zu erwarten. Zum einen gewinnen die OEM und Windschutzscheibenlieferanten Erfahrung hinsichtlich Geometrie sowie Produktion der WSS, und lassen diese als Lessons Learned in zukünftige Entwicklungen einfließen. Zum anderen werden vor allem die OEM Benchmark-Aktivitäten

durchführen und daraus weitere Potentiale zur Verbesserung der WSS und schlussendlich virtuellen Bildqualität ableiten. Hierzu gehört bspw. auch die Analyse der WSS-Geometrien verschiedener AR HUD Systeme mit entsprechenden virtuellen Bildqualitäten. Neben den in der theoretischen Simulation zu erreichenden Bildqualitäten, müssen auch die tatsächlich zu erreichenden Bildqualitäten inkl. Fertigungstoleranzen der WSS berücksichtigt werden. Voruntersuchungen zur Fertigungsgenauigkeit verschiedener Radienverläufe weisen bereits Unterschiede in Abhängigkeit der gesamtheitlichen WSS-Geometrien auf. Folglich kann schon die entwickelte WSS-Geometrie einen direkten Einfluss auf die am Ende zu erreichende virtuelle Bildqualität geben.

Gleichermaßen gilt für die Umsetzung eines p-polarisierten HUD Systems. Wie aufgezeigt, kann zur Erreichung eines qualitativ hochwertigen p-polarisierten HUD Systems, die grundsätzliche optische Systemauslegung einen großen Beitrag für eine gute virtuelle Bildqualität darstellen. Ziel ist dabei das Erreichen des im Rahmen der Probandenstudie ermittelten minimal zulässigen Leuchtdichteveerhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  für das Doppelbild. Dazu gehört auf Seiten des HUD Projektors die Optimierung der Emission p-polarisierten Lichts. Dies kann durch eine verbesserte Anordnung von PGU und Spiegel oder dem Einsatz von Retardern bzw. Polarisationsfiltern im Projektor umgesetzt werden (siehe Abschnitt 5.2). An dieser Stelle sind weiterführende Untersuchungen nötig, vor allem um die letztendliche Effizienz und Beständigkeit von Retardern und Polarisationsfilter im HUD Projektor festzustellen.

Auf Seiten der WSS tragen vor allem zwei Maßnahmen zum Erreichen des minimal zulässigen Leuchtdichteveerhältnisses  $\frac{L_P}{L_S}$  bei. Zum einen ist dies die Einbaulage der WSS, welche maßgeblich von der Gesamtfahrzeugarchitektur abhängt. Zum anderen ist dies die Erhöhung der Reflektivität für p-polarisiertes Licht an der WSS anhand einer zusätzlich optisch aktiven Schicht. Dadurch kann die Helligkeit des primären Bildes gegenüber dem sekundären Bild erhöht und damit das Leuchtdichteveerhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  verbessert werden.

Welche Maßnahmen schlussendlich nötig sind, um das im Rahmen der Probandenstudie ermittelte minimal zulässige Leuchtdichteveerhältnis  $\frac{L_P}{L_S}$  zu erreichen, müssen weitere Untersuchungen zeigen. Zu beachten sind dabei vor allem die Interdependenzen der verschiedenen Maßnahmen. Bspw. führt die Erhöhung der Reflektivität für p-polarisiertes Licht an der WSS zu einer Verringerung der Lichttransmission  $T_V$  im sichtbaren Bereich. Letztere muss für die WSS mindestens 70 % betragen. Dabei muss weiterhin die Kombination

unterschiedlicher Funktionen in der WSS möglich sein, bspw. der Einsatz metallischer Beschichtungen zur Reduktion des Wärmeeintrags in das Fahrzeug oder zur vollflächigen Beheizung der WSS. Weitere Details bzgl. zukünftigen Untersuchungen sind Abschnitt 5.4 zu entnehmen.

Weder in dieser Arbeit, noch in aktueller Literatur, sind Designprinzipien zur Reduktion wahrnehmbarer Abbildungsfehler berücksichtigt. Bspw. könnten bestimmte Geometrien, Farben, Schriftarten oder Formen die subjektive Wahrnehmung von Abbildungsfehlern im virtuellen Bild reduzieren und entsprechend eine erhöhte Bildqualität vermitteln. Ein konkretes Beispiel wäre das Vermeiden gerader und eckiger Geometrien, bspw. ein Rechteck oder eine gerade Linie, weil Abweichungen dieser Formen auffällig sind, vor allem bei dynamischer Kopfposition und sich verzerrender Geometrien. Ein weiteres Beispiel sind feine bzw. schmale Bildinhalte mit harten Kanten. Bei diesen Bildinhalten ist der Doppelbildfehler am einfachsten wahrzunehmen. Daher sind, wo möglich und aus ästhetischer Sicht vertretbar, schmale Bildinhalte zu vermeiden und anstatt harter Kanten auslaufende Bildinhalte zu wählen. In diesem Bereich besteht entsprechend weiteres Verbesserungspotential für das HUD.

Da das Volumen für ein AR HUD mit klassischer Reflektionsoptik und einem FOV von ca.  $10^\circ \times 5^\circ$  bei 15 l oder mehr liegt, ist es für die OEM eine große Herausforderung den hierfür benötigten Bauraum in der Instrumententafel bereitzustellen. Vor dem Hintergrund sich bisher stetig vergrößernder HUD Systeme, kann die bauraumseitige Integration zukünftiger HUD Projektoren noch herausfordernder sein. Um entsprechend zukünftig den FOV weiter vergrößern und AR HUD Systeme auch in kleineren Fahrzeugen einsetzen zu können, muss das Volumen des HUD Projektors signifikant kleiner werden. Ein Ansatz ist an dieser Stelle ein holografisches HUD zur Reduktion des Projektorvolumens bei gleichzeitiger Vergrößerung des FOV, der virtuellen Bildentfernung und damit des virtuellen Bildes (siehe Abschnitt 3.3.1). Allerdings bringt die Umsetzung eines tatsächlichen holografischen HUD mit Beugungsoptik viele Herausforderungen hinsichtlich Industrialisierung und neuartiger Fehlerbilder mit sich. Trotz der sich für diese Technologie ergebenden Herausforderungen, welche in Abschnitt 3.3.1 bereits beschrieben wurde, ist das theoretische Potential des holografischen Ansatzes so groß, dass weitere Untersuchungen sinnvoll erscheinen. Entsprechend sind auch weitere Ansätze zur Reduktion des Projektorvolumens ernsthaft zu verfolgen.

Verglichen mit anderen Fahrzeugsystemen ist das HUD ein noch junges System. Beim Ausrollen in den breiten Massenmarkt werden tiefergehende Untersuchungen vermehrt

möglich sein, da die grundsätzliche Verfügbarkeit zunimmt. Während das klassische HUD des letzten Jahrzehnts vordergründig Informationen der Instrumententafel in das direkte Sichtfeld des Fahrers brachte, stellt das AR HUD eine Evolution in der Informationsbereitstellung im Automobil dar. Grund hierfür ist, dass virtuell generierte Inhalte in die tatsächliche Umwelt der Fahrer:in integriert werden. Neben der Verbesserung der reinen Bildqualität ist daher zu erwarten, dass sich das UI des AR HUD in den kommenden Jahren stark weiterentwickeln wird. In Anbetracht der Abnahme der Fokussierung auf die Fahraufgabe aufgrund erhöhtem Anteil automatisierten Fahrens, bei gleichzeitigem Anstieg der Informationsquellen im Fahrzeug, muss das gesamtheitliche UX Konzept bis hin zur Multimodalität neu entwickelt werden.

Zuletzt können die Erkenntnisse dieser Arbeit auch in AR Anwendungen bzw. stereoskopischen Systemen außerhalb des Automobils Anwendung finden. Darunter fallen sowohl der Zielwert des minimal zulässigen Leuchtdichteverhältnisses  $\frac{L_p}{L_s}$ , als auch Erkenntnisse zur grundsätzlichen Wahrnehmung von Abbildungsfehlern eines virtuellen Bildes, wie z.B. der Empfindlichkeit ggü. stereoskopischen Fehlern.



## Literaturverzeichnis

- [1] Daimler AG. 2021. Die absolute Spitze der GT-Familie: Der neue Mercedes-AMG GT Black Series. Retrieved January 18, 2021 from <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Die-absolute-Spitze-der-GT-Familie-Der-neue-Mercedes-AMG-GT-Black-Series.xhtml?oid=47663457>
- [2] Automotive Industry Action Group. 2010. *Measurement Systems Analysis* (4th Edition.). Automotive Industry Action Group.
- [3] Ronald Azuma. 1995. Predictive Tracking for Augmented Reality.
- [4] Ronald Azuma. 1997. A Survey of Augmented Reality. *Presence Teleoperators Virtual Environ.* 6, 4 (1997), 355–385. DOI:<https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- [5] Mark F Bear, Barry W Connors, and Michael A Paradiso. 2018. Das zentrale visuelle System. In *Neurowissenschaften: Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie*, Andreas K Engel (ed.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 349–388. DOI:[https://doi.org/10.1007/978-3-662-57263-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57263-4_10)
- [6] Mark F Bear, Barry W Connors, and Michael A Paradiso. 2018. Das Auge. In *Neurowissenschaften: Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie*, Andreas K Engel (ed.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 309–347. DOI:[https://doi.org/10.1007/978-3-662-57263-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57263-4_9)
- [7] K Bengler, K Dietmayer, B Farber, M Maurer, C Stiller, and H Winner. 2014. Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives. *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.* 6, 4 (2014), 6–22. DOI:<https://doi.org/10.1109/MITS.2014.2336271>
- [8] R Blake. 1989. A neural theory of binocular rivalry. *Psychol. Rev.* 96, 1 (January 1989), 145–167. DOI:<https://doi.org/10.1037/0033-295x.96.1.145>
- [9] Randolph Blake. 2001. A Primer on Binocular Rivalry, Including Current Controversies. *Brain Mind* 2, 1 (2001), 5–38. DOI:<https://doi.org/10.1023/A:1017925416289>
- [10] María J Blanca, Rafael Alarcón, Jaume Arnau, Roser Bono, and Rebecca Bendayan.

2017. Non-normal data: Is ANOVA still a valid option? *Psicothema* 29, 4 (November 2017), 552–557. DOI:<https://doi.org/10.7334/psicothema2016.383>
- [11] Heiner Bubb. 1976. Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug. Technische Universität München.
- [12] Heiner Bubb, Klaus Bengler, Jurek Breuninger, Christian Gold, and Magnus Helmbrecht. 2015. *Automobilergonomie*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. DOI:<https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2297-0>
- [13] Markus Bühner and Matthias Ziegler. 2009. Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler. . Person Deutschland GmbH, München, 343–360.
- [14] Calibre Research. 2021. *Global Polarized Sunglasses Market Industry Research Report 2021*.
- [15] Vassilis Charissis, Martin Naef, Stylianos Papanastasiou, and Marianne Patera. 2007. Designing a Direct Manipulation HUD Interface for In-Vehicle Infotainment. In *Human-Computer Interaction. Interaction Platforms and Techniques*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 551–559.
- [16] Vassilis Charissis and Stylianos Papanastasiou. 2008. Human–machine collaboration through vehicle head up display interface. *Cogn. Technol. Work* 12, 1 (2008), 41–50. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10111-008-0117-0>
- [17] Kenneth Ciuffreda and Barry Tannen. 1995. *Eye Movement Basics For The Clinician* (1st Editio ed.). Mosby.
- [18] Commission of the European Communities. 2008. *COMMISSION RECOMMENDATION of 26 May 2008 on safe and efficient in-vehicle information and communication systems: update of the European Statement of Principles on human-machine interface*. Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008H0653&from=EN>
- [19] P Coni, N Damamme, and J Bardon. 2019. The Future of Holographic Head-Up Display. *IEEE Consum. Electron. Mag.* 8, 5 (2019), 68–73. DOI:<https://doi.org/10.1109/MCE.2019.2923935>
- [20] John Van Derlofske, Steve Pankratz, Matt Johnson, and Eileen Franey. 2019. 63-4:

Invited Paper: New Optical Films for Next Generation AR Head Up Displays (HUDs).  
*SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 50, 1 (2019), 897–900.  
DOI:<https://doi.org/10.1002/sdtp.13068>

- [21] Edgar Dietrich and Alfred Schulze. 2017. *Eignungsnachweis von Prüfprozessen* (5th ed.). Carl Hanser Verlag. Retrieved from <https://content-select.com/de/portal/media/view/5951f3f4-42b4-403e-85e8-37b5b0dd2d03>
- [22] Chris Dijksterhuis, Arjan Stuiver, Ben Mulder, Karel A Brookhuis, and Dick de Waard. 2012. An Adaptive Driver Support System: User Experiences and Driving Performance in a Simulator. *Hum. Factors* 54, 5 (2012), 772–785.  
DOI:<https://doi.org/10.1177/0018720811430502>
- [23] DIN-Normenausschuss Automobiltechnik. 2017. *Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug (ISO 15008:2017)*. Beuth Verlag GmbH, Deutschland.
- [24] Ralf Dörner, Wolfgang Broll, Paul Grimm, and Bernhard Jung. 2019. *Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität* (2nd ed.). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.  
DOI:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58861-1>
- [25] Edmund Optics GmbH. 2022. Was sind Verzögerungsplatten? Retrieved from <https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/optics/understanding-waveplates>
- [26] Edmund Optics Inc. 2020. *POLYMER POLARIZING FILMS AND RETARDERS BY EO - WP280 RETARDER*.
- [27] Mica Endsley. 1995. Toward a Theory of Situation Awareness. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 37, (1995), 32–64.  
DOI:<https://doi.org/10.1518/001872095779049543>
- [28] David Foyle, Robert Mccann, Beverly Sanford, and Martin Schwirzke. 1993. Attentional Effects with Superimposed Symbology: Implications for Head-Up Displays(HUD). *Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet. Proc.* 37, (1993), 1340–1344.  
DOI:<https://doi.org/10.1518/107118193784162227>
- [29] Irasianty Frost. 2017. *Statistische Testverfahren, Signifikanz und p-Werte*.

DOI:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-16258-0>

- [30] Kikuo Fujimura, Lijie Xu, Cuong Tran, Rishabh Bhandari, and Victor Ng-Thow-Hing. 2013. Driver Queries Using Wheel-Constrained Finger Pointing and 3-D Head-up Display Visual Feedback. In *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (AutomotiveUI '13), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 56–62. DOI:<https://doi.org/10.1145/2516540.2516551>
  
- [31] J L Gabbard, G M Fitch, and H Kim. 2014. Behind the Glass: Driver Challenges and Opportunities for AR Automotive Applications. *Proc. IEEE* 102, 2 (February 2014), 124–136. DOI:<https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2294642>
  
- [32] Christine Garhart and Vasudevan Lakshminarayanan. 2012. Anatomy of the Eye. In *Handbook of Visual Display Technology*, Janglin Chen, Wayne Cranton and Mark Fihn (eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 73–83. DOI:[https://doi.org/10.1007/978-3-540-79567-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79567-4_4)
  
- [33] Georg Geiser. 1985. MENSCH-MASCHINE-KOMMUNIKATION IM KRAFTFAHRZEUG.
  
- [34] P George, I Thouvenin, V Frémont, and V Cherfaoui. 2012. DAARIA: Driver assistance by augmented reality for intelligent automobile. In *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 1043–1048. DOI:<https://doi.org/10.1109/IVS.2012.6232220>
  
- [35] Michael A Gerber, Ronald Schroeter, Li Xiaomeng, and Mohammed Elhenawy. 2020. Self-Interruptions of Non-Driving Related Tasks in Automated Vehicles: Mobile vs Head-Up Display. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (CHI '20), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–9. DOI:<https://doi.org/10.1145/3313831.3376751>
  
- [36] Christoph Gerhard. 2016. *Tutorium Optik*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-48575-0>
  
- [37] Christopher P Gibson. 1980. Binocular Disparity and Head-Up Displays. *Hum. Factors* 22, 4 (1980), 435–444. DOI:<https://doi.org/10.1177/001872088002200405>
  
- [38] K.W. Gish and L. Staplin. 1995. Human factors aspects of using head up displays in automobiles : A review of the literature. August (1995), 84.

- [39] Kenneth W Gish, Loren Staplin, Joseph Stewart, and Michael Perel. 1999. Sensory and Cognitive Factors Affecting Automotive Head-Up Display Effectiveness. *Transp. Res. Rec.* 1694, 1 (1999), 10–19. DOI:<https://doi.org/10.3141/1694-02>
- [40] Gene V Glass, Percy D Peckham, and James R Sanders. 1972. Consequences of Failure to Meet Assumptions Underlying the Fixed Effects Analyses of Variance and Covariance. *Rev. Educ. Res.* 42, 3 (1972), 237–288.  
DOI:<https://doi.org/10.3102/00346543042003237>
- [41] Rudolf Gross. 2003. Die Polarisation von Licht. In *Optik und Quantenphänomene*. Walther-Meissner-Institut, Garching, 77–121. Retrieved from <https://docplayer.org/22870-Die-polarisation-von-licht.html>
- [42] Renate Haeuslschmid, Susanne Forster, Katharina Vierheilig, Daniel Buschek, and Andreas Butz. 2017. Recognition of Text and Shapes on a Large-Sized Head-Up Display. In *Proceedings of the 2017 Conference on Designing Interactive Systems (DIS '17)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 821–831.  
DOI:<https://doi.org/10.1145/3064663.3064736>
- [43] Renate Haeuslschmid, Bastian Pfleging, and Florian Alt. 2016. A Design Space to Support the Development of Windshield Applications for the Car. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 5076–5091.  
DOI:<https://doi.org/10.1145/2858036.2858336>
- [44] Robert T Held, Emily A Cooper, and Martin S Banks. 2012. Blur and disparity are complementary cues to depth. *Curr. Biol.* 22, 5 (March 2012), 426–431.  
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.01.033>
- [45] Julian Hochberg. 1971. Perception. In *Handbook of Experimental Psychology* (3rd Editio), J.W. Kling & L.A. Riggs (ed.). Holt, Rinehart, & Winston, New York, NY, USA, 396–550.
- [46] Richard L Holloway. 1997. Registration Error Analysis for Augmented Reality. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.* 6, 4 (August 1997), 413–432.  
DOI:<https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.413>
- [47] Richard Lee Holloway. 1995. Registration Errors in Augmented Reality Systems. University of North Carolina at Chapel Hill, USA.

- [48] William J. Horrey and Christopher D. Wickens. 2004. Driving and Side Task Performance: The Effects of Display Clutter, Separation, and Modality. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc. (HUM FACTORS)* 46, 4 (2004), 611–624. DOI:[https://doi.org/https://doi.org/10.1518/hfes.46.4.611.56805](https://doi.org/10.1518/hfes.46.4.611.56805)
- [49] Yasuhiro Inuzuka, Yoshimasa Osumi, and Hiroaki Shinkai. 1991. Visibility of Head up Display (HUD) for Automobiles. *Proc. Hum. Factors Soc. Annu. Meet.* 35, 20 (1991), 1574–1578. DOI:<https://doi.org/10.1177/154193129103502033>
- [50] Richie Jose, Gun A Lee, and Mark Billinghurst. 2016. A Comparative Study of Simulated Augmented Reality Displays for Vehicle Navigation. In *Proceedings of the 28th Australian Conference on Computer-Human Interaction (OzCHI '16)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 40–48. DOI:<https://doi.org/10.1145/3010915.3010918>
- [51] Arburg GmbH & Co KG. 2016. Pressemitteilung HUD Continental. Retrieved December 9, 2017 from [https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/presse/2016/arburg\\_pressemitteilung\\_hud\\_continental\\_2016\\_de.docx](https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/presse/2016/arburg_pressemitteilung_hud_continental_2016_de.docx)
- [52] SeungJun Kim and Anind K Dey. 2009. Simulated Augmented Reality Windshield Display as a Cognitive Mapping Aid for Elder Driver Navigation. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '09)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 133–142. DOI:<https://doi.org/10.1145/1518701.1518724>
- [53] Peter Knoll. 2015. Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, Hermann Winner, Stephan Hakuli, Felix Lotz and Christina Singer (eds.). Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 659–673. DOI:[https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3_36)
- [54] Marc Lambooij, Wijnand Ijsselsteijn, Marten Fortuin, and Ingrid Heynderickx. 2009. Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review. *J. Imaging Sci. Technol. - J IMAGING SCI TECHNOL* 53, (2009). DOI:<https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2009.53.3.030201>
- [55] J Lee, C Yoon, J Kang, B Park, and K Kim. 2015. Development of lane-level guidance service in vehicle augmented reality system. In *2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 263–266. DOI:<https://doi.org/10.1109/ICACT.2015.7224799>

- [56] Tadashi Lino, Tatsumi Otsuka, and Yoshiyuki Suzuki. 1988. Development of Heads-Up Display for a Motor Vehicle. In *SAE International Congress and Exposition*, SAE International. DOI:[https://doi.org/https://doi.org/10.4271/880217](https://doi.org/10.4271/880217)
- [57] Yung-Ching Liu and Ming-Hui Wen. 2004. Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan. *Int. J. Hum. Comput. Stud.* 61, 5 (November 2004), 679–697. DOI:<https://doi.org/10.1016/J.IJHCS.2004.06.002>
- [58] Simon Lüdemann. 2020. *Sunglasses Report 2020*.
- [59] Bernhard Maurer, Sandra Tröster, Magdalena Gärtner, Martin Wuchse, Alex Baumgartner, Alexander Meschtscherjakov, David Wilfinger, and Manfred Tscheligi. 2014. Shared Gaze in the Car: Towards a Better Driver-Passenger Collaboration. In *Adjunct Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, Association for Computing Machinery, New York; NY, USA, 1–6. DOI:<https://doi.org/10.1145/2667239.2667274>
- [60] Zeljko Medenica, Andrew L. Kun, Tim Paek, and Oskar Palinko. 2011. Augmented reality vs. street views: A driving simulator study comparing two emerging navigation aids. *Mob. HCI 2011 - 13th Int. Conf. Human-Computer Interact. with Mob. Devices Serv.* (2011), 265–274. DOI:<https://doi.org/10.1145/2037373.2037414>
- [61] Mercedes-Benz AG. 2020. Mercedes-Benz Konfigurator. *Mercedes-Benz AG*. Retrieved September 10, 2020 from [https://www.mercedes-benz.de/passengercars/configurator.html?csref=mc-sem\\_cn-DEU\\_WS\\_MBC\\_Brand\\_Combination\\_ci-Google\\_si-g\\_pi-kwd-300735337658\\_cri-372642879048\\_ai-mercedes-benz+konfigurator&kpid=go\\_cmp-119026593\\_adg-44214468173\\_ad-372642879048\\_kwd-300735337](https://www.mercedes-benz.de/passengercars/configurator.html?csref=mc-sem_cn-DEU_WS_MBC_Brand_Combination_ci-Google_si-g_pi-kwd-300735337658_cri-372642879048_ai-mercedes-benz+konfigurator&kpid=go_cmp-119026593_adg-44214468173_ad-372642879048_kwd-300735337)
- [62] Mercedes-Benz AG. 2020. At home on the road – luxurious and digital - Mercedes Me Media. *Mercedes-Benz AG*. Retrieved September 10, 2020 from At home on the road – luxurious and digital
- [63] Mark Mon-Williams and John P Wann. 1998. Binocular Virtual Reality Displays: When Problems Do and Don't Occur. *Hum. Factors* 40, 1 (1998), 42–49. DOI:<https://doi.org/10.1518/001872098779480622>
- [64] Jakob Nielsen. 1994. *Usability Engineering*. Elsevier Science. DOI:<https://doi.org/https://doi.cir-mcs.e.corpintra.net/10.1016/C2009-0-21512-1>

- [65] Valentine Nwakacha, Andy Crabtree, and Gary Burnett. 2013. Evaluating Distraction and Disengagement of Attention from the Road. In *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Systems and Applications*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 261–270.
- [66] H Okumura, A Hotta, T Sasaki, K Horiuchi, and N Okada. 2018. Wide field of view optical combiner for augmented reality head-up displays. In *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 1–4.  
DOI:<https://doi.org/10.1109/ICCE.2018.8326064>
- [67] D Owens. 1979. The Mandelbaum Effect: Evidence for an accommodative bias toward intermediate viewing distances. *J. Opt. Soc. Am.* 69, (1979), 646–652.  
DOI:<https://doi.org/10.1364/JOSA.69.000646>
- [68] Oskar Palinko, Andrew L Kun, Zachary Cook, Adam Downey, Aaron Lecomte, Meredith Swanson, and Tina Tomaszewski. 2013. Towards Augmented Reality Navigation Using Affordable Technology. In *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (AutomotiveUI '13), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 238–241. DOI:<https://doi.org/10.1145/2516540.2516569>
- [69] Juhee Park and Woojin Park. 2019. Functional requirements of automotive head-up displays: A systematic review of literature from 1994 to present. *Appl. Ergon.* 76, December 2018 (2019), 130–146. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.12.017>
- [70] Kibum Park and Youngjae Im. 2020. Ergonomic Guidelines of Head-Up Display User Interface during Semi-Automated Driving. *Electronics* 9, (2020), 611.  
DOI:<https://doi.org/10.3390/electronics9040611>
- [71] Robert Earl Patterson. 2016. Binocular Vision and Depth Perception. In *Handbook of Visual Display Technology*, Janglin Chen, Wayne Cranton and Mark Fihn (eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 121-. DOI:[https://doi.org/10.1007/978-3-540-79567-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79567-4_9)
- [72] Annie Pauzie. 2015. Head Up Display in Automotive: A New Reality for the Driver. In *Design, User Experience, and Usability: Interactive Experience Design*, Springer International Publishing, Cham, 505–516.
- [73] L Pfannmüller, M Walter, and Klaus Bengler. 2015. 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 *Proceedings of the*

*19th Treennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA) 2015.*

- [74] Lisa Pfannmüller. 2017. Anzeigekonzepte für ein kontaktanaloges Head-up Display.
- [75] Lisa Pfannmüller, Martina Kramer, Bernhard Senner, and Klaus Bengler. 2015. A Comparison of Display Concepts for a Navigation System in an Automotive Contact Analog Head-up Display. *Procedia Manuf.* 3, (2015), 2722–2729.  
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.678>
- [76] Rolf Porst. 2014. *Fragebogen: Ein Arbeitsbuch* (4. ed.). Springer VS, Wiesbaden.  
Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02118-4>
- [77] Fernando Puente Leon. 2019. *Messtechnik* (11th ed.). Springer Vieweg, Wiesbaden.  
DOI:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59767-5>
- [78] Z Qin, F Lin, Y Huang, and H D Shieh. 2017. Maximal Acceptable Ghost Images for Designing a Legible Windshield-Type Vehicle Head-Up Display. *IEEE Photonics J.* 9, 6 (2017), 1–12. DOI:<https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2758820>
- [79] Pablo Richter, Wolff von Spiegel, and Jonathan Waldern. 2018. 55-2: Invited Paper: Volume Optimized and Mirror-less Holographic Waveguide Augmented Reality Head-up Display. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 49, 1 (2018), 725–728.  
DOI:<https://doi.org/10.1002/sdtp.12382>
- [80] S P Rogers, V A Spiker, and J Cincinelli. 1986. Luminance and luminance contrast requirements for legibility of self-luminous displays in aircraft cockpits. *Appl. Ergon.* 17, 4 (1986), 271–277. DOI:[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0003-6870\(86\)90129-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0003-6870(86)90129-8)
- [81] Vitalij Sadovitch. 2020. *Fehlertolerante Anzeigengestaltung für Augmented Reality Head-up-Displays*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wolfsburg.  
DOI:<https://doi.org/https://doi.cir-mcs.e.corpintra.net/10.1007/978-3-658-29520-2>
- [82] SAE On-Road Automated Driving Committee. 2018. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.  
DOI:[https://doi.org/https://doi.org/10.4271/J3016\\_201806](https://doi.org/https://doi.org/10.4271/J3016_201806)
- [83] Tamara von Sawitzky, Philipp Wintersberger, Andreas Riener, and Joseph L Gabbard. 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 '19), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. DOI:<https://doi.org/10.1145/3321335.3324947>

- [84] Marcus Schneid. 2008. Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up Displays im Fahrzeug. TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN. Retrieved from <https://mediatum.ub.tum.de/doc/652901/652901.pdf>
- [85] Matthias Schneider, Anna Bruder, Marc Necker, Tim Schluesener, Niels Henze, and Christian Wolff. 2019. A Field Study to Collect Expert Knowledge for the Development of AR HUD Navigation Concepts. In *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications: Adjunct Proceedings* (AutomotiveUI '19), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 358–362. DOI:<https://doi.org/10.1145/3349263.3351339>
- [86] Nadja Schömig, Katharina Wiedemann, Frederik Naujoks, Alexandra Neukum, Bettina Leuchtenberg, and Thomas Vöhringer-Kuhnt. 2018. An Augmented Reality Display for Conditionally Automated Driving. In *Adjunct Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (AutomotiveUI '18), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 137–141. DOI:<https://doi.org/10.1145/3239092.3265956>
- [87] Tobias Schumm and Ralf Worzischek. 2011. Serienfertigung von Head-up-Displays. *ATZproduktion* 4, 4 (2011), 32–37. DOI:<https://doi.org/10.1365/s35726-011-0057-5>
- [88] S Tarek Shahriar and Andrew L Kun. 2018. Camera-View Augmented Reality: Overlaying Navigation Instructions on a Real-Time View of the Road. In *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (AutomotiveUI '18), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 146–154. DOI:<https://doi.org/10.1145/3239060.3240447>
- [89] Sebastian Slama. 2020. Optik. In *Experimentalphysik kompakt für Naturwissenschaftler : Mechanik, Thermodynamik, Elektrodynamik, Optik & Quantenphysik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 247–298. DOI:[https://doi.org/10.1007/978-3-662-60613-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-60613-1_10)
- [90] Missie Smith, Joseph Gabbard, Gary Burnett, and Nadejda Doutcheva. 2017. The Effects of Augmented Reality Head-Up Displays on Drivers' Eye Scan Patterns, Performance, and Perceptions. *Int. J. Mob. Hum. Comput. Interact.* 9, (2017), 1–17. DOI:<https://doi.org/10.4018/IJMHCI.2017040101>

- [91] Aaron Steinfeld and Paul Green. 1995. Driver Response Times to Full-Windshield, Head-Up Displays for Navigation and Vision Enhancement Type of Report and Period Covered. (1995). Retrieved from <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/1125/90528.0001.001.pdf;sequence=2>
- [92] K Tangmanee and S Teeravarunyou. 2012. Effects of guided arrows on head-up display towards the vehicle windshield. In *2012 Southeast Asian Network of Ergonomics Societies Conference (SEANES)*, 1–6.  
DOI:<https://doi.org/10.1109/SEANES.2012.6299572>
- [93] M Tonnis, V Broy, and G Klinker. 2006. A Survey of Challenges Related to the Design of 3D User Interfaces for Car Drivers. In *3D User Interfaces (3DUI'06)*, 127–134.  
DOI:<https://doi.org/10.1109/VR.2006.19>
- [94] M Tonnis and G Klinker. 2006. Effective control of a car driver's attention for visual and acoustic guidance towards the direction of imminent dangers. In *2006 IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 13–22.  
DOI:<https://doi.org/10.1109/ISMAR.2006.297789>
- [95] M Tonnis, C Sandor, G Klinker, C Lange, and H Bubb. 2005. Experimental evaluation of an augmented reality visualization for directing a car driver's attention. In *Fourth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '05)*, 56–59. DOI:<https://doi.org/10.1109/ISMAR.2005.31>
- [96] Phillip Tretten, Anita Gärling, Rickard Nilsson, and Tobias C Larsson. 2011. An On-Road Study of Head-Up Display: Preferred Location and Acceptance Levels. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 55, 1 (2011), 1914–1918.  
DOI:<https://doi.org/10.1177/1071181311551398>
- [97] T Tsuruyama, A Hotta, T Sasaki, and H Okumura. 2019. Multimirror Array Optics for Augmented Reality Devices in Automotive Applications. *IEEE Consum. Electron. Mag.* 8, 5 (2019), 86–91. DOI:<https://doi.org/10.1109/MCE.2019.2923897>
- [98] VDA. 2011. *Band 5 - Prüfprozesseignung*. Verband der Automobilindustrie e.V., Berlin.
- [99] Daniel Wagner. 2018. Erarbeitung von Qualitätskennzahlen für Head-up Display Windschutzscheiben der nächsten Generation bezüglich optischer Fehlerbilder mittels ‘Design of Experiments’ (DoE). Hochschule Darmstadt.

- [100] Daniel Wagner. 2021. Blickfeldanzeigevorrichtung und Fahrzeug. 10.
- [101] Daniel Wagner and Konstantin Muth. 2021. Introduction of the Double Image Contrast Ratio (DICR) for P-Polarized Head-up Displays. In *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 716–723. DOI:<https://doi.org/10.1109/IV48863.2021.9575413>
- [102] Daniel Wagner and Konstantin Muth. 2021. Head-up-Display für ein Kraftfahrzeug. 11.
- [103] Daniel Wagner, Matthias Schneider, Florian Dross, Stefan Langer, Susanne Zeidler, Thomas Ganz, and Uli Lemmer. 2020. Impact Study of Windshield Geometry on the Subjective Customer Perception for Augmented Reality Head-up Displays (AR HUD). In *SID Symposium Digest of Technical Papers 2020*, Wiley, Hoboken, New Jersey, 254–247. Retrieved from <http://sid.org/Portals/5/pdf/Digest/2020/docs/18-3.pdf>
- [104] Jonathan David Waldern, Alastair John Grant, and Milan Momcilo Popovich. 2018. 17-4: DigiLens AR HUD Waveguide Technology. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 49, 1 (2018), 204–207. DOI:<https://doi.org/10.1002/sdtp.12523>
- [105] C Ware, C Gobrecht, and M A Paton. 1998. Dynamic adjustment of stereo display parameters. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. - Part A Syst. Humans* 28, 1 (1998), 56–65. DOI:<https://doi.org/10.1109/3468.650322>
- [106] Colin Ware. 2021. *Information Visualization* (Fourth Edi ed.). Morgan Kaufmann. DOI:<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812875-6.00003-7>
- [107] M Weihrauch, G G Meloeny, and T C Goesch. 1989. The First Head Up Display Introduced by General Motors. In *SAE International Congress and Exposition*, SAE International. DOI:<https://doi.org/https://doi.org/10.4271/890288>
- [108] Garrett Weinberg, Bret Harsham, and Zeljko Medenica. 2011. Evaluating the usability of a head-up display for selection from choice lists in cars. *Proc. 3rd Int. Conf. Automot. User Interfaces Interact. Veh. Appl. AutomotiveUI 2011* (2011), 39–46. DOI:<https://doi.org/10.1145/2381416.2381423>
- [109] Daniel Weintraub and Michael Ensing. 1992. *Human Factors Issues in Head-up Display Design: The Book of HUD*.
- [110] Michael Wheeler. 2016. HUD Systems: Augmented Reality Is Coming to Your

Windshield. *Photonics Spectra* February (2016), 34–37.

- [111] Christopher D. Wickens, John D. Lee, Yili Liu, and Sallie Gordon-Becker. 2003. *An Introduction to Human Factors Engineering* (2nd Editio ed.). Pearson.
- [112] P Wintersberger, A Frison, A Riener, and T v. Sawitzky. 2019. Fostering User Acceptance and Trust in Fully Automated Vehicles: Evaluating the Potential of Augmented Reality. *Presence* 27, 1 (2019), 46–62.  
DOI:[https://doi.org/10.1162/pres\\_a\\_00320](https://doi.org/10.1162/pres_a_00320)
- [113] Marc Wittmann, Peter Gugg, Alexander Steffen, Martina Fink, and Ernst Po. 2006. Effects of display position of a visual in-vehicle task on simulated driving. 37, (2006), 187–199. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2005.06.002>
- [114] B Yang, R Zheng, Y Yin, S Yamabe, and K Nakano. 2016. Analysis of influence on driver behaviour while using in-vehicle traffic lights with application of head-up display. *IET Intell. Transp. Syst.* 10, 5 (2016), 347–353.  
DOI:<https://doi.org/10.1049/iet-its.2015.0179>
- [115] M Zimmermann, S Bauer, N Lütteken, I M Rothkirch, and K J Bengler. 2014. Acting together by mutual control: Evaluation of a multimodal interaction concept for cooperative driving. In *2014 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, 227–235. DOI:<https://doi.org/10.1109/CTS.2014.6867569>

## Anhang

### A.1 Kamerapositionen des Messsystems für Augmented Reality Head-up Display Windschutzscheiben am Prüfstand

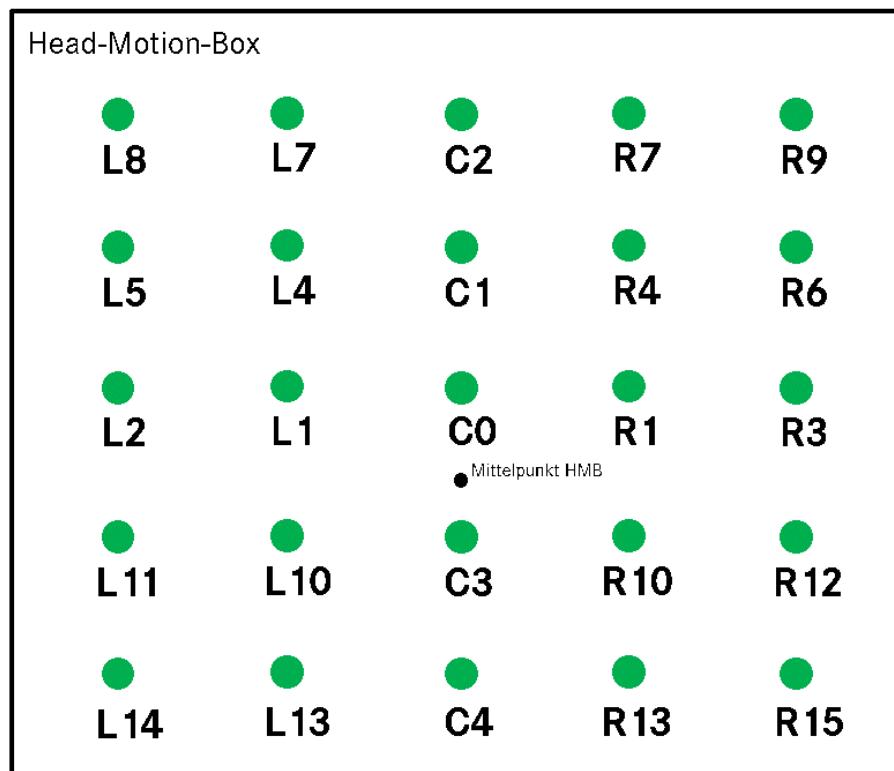


Abb. A - 1: Head-Motion-Box inkl. 25 Kamerapositionen des Messsystems zur Beurteilung des virtuellen Bildes eines AR HUD

### A.2 Fragebogen und Testbilder zur Probandenstudie: Einfluss der Windschutzscheibe auf die subjektive Wahrnehmung

/

# Fragebogen

Probandenstudie AR HUD BR223

WSS run:

Probanden Nr.: \_\_\_\_\_

Bitte ausfüllen und vor der Befragung abgeben:

Geschlecht:  männlich  weiblich

Alter:  ≤30 J.  31 – 40 J.  
 41 – 50 J.  ≥51 J.

Körpergröße:  ≤170 cm  
 171 – 180 cm  
 ≥ 181 cm

Sehhilfe:  ja  nein

Nutzung von Head-up Displays im Fahrzeug:

selten  häufig  immer

*Bitte beantworten Sie folgende Fragen um ein Gefühl für die in der Studie verwendete Bewertungsskala zu bekommen.*

<b>Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.</b>	stimmt nicht					stimmt				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Ich habe in der Vergangenheit bereits an einer Probandenuntersuchung teilgenommen.	<input type="checkbox"/>									
Das heutige Wetter in Sindelfingen gefällt mir gut.	<input type="checkbox"/>									
Ich interessiere mich für technische Sachverhalte.	<input type="checkbox"/>									

*In der folgenden Studie wird ein Interviewer bei der Bearbeitung des Fragebogens behilflich sein. Sie können sich dabei voll und ganz auf die gezeigten Inhalte konzentrieren. Wir wünschen Ihnen viel Spaß bei der Teilnahme.*

00\_Begrüßung

# Herzlich Willkommen



**Begrüßungsbild geschaltet?**

**Vorigen Fragebogen geheftet und abgelegt?**

**Persönliches Datenblatt von Proband eingesammelt?**

**Los geht's...**



- Einstieg in den Versuchsträger

- Einstellen der Sitzposition:

Die Sitzposition wird so lange korrigiert, bis die Fragen S, L und R mit 5 Punkten bewertet werden!

- Erfassen der Augposition

- Abgleich der Sehkraft



**Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.**

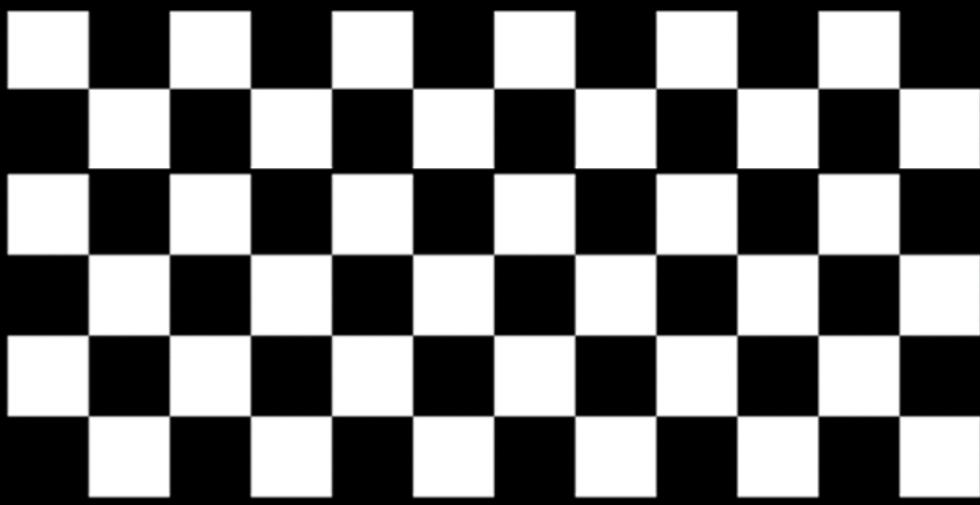
stimmt nicht	1	2	3	4	5	stimmt
-----------------	---	---	---	---	---	--------

W	Windschutzscheibe	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 7	<input type="checkbox"/> 10							
S	Ich habe eine Sitzposition gefunden, in der ich das Fahrzeug steuern könnte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
L	Ich habe einen guten Blick auf die Leinwand.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
R	Alle vier Rahmeneckpunkte des Bildes sind für mich sichtbar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
A	Augposition vertikal	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
B	Augposition horizontal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
O	Ich kann die 3-stellige Nummer, die auf dem Bus angezeigt wird, gut lesen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				

Bitte halten Sie Ihren Blick von nun an auf das Head-up Display gerichtet. Versuchen Sie Ihren Kopf nur zu bewegen, wenn Sie dazu aufgefordert werden. Stellen Sie sich vor, Sie würden das Fahrzeug steuern.

### Kommentarfeld

02\_Kacheln\_sw

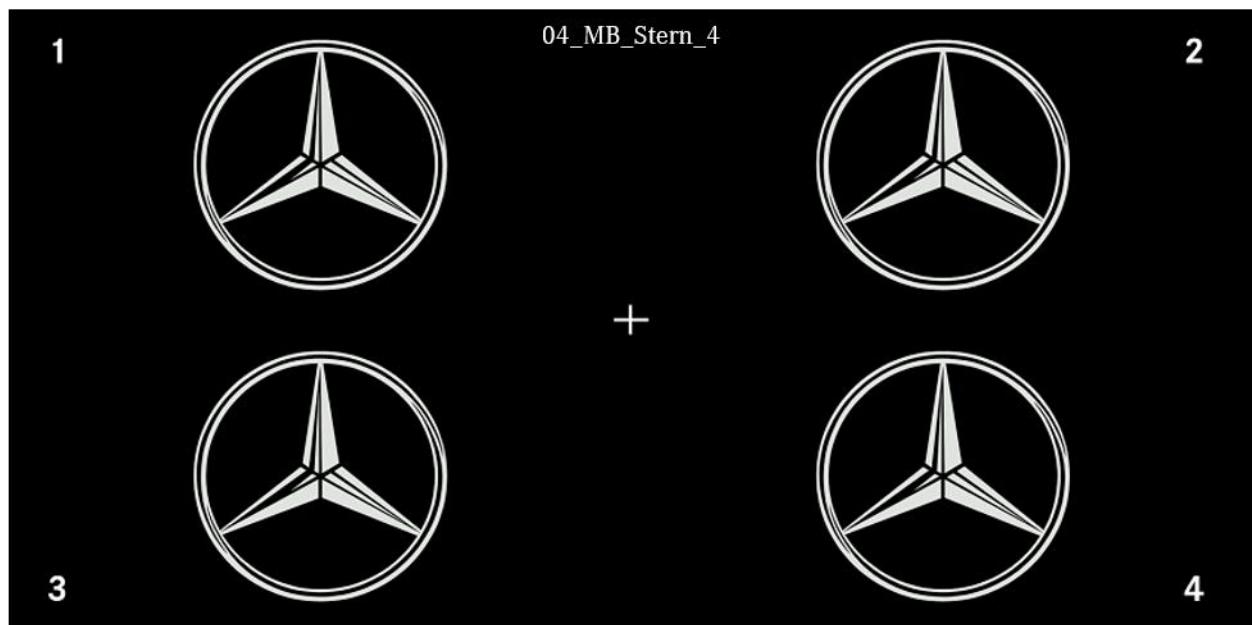


Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.		stimmt nicht	1	2	3	4	5	stimmt
1	Eine Kacheldarstellung ist zu erkennen.	<input type="checkbox"/>						
2	Das Bild liegt mittig in meinem Sichtfeld.	<input type="checkbox"/>						
3	Das Bild liegt waagerecht in meinem Sichtfeld.	<input type="checkbox"/>						
4	Alle Kacheln sind gleichermaßen gut und ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>						
<b>Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?</b>								

03\_MB\_Stern\_mittig



Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.		stimmt nicht 1	2	3	4	stimmt 5
5	Das Bild ist gut sichtbar und deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
6	Die Abbildung ist kreisrund und plastisch zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
7	Die Kanten der Darstellung sind scharf und eindeutig zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
8	Das Bild ist angenehm wahrnehmbar.	<input type="checkbox"/>				
9	Die Bildposition empfinde ich als angenehm.	<input type="checkbox"/>				
E	In welcher Entfernung zur Leinwand liegt das virtuelle Bild?					
<b>Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?</b>						

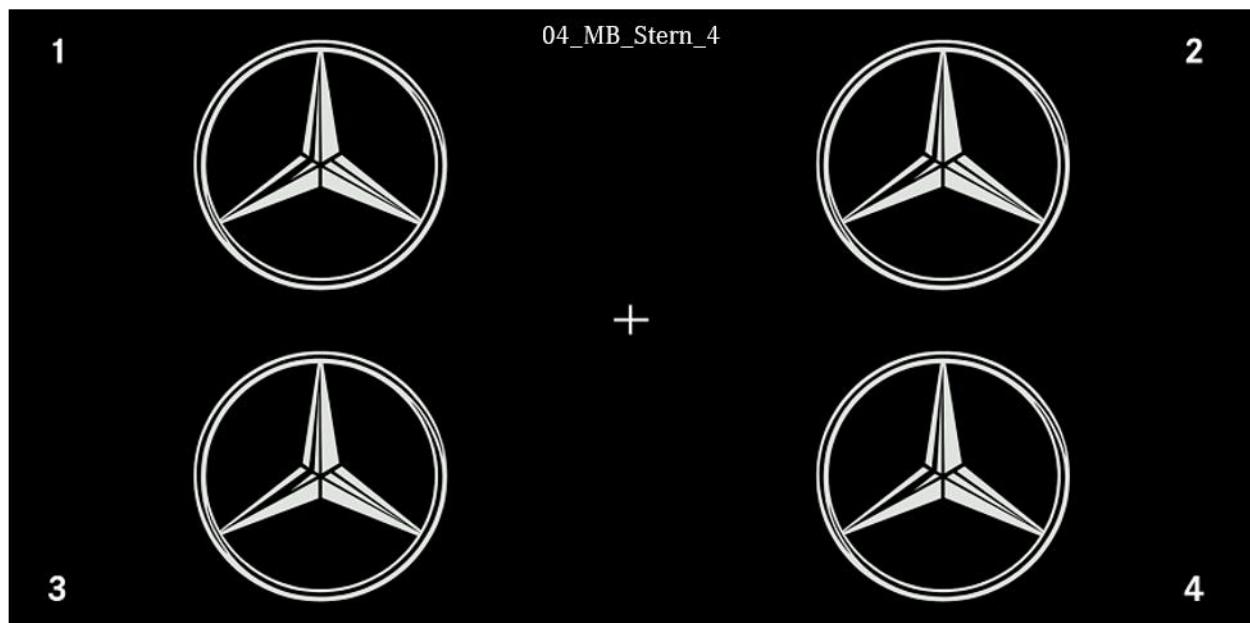


<b>Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.</b>	stimmt nicht					stimmt				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Bitte nehmen Sie sich einen Augenblick Zeit und betrachten Sie das Bild genau. Bitte achten Sie auf Unterschiede in Bezug auf die Wahrnehmbarkeit der vier Darstellungen.

10.1	Darstellung 1 ist klar und deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
10.2	Darstellung 2 ist klar und deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
10.3	Darstellung 3 ist klar und deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
10.4	Darstellung 4 ist klar und deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				

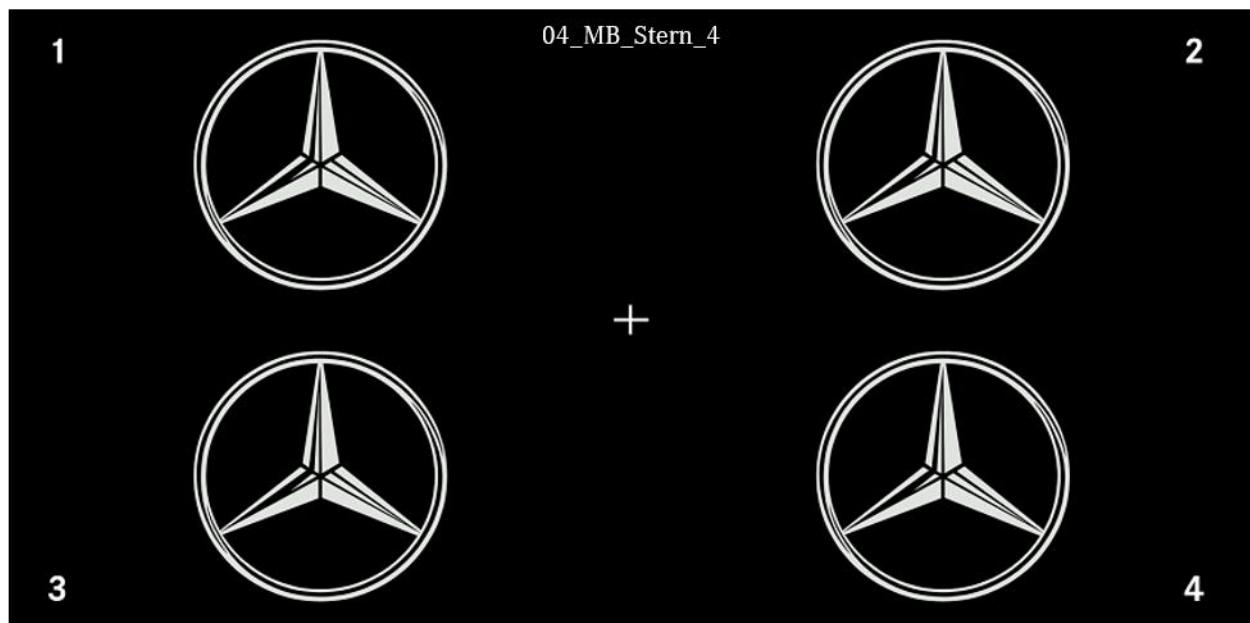
**Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?**



<b>Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.</b>	stimmt nicht					stimmt
	1	2	3	4	5	

Bitte bewegen Sie Ihren Kopf leicht horizontal, während Sie die Darstellung betrachten. Bewerten Sie mit Hilfe der folgenden Aussagen alle wahrnehmbaren Veränderungen.						
11.1	Darstellung 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
11.2	Darstellung 2 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
11.3	Darstellung 3 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
11.4	Darstellung 4 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				

**Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?**



<b>Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.</b>	stimmt nicht					stimmt				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	

Bitte bewegen Sie Ihren Kopf leicht vertikal, während Sie die Darstellung betrachten. Bewerten Sie mit Hilfe der folgenden Aussagen alle wahrnehmbaren Veränderungen.										
12.1	Darstellung 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>								
12.2	Darstellung 2 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>								
12.3	Darstellung 3 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>								
12.4	Darstellung 4 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>								

**Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?**

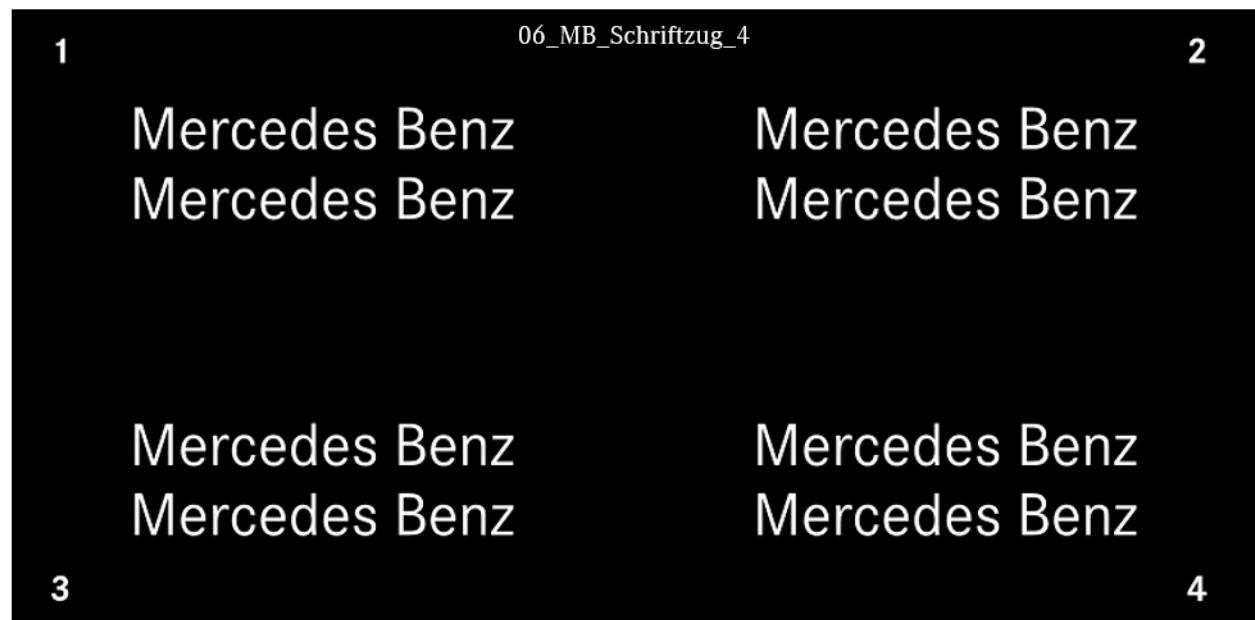
05\_Textmeldung\_Service-A

**Service A demnächst fällig:**  
*Möchten Sie einen Werkstatttermin vereinbaren?*

**Anrufen****Später****Nein Danke**

Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.	stimmt nicht					stimmt				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
13 Der Text ist gut sichtbar und deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>									
14 Der Text ist ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>									
15 Die Buchstaben sind scharf und eindeutig zu erkennen.	<input type="checkbox"/>									
16 Der Text ist angenehm wahrnehmbar.	<input type="checkbox"/>									
17 Die Textposition empfinde ich als angenehm.	<input type="checkbox"/>									

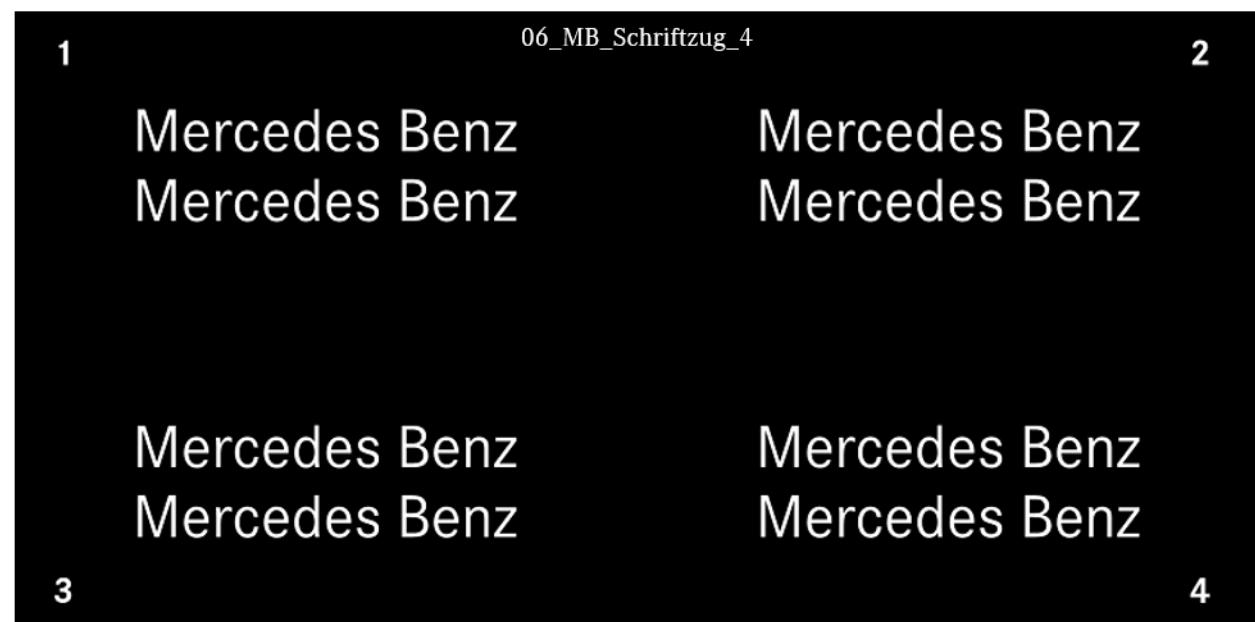
**Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?**



Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.	stimmt nicht					stimmt
	1	2	3	4	5	

<p>Bitte nehmen Sie sich einen Augenblick Zeit und betrachten Sie das Bild genau. Bitte achten Sie auf Unterschiede in Bezug auf die Wahrnehmbarkeit der vier Darstellungen.</p>						
18.1	Schriftzug 1 ist klar und deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
18.2	Schriftzug 2 ist klar und deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
18.3	Schriftzug 3 ist klar und deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
18.4	Schriftzug 4 ist klar und deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				

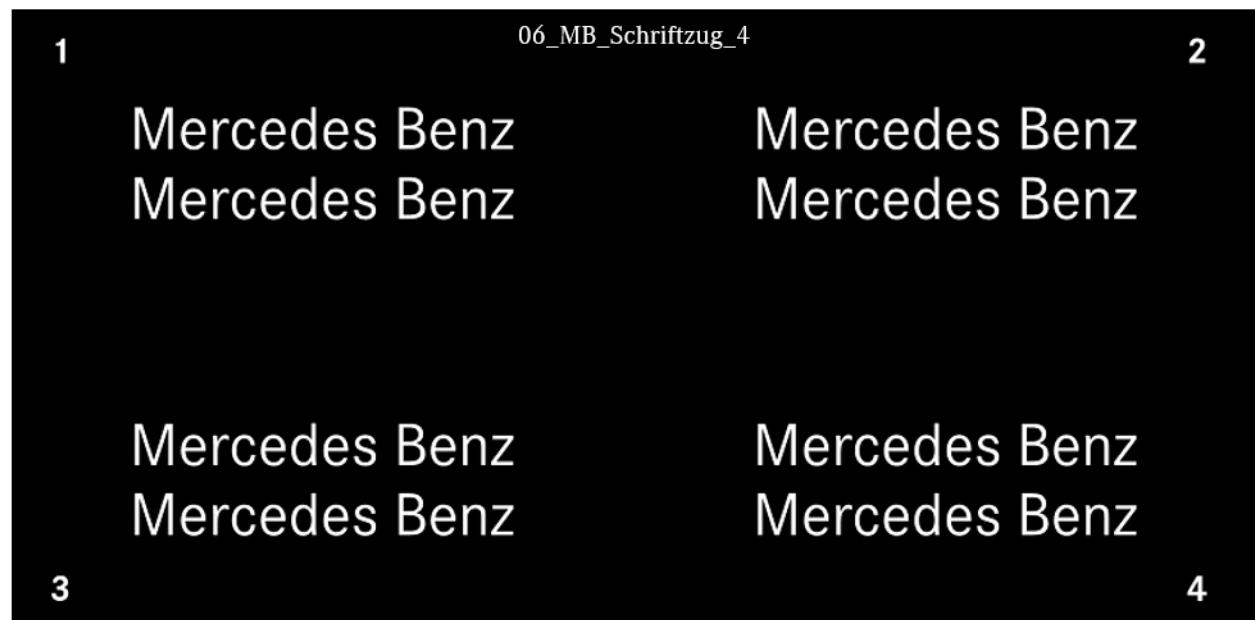
**Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?**



Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.	stimmt nicht					stimmt
	1	2	3	4	5	

<p>Bitte bewegen Sie Ihren Kopf leicht horizontal, während Sie die Darstellung betrachten. Bewerten Sie mit Hilfe der folgenden Aussagen alle wahrnehmbaren Veränderungen.</p>						
19.1	Schriftzug 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
19.2	Schriftzug 2 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
19.3	Schriftzug 3 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
19.4	Schriftzug 4 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				

**Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?**



Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.	stimmt nicht					stimmt
	1	2	3	4	5	

Bitte bewegen Sie Ihren Kopf leicht vertikal, während Sie die Darstellung betrachten. Bewerten Sie mit Hilfe der folgenden Aussagen alle wahrnehmbaren Veränderungen.						
20.1	Schriftzug 1 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
20.2	Schriftzug 2 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
20.3	Schriftzug 3 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				
20.4	Schriftzug 4 ist dabei weiterhin ohne Verzerrung zu erkennen.	<input type="checkbox"/>				

**Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?**

08\_MB\_Schriftzug\_3\_vertikal

Next Generation Head-up Display Mercedes Benz

Next Generation Head-up Display Mercedes Benz

Next Generation Head-up Display Mercedes Benz

<b>Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.</b>	stimmt nicht					stimmt				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
21      Alle 3 Schriftzüge sind gut sichtbar und deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>									
22.1    Der obere Schriftzug ist gut lesbar.	<input type="checkbox"/>									
22.2    Der mittlere Schriftzug ist gut lesbar.	<input type="checkbox"/>									
22.3    Der untere Schriftzug ist gut lesbar.	<input type="checkbox"/>									

**Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?**

**Aktuelle Nachrichten (Sport):**

07\_Textnachricht\_vollflaechig

Lewis Hamilton ist erneut Formel-1-Weltmeister. In Mexiko-Stadt reichte dem Briten beim Sieg von Max Verstappen ein vierter Platz. Hamiltons Konkurrent Sebastian Vettel landete auf Rang zwei. Bei noch zwei ausstehenden Rennen ist Hamilton der Titel nicht mehr zu nehmen. Damit sichert sich der Mercedes-Pilot schon den fünften großen Erfolg in seiner Karriere. Nach dem Rennen war Hamilton...

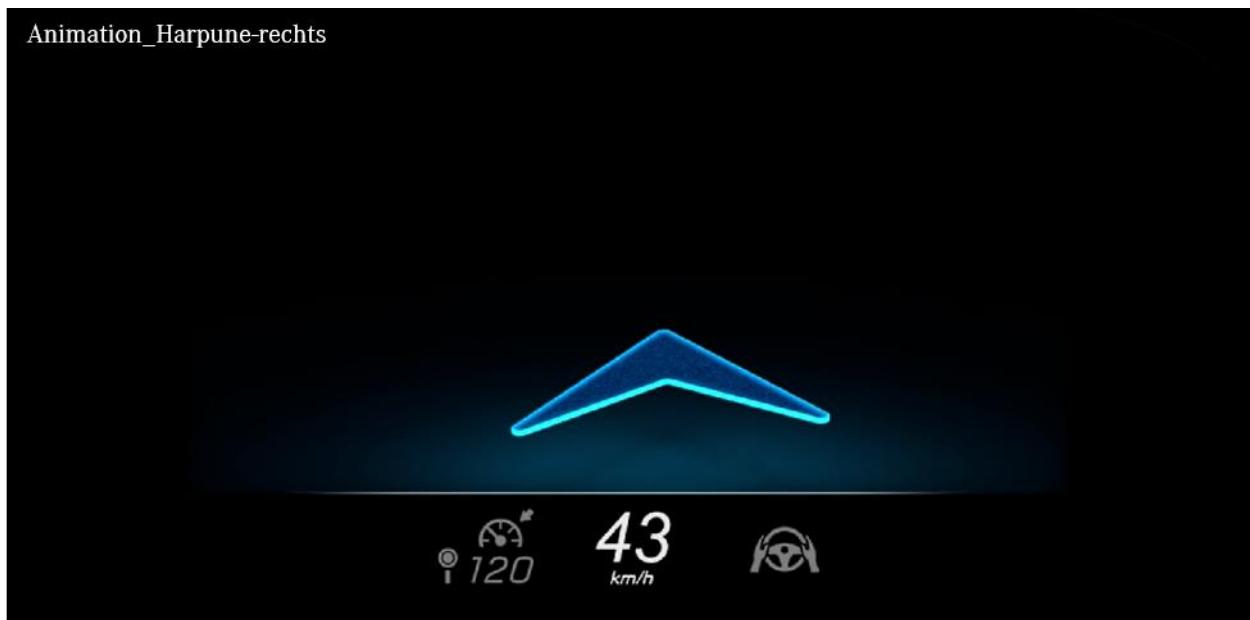
Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.	stimmt nicht					stimmt				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

*Bitte nehmen Sie sich einen Augenblick Zeit um die gezeigte Nachricht zu lesen. Beurteilen Sie anschließend in drei Schritten die Lesbarkeit und die Bildqualität mit Hilfe der Aussagen. Nutzen Sie das Kommentarfeld für konkrete Bemerkungen zur Lesbarkeit der Nachricht.*

23	Die Textnachricht ist gut lesbar.	<input type="checkbox"/>								
24	Das Lesen der Nachricht gelingt ohne Anstrengung.	<input type="checkbox"/>								
25.1	Die oberen Zeilen sind gut zu erkennen.	<input type="checkbox"/>								
25.2	Die mittleren Zeilen sind gut zu erkennen.	<input type="checkbox"/>								
25.3	Die unteren Zeilen sind gut zu erkennen.	<input type="checkbox"/>								

**Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?**

Animation\_Harpune-rechts



**Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.**

**ANIMATION ABSPIELEN!**

stimmt nicht	1	2	3	4	5
-----------------	---	---	---	---	---

26	Die Unterstützung des Abbiegevorgangs durch die Animation empfinde ich als angemessen.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
27	Die Animation ist gut wahrnehmbar.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
28	Die Animation ist angenehmer wahrnehmbar als die bereits gezeigten, statischen Bildinhalte.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

**Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?**

09\_Vielen Dank



Bitte kreuzen Sie an, wie sehr die Aussagen mit Ihrer Wahrnehmung übereinstimmen.		stimmt nicht 1	2	3	4	stimmt 5
29	Die gezeigten Darstellungen waren angenehm wahrnehmbar.	<input type="checkbox"/>				
G	Das AR HuD System hat mich begeistert.	<input type="checkbox"/>				
F	Ich würde ein solches System im Fahrzeug nutzen.	<input type="checkbox"/>				
N	Die Nutzung eines HUD finde ich sinnvoll.	<input type="checkbox"/>				

Haben Sie weitere Anmerkungen, was stört Sie, was finden Sie besonders gut?

### A.3 Statistische Kennzahlen und Grafiken zur Analyse der Störfaktoren in Abschnitt 4.3.2

#### *Antwortvariablen zur Untersuchung der Störfaktoren*

Tabelle 40: Antwortvariablen als Mittelwert je Proband:in inkl. Zuordnung an die Stufe jedes Faktors

Alter in Jahren				Augposition		Geschlecht		Sehhilfe		HUD Erfahrung		
18 - 30	31 - 40	41 - 50	51 - 60	Unten	Oben	Weiblich	Männlich	Ja	Nein	Selten	Häufig	Immer
3,65	3,67	4,24	4,45	3,51	3,65	3,65	4,20	4,24	3,65	4,45	4,55	3,65
3,51	4,24	4,55	4,20	4,59	4,45	4,45	3,51	4,20	4,45	4,24	4,65	4,20
3,29	4,24	4,67	4,49	4,65	4,24	4,24	3,29	4,49	4,55	4,49	3,92	3,51
3,82	3,92	3,08	4,59	3,29	4,20	4,55	4,92	4,59	3,51	4,59	3,45	3,67
4,35	3,45	4,14	4,65	4,92	4,55	4,49	4,78	4,65	3,67	4,24	4,37	3,29
4,65	3,47	4,20	4,92	4,41	4,49	4,59	4,59	4,24	4,90	4,41	4,65	4,92
4,27	4,14	4,43	4,41	4,78	3,67	3,67	4,55	3,29	3,08	4,78	4,57	4,67
4,80	4,33	4,71	4,78	3,82	4,24	4,65	3,08	4,92	4,24	4,35	4,06	3,82
4,37	4,06	4,22	4,90	4,59	4,67	4,24	4,24	4,67	4,35	4,14	4,73	4,90
4,57	4,96	4,00	4,59	4,55	4,90	4,67	4,76	4,41	4,27	4,24	4,96	4,59
3,96	3,80	4,69	4,55	3,08	4,35	4,41	4,65	4,78	3,92	4,67		4,55
3,86			4,76	4,24	4,24	3,82	4,27	3,82	3,45	4,59		3,08
				4,24	4,76	3,47	4,90	3,92	4,59	4,24	4,20	4,24
				4,67	4,65	4,59	4,35	4,67	4,55	3,47	4,20	4,76
				4,59	4,27	4,43	3,45	4,80	4,76	4,14	4,00	4,65
				4,20	3,92	4,57	4,14	4,37	4,65	4,43	4,69	4,27
				4,65	3,45	4,22	4,24	4,59	4,14	4,57	4,76	4,80
				4,76	4,14	4,76	3,47	4,65	4,67	4,71	4,65	3,47
				4,73	4,67	4,06	4,20	4,22	4,80	4,00		4,14
				4,65	4,80	4,73	4,14	4,33	4,37	4,06		4,43
					4,37	3,80	4,20	4,73	4,59	3,96		4,71
4,00						4,20	4,43	3,96	4,20	4,96		4,22
						4,14	4,57	4,96	4,65	3,86		4,33
						4,65	4,71		4,20			3,96
						4,20	4,00		4,22			3,80
						4,71	4,69		4,69			3,86
						4,00	4,76		4,76			
						4,69	4,06		4,33			
						4,33	4,65		4,73			
						4,65	3,80		4,65			
						3,96	3,86		3,80			
4,96												
3,86												

## *Prüfung auf Normalverteilung der Störfaktoren anhand des Anderson-Darling-Tests und Wahrscheinlichkeitsnetzen*

Folgend sind die Prüfungen der einzelnen Stufen der verschiedenen Störfaktoren auf Normalverteilungen aufgelistet.

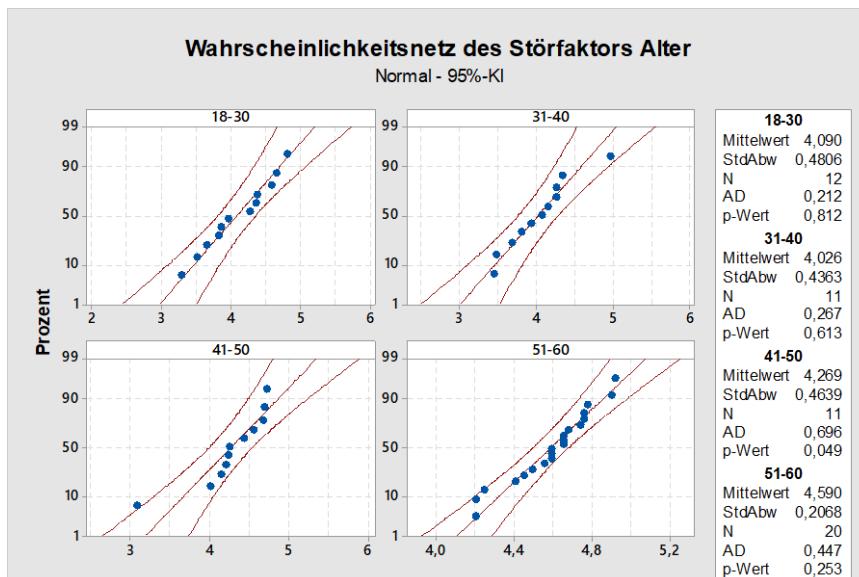


Abb. A - 2: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für den Störfaktor *Alter*

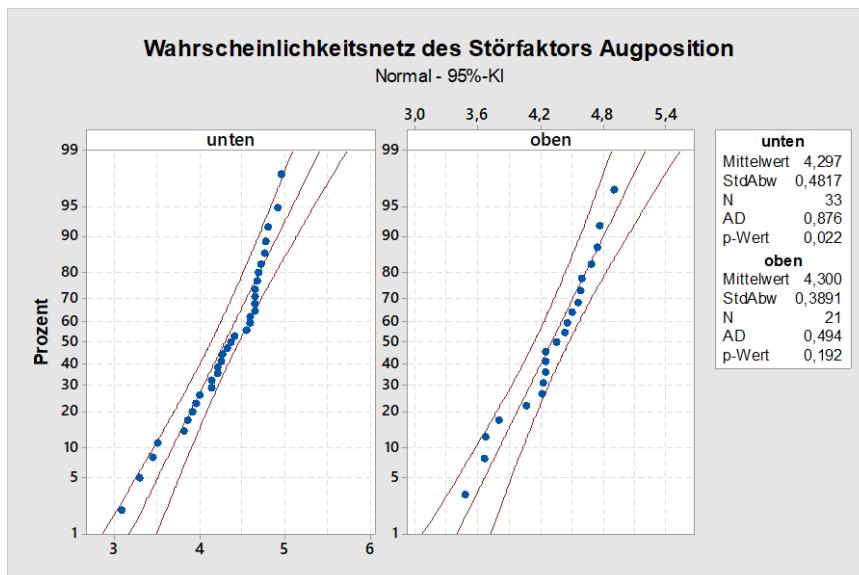


Abb. A - 3: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für den Störfaktor *Augposition*

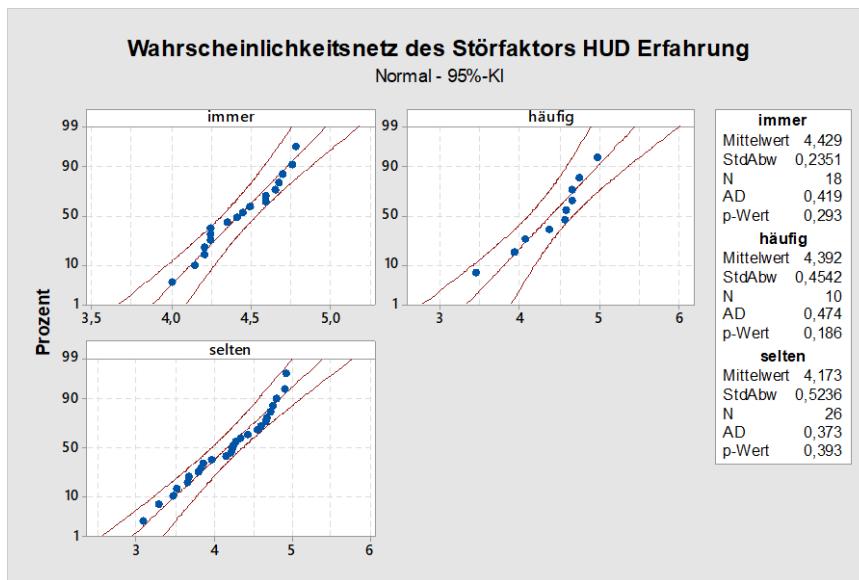


Abb. A - 4: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für den Störfaktor *HUD Erfahrung*

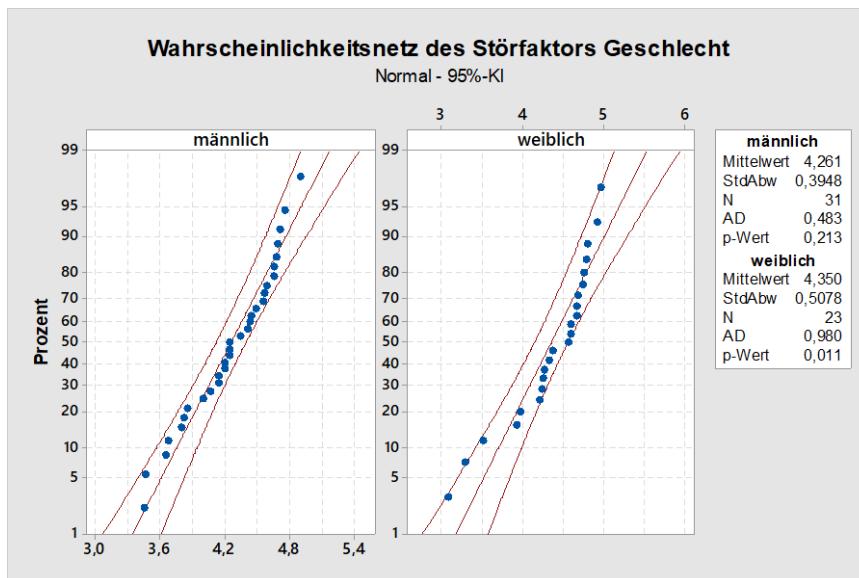


Abb. A - 5: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für den Störfaktor *Geschlecht*

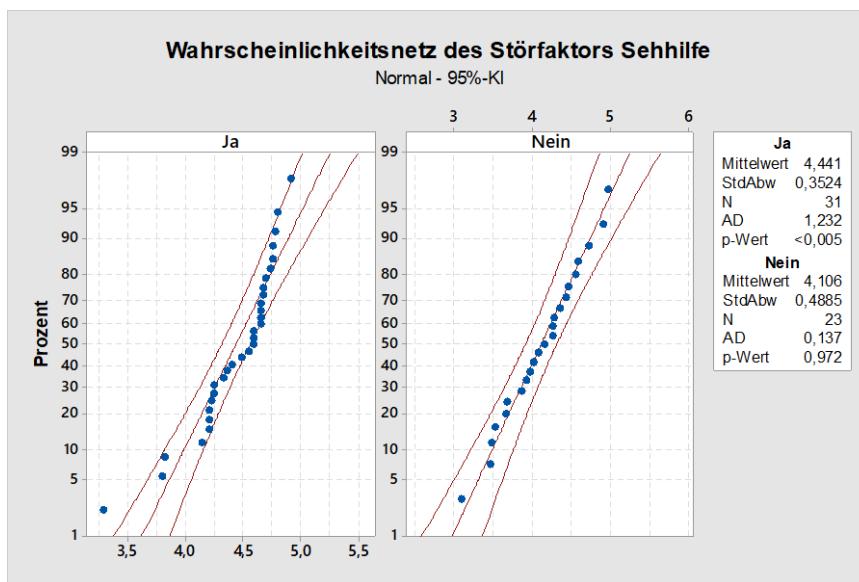


Abb. A - 6: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für den Störfaktor *Sehhilfe*

### Test auf gleiche Varianzen für die Stufen der Störfaktoren

In Tabelle 41 und Tabelle 42 sowie Abb. A - 7 sind die Ergebnisse des Tests auf gleiche Varianzen für die Stufen des Störfaktors *Alter* abgetragen.

Tabelle 41: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen der Stufen des Störfaktors *Alter*

Stichprobe	N	StdAbw	KI
18-30	12	0,480624	(0,327076; 0,89190)
31-40	11	0,436285	(0,225826; 1,09050)
41-50	11	0,463927	(0,157610; 1,76674)
51-60	20	0,206845	(0,141489; 0,34554)

Individuelles Konfidenzniveau = 98,75%

Tabelle 42: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen der Stufen des Störfaktors *Alter*

Methode	Teststatistik	p-Wert
Mehrfachvergleiche	—	0,020
Levene	3,33	0,027

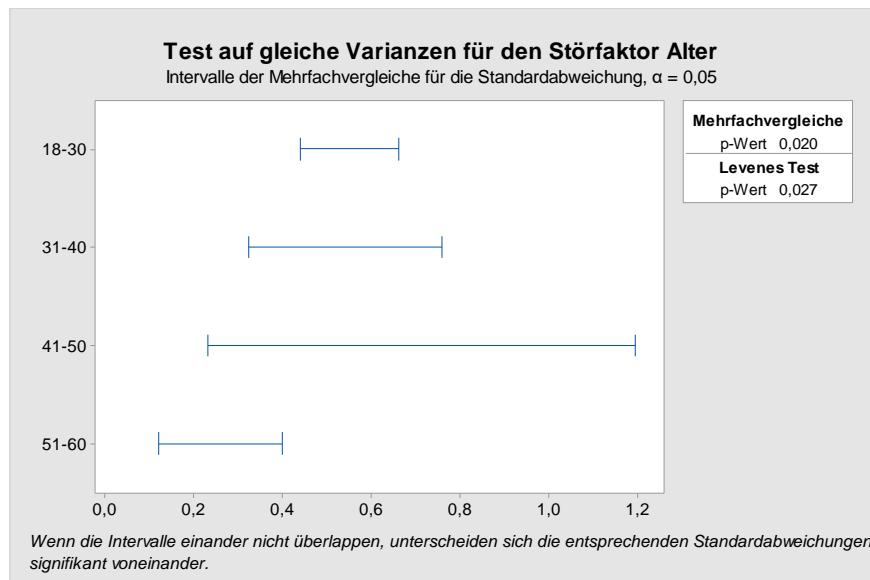


Abb. A - 8: Test auf gleiche Varianzen für den Störfaktor Alter

Mit Ausnahme des Störfaktors *HUD Erfahrung*, sind für alle weiteren Störfaktoren die Varianzen der jeweiligen Stufen identisch. Folgend finden sich jeweils die Ergebnisse der unterschiedlichen Störfaktoren.

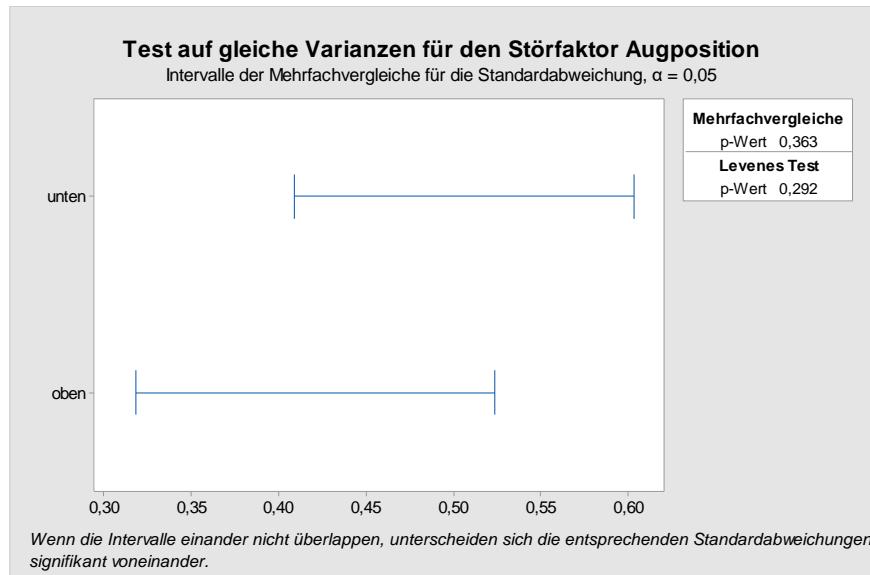
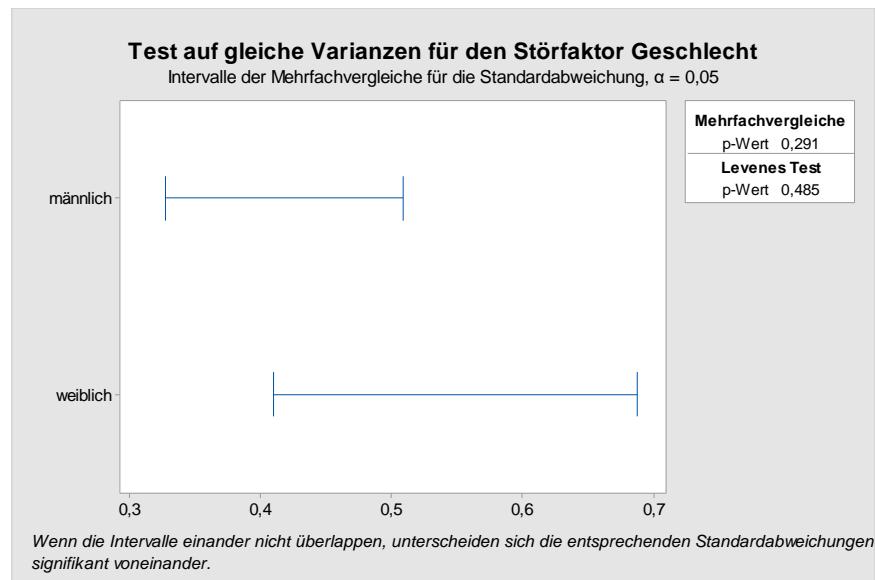
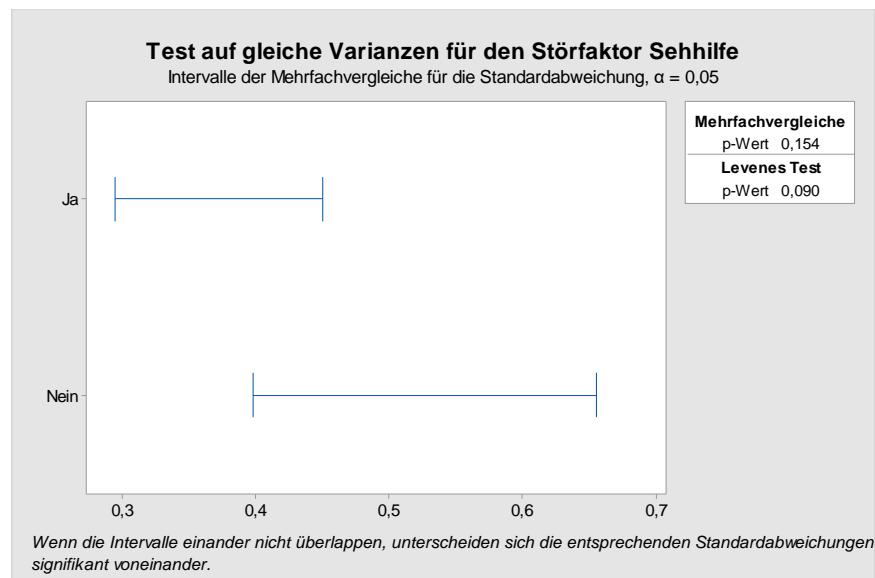
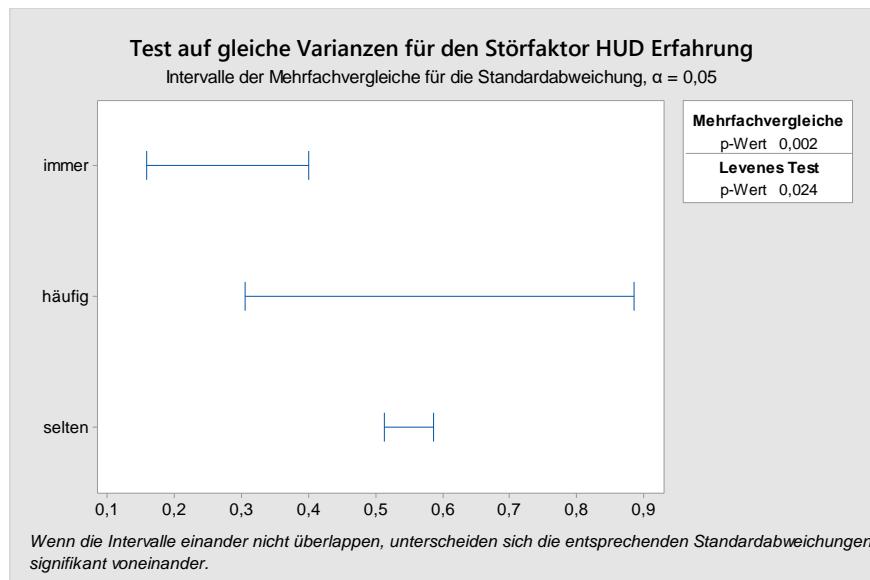


Abb. A - 9: Test auf gleiche Varianzen für den Störfaktor Augposition

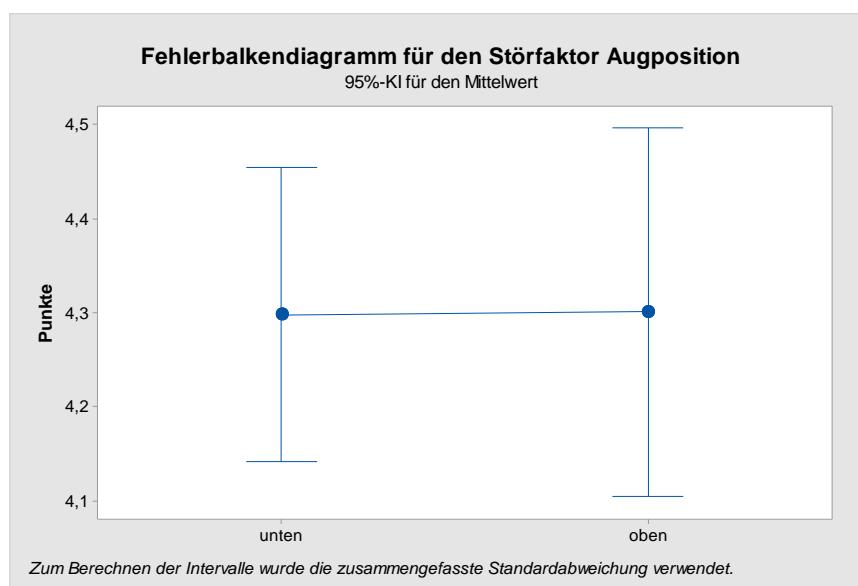
Abb. A - 10: Test auf gleiche Varianzen für den Störfaktor *Geschlecht*Abb. A - 11: Test auf gleiche Varianzen für den Störfaktor *Sehhilfe*

Abb. A - 12: Test auf gleiche Varianzen für den Störfaktor *HUD Erfahrung****ANOVA der Störfaktoren zur Untersuchung von Mittelwertunterschieden***

Im Folgenden sind die weiteren Ergebnisse aus Abschnitt 4.3.2 der einfaktoriellen Varianzanalyse für die Störfaktoren dokumentiert. Ausschließlich die Störfaktoren *Alter* und *Sehhilfe* weisen einen statistisch signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable auf.

**Tabelle 43: Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor *Augposition***

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
unten	33	4,2975	0,4817	(4,1408; 4,4541)	Faktor	1	0,00	0,982
oben	21	4,3003	0,3891	(4,1040; 4,4966)	Fehler	52		
					Gesamt	53		

Abb. A - 13: Fehlerbalkendiagramm für die Stufen des Störfaktors *Augposition*

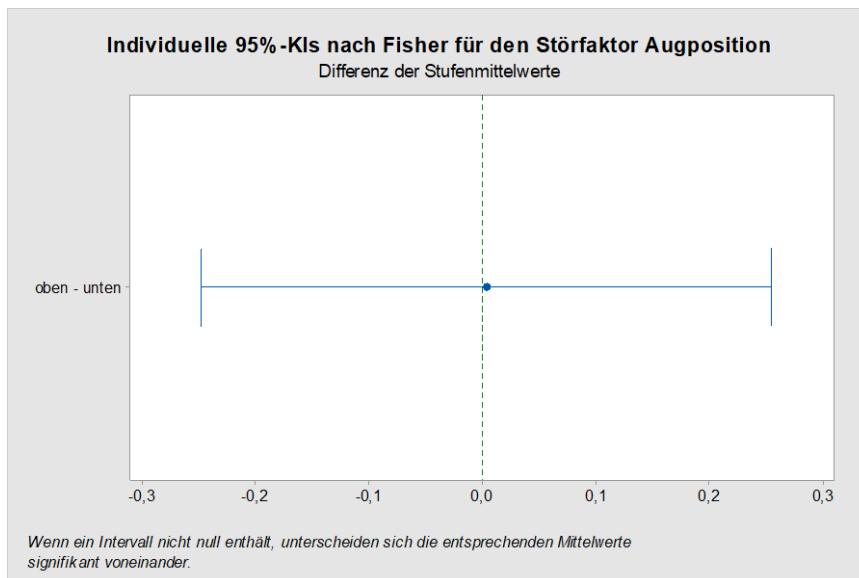


Abb. A - 14: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fischer für die Stufen des Störfaktors Augposition

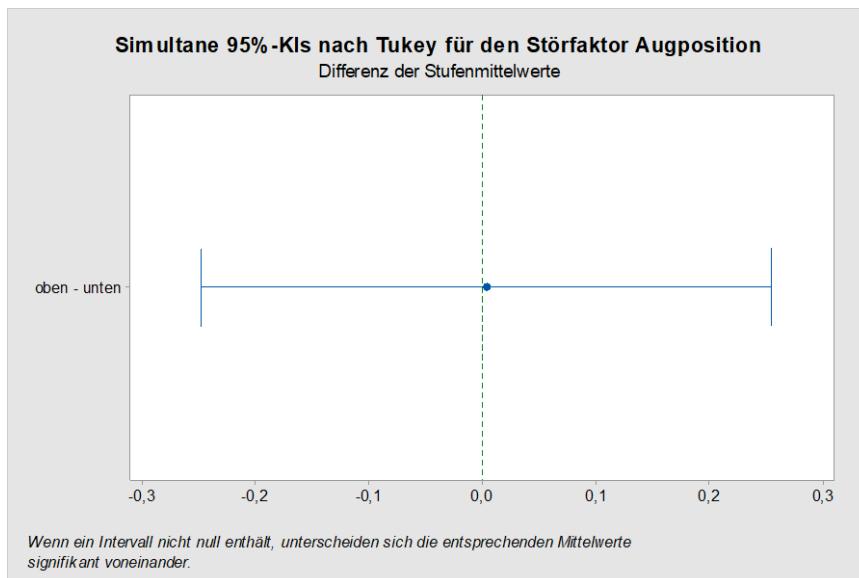


Abb. A - 15: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des simultanen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey für die Stufen des Störfaktors Augposition

Tabelle 44: Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor Geschlecht

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
männlich	31	4,2607	0,3948	(4,0999; 4,4215)	Faktor	1	0,52	0,472
weiblich	23	4,350	0,508	(4,163; 4,536)	Fehler	52		
					Gesamt	53		

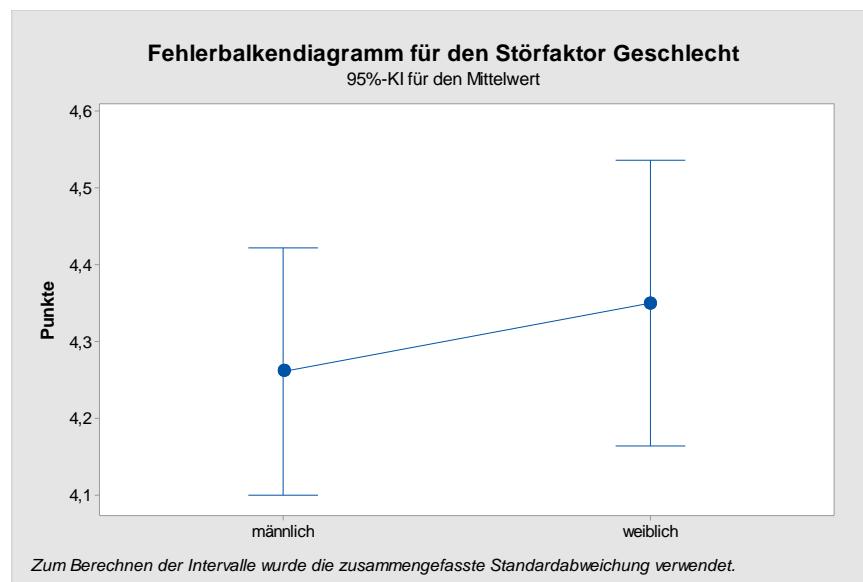


Abb. A - 16: Fehlerbalkendiagramm für die Stufen des Störfaktors *Geschlecht*

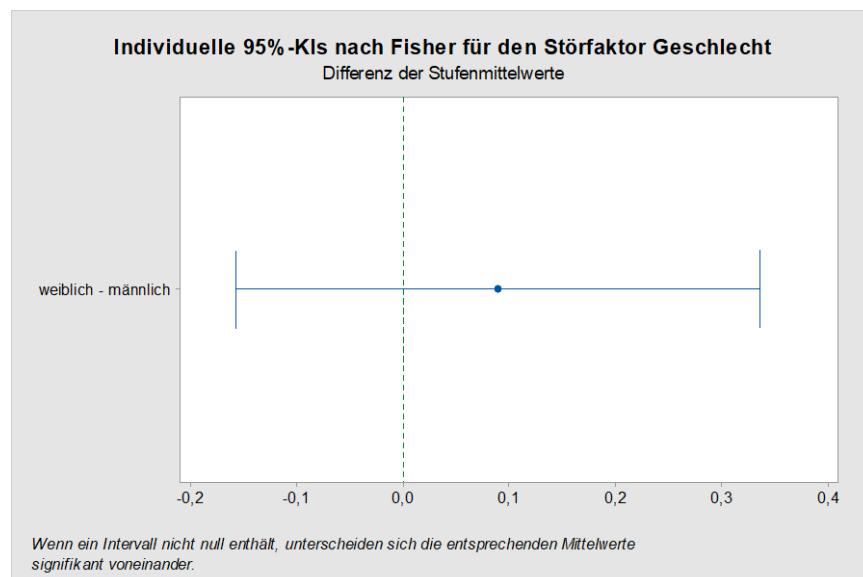
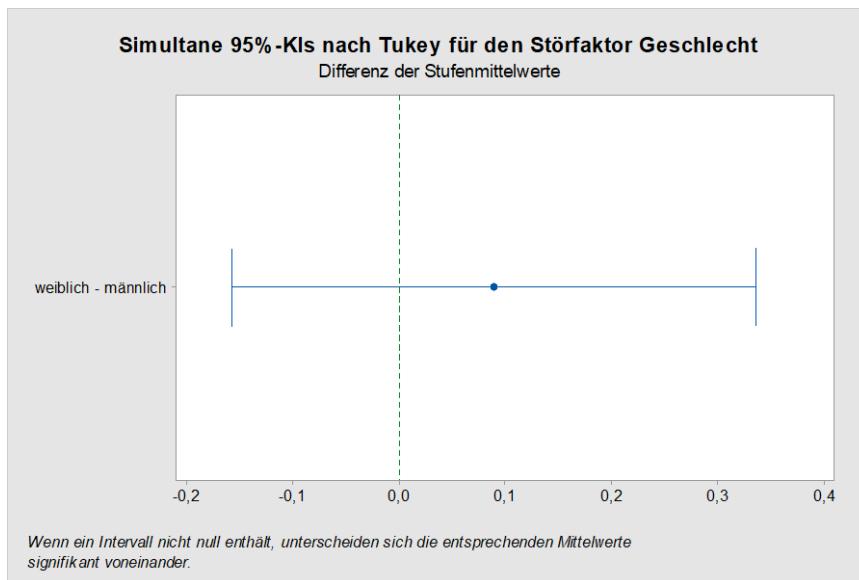


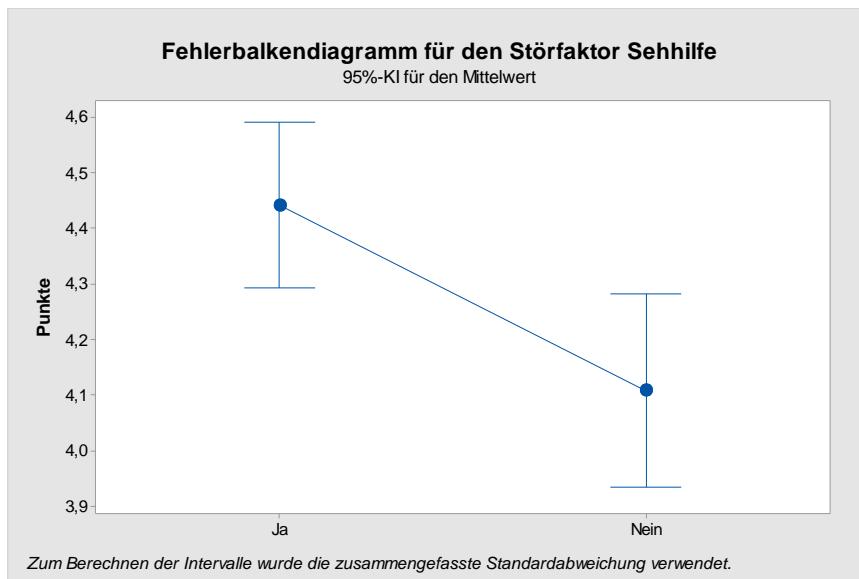
Abb. A - 17: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fischer für die Stufen des Störfaktors *Geschlecht*



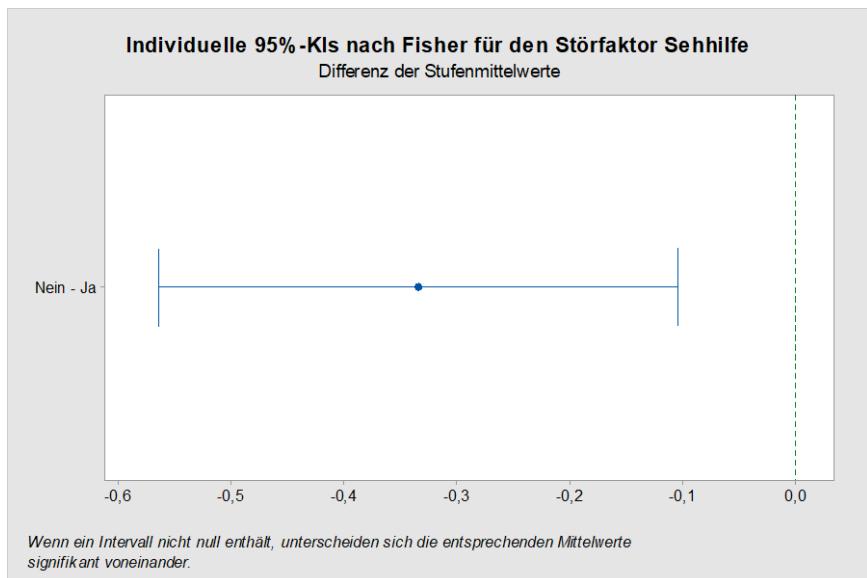
**Abb. A - 18: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey für die Stufen des Störfaktors *Geschlecht***

**Tabelle 45: Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor *Sehhilfe***

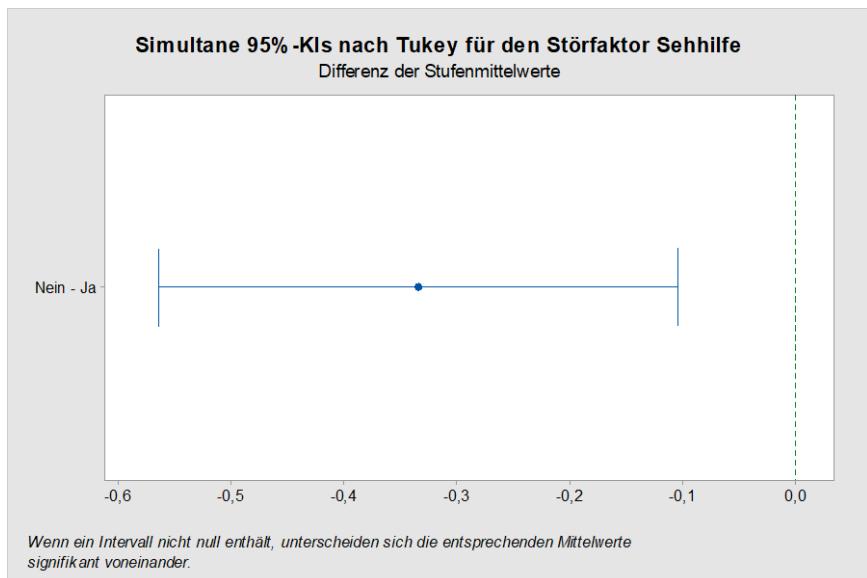
Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
Ja	31	4,4411	0,3524	(4,2913; 4,5908)	Faktor	1	8,56	0,005
Nein	23	4,106	0,489	(3,933; 4,280)	Fehler	52		
					Gesamt	53		



**Abb. A - 19: Fehlerbalkendiagramm für die Stufen des Störfaktors *Sehhilfe***



**Abb. A - 20: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fisher für die Stufen des Störfaktors *Sehhilfe***



**Abb. A - 21: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey für die Stufen des Störfaktors *Sehhilfe***

**Tabelle 46: Ergebnisse der ANOVA für den Störfaktor *HUD Erfahrung***

Faktor	N	Mittelwert	StdAbw	95%-KI	Quelle	DF	F-Wert	p-Wert
immer	18	4,4286	0,2351	(4,2227; 4,6344)	Faktor	2	0,8032	0,4016
häufig	10	4,392	0,454	(4,116; 4,668)	Fehler	51	9,6510	0,1892
selten	26	4,173	0,524	(4,001; 4,344)	Gesamt	53	10,4542	

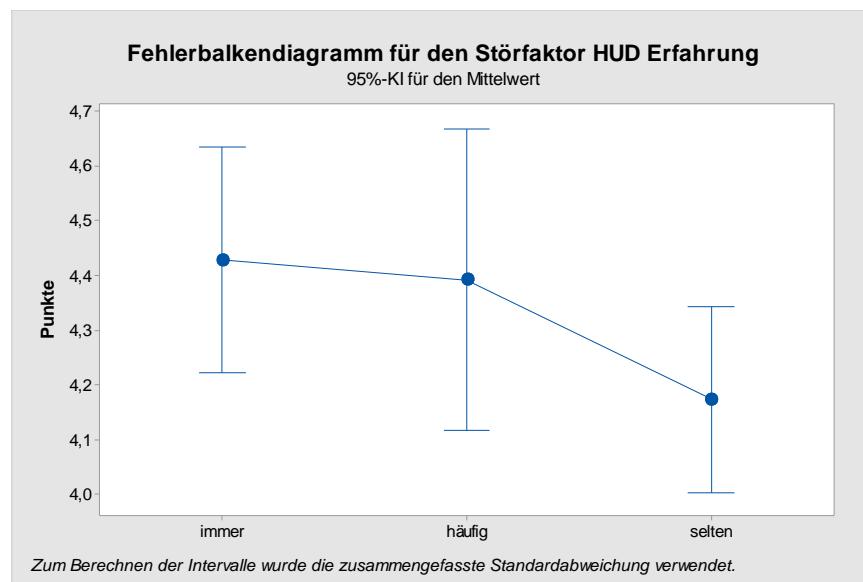


Abb. A - 22: Fehlerbalkendiagramm für die Stufen des Störfaktors *HUD Erfahrung*

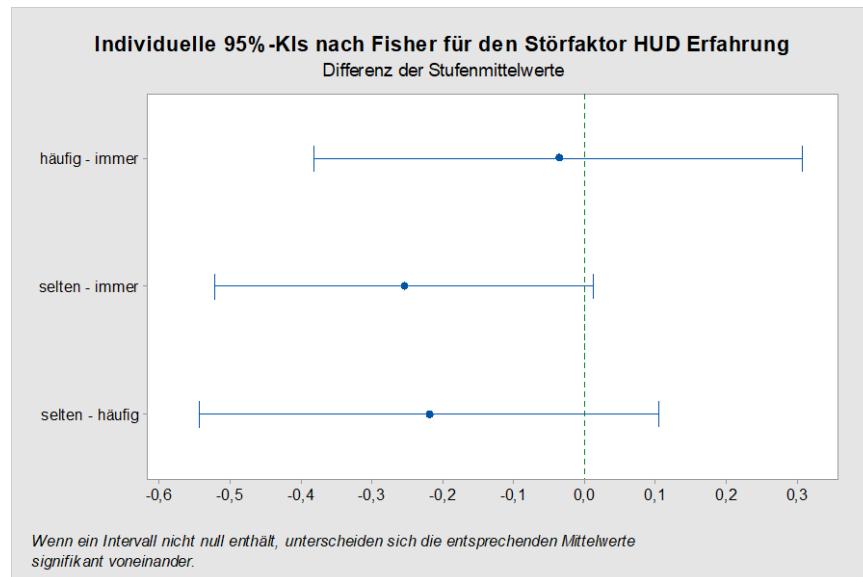
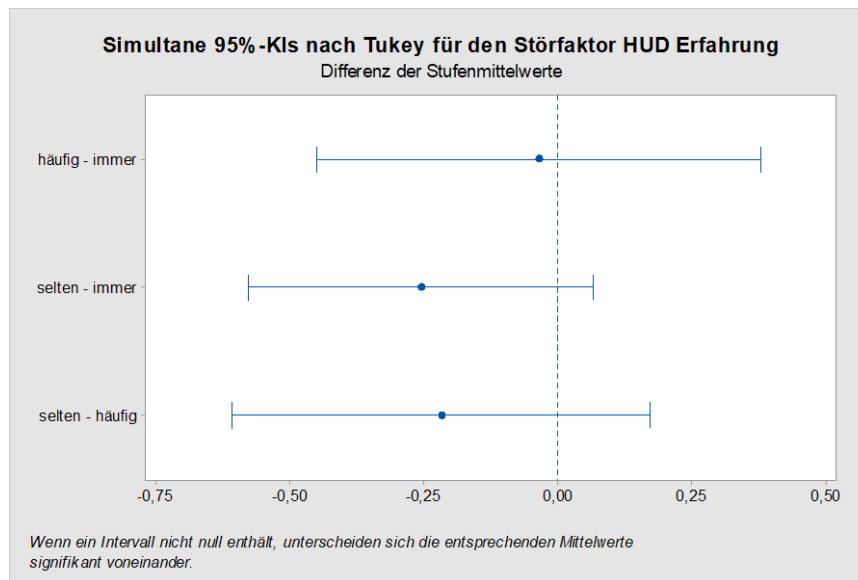


Abb. A - 23: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fisher für die Stufen des Störfaktors *HUD Erfahrung*



**Abb. A - 24: Differenzbalken der Stufenmittelwerte des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey für die Stufen des Störfaktors *HUD Erfahrung***

## A.4 Statistische Kennzahlen und Grafiken zur Analyse der subjektiven Bewertung unterschiedlicher Windschutzscheiben

### Untersuchung von Hypothese H1

#### Antwortvariablen zur Untersuchung der unabhängige Variable von Hypothese 1

**Tabelle 47:** Antwortvariablen als Mittelwert je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C

Proband #	WSS A	Proband #	WSS B	Proband #	WSS C
1	4,59	19	4,14	37	3,65
2	4,55	20	4,65	38	4,45
3	3,08	21	4,20	39	4,24
4	4,24	22	4,43	40	4,20
5	4,76	23	4,57	41	4,55
6	4,35	24	4,71	42	3,51
7	4,65	25	4,22	43	4,49
8	4,27	26	4,00	44	4,59
9	3,92	27	4,69	45	3,67
10	3,45	28	4,76	46	4,65
11	4,14	29	4,33	47	4,24
12	4,24	30	4,06	48	3,29
13	4,67	31	4,73	49	4,92
14	4,80	32	4,65	50	4,67
15	3,47	33	3,96	51	4,41
16	4,37	34	4,96	52	4,78

17	4,59	35	3,80	53	3,82
18	4,20	36	3,86	54	4,90

**Prüfung auf Normalverteilung der unabhängigen Variable anhand des Anderson-Darling-Tests und Wahrscheinlichkeitsnetzen für Hypothese 1**

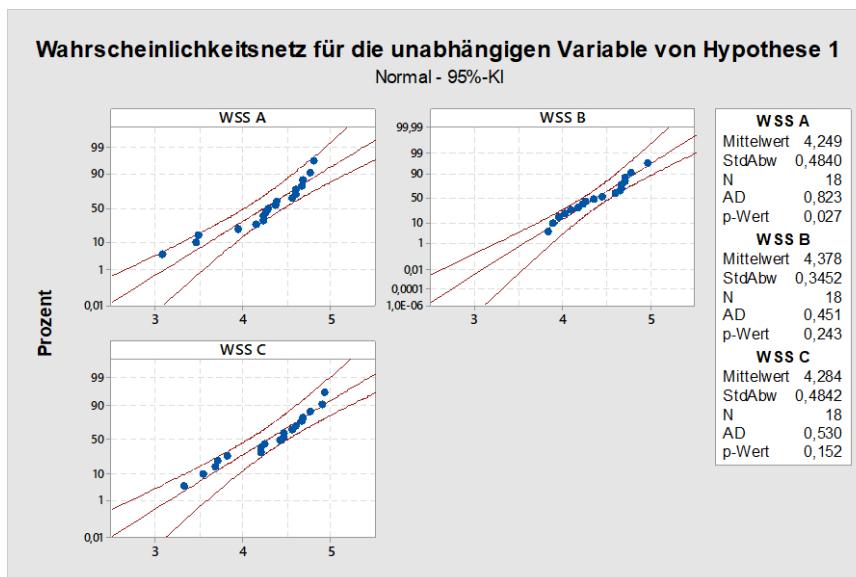


Abb. A - 25: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für die Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C

**Test auf gleiche Varianzen für die unabhängige Variable von Hypothese 1**

Tabelle 48: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C

Stichprobe	N	StdAbw	KI
WSS A	18	0,484014	(0,282671; 0,955903)
WSS B	18	0,345178	(0,267997; 0,512785)
WSS C	18	0,484176	(0,343504; 0,787145)

Individuelles Konfidenzniveau = 98,33%

Tabelle 49: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C

Methode	Teststatistik	p-Wert
Mehrfachvergleiche	—	0,274
Levene	0,39	0,679

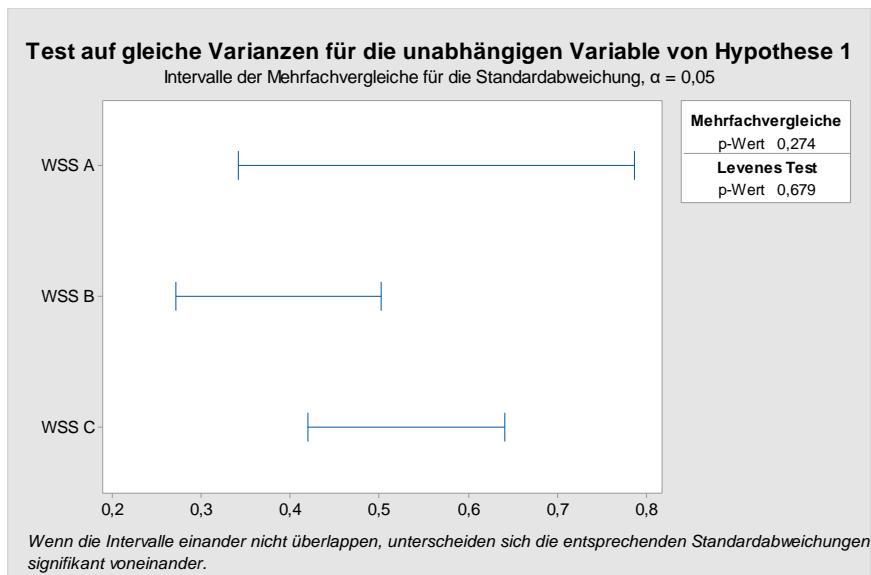


Abb. A - 26: Test auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C

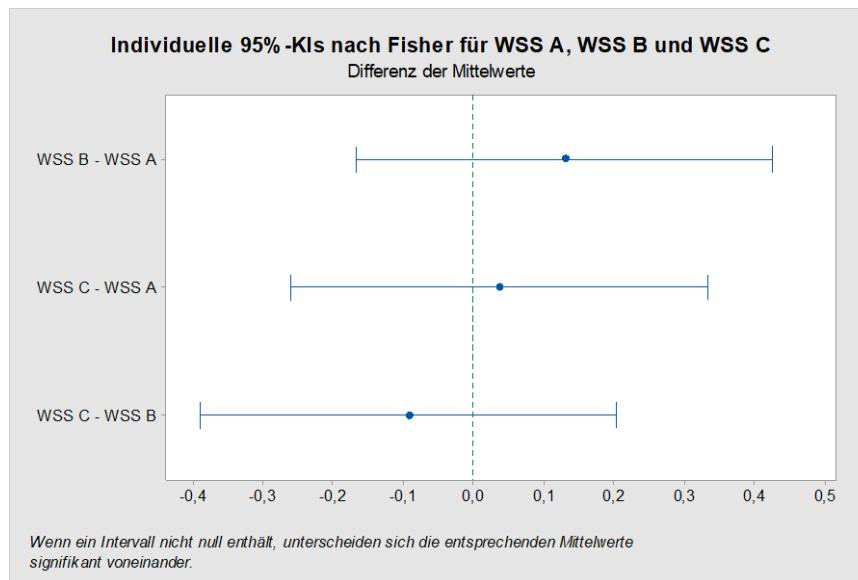
### ***ANOVA der unabhängigen Variable für Hypothese 1***

Im Folgenden ist das individuell ermittelte Konfidenzintervalle nach Fisher bzw. simultan ermittelte Konfidenzintervalle nach Tukey dokumentiert und dargestellt. Auch hier sind keine signifikanten Mittelwertunterschiede in den Bewertungen der unterschiedlichen WSS durch die Probanden feststellbar. Sie bestätigen damit die Annahme aus Abschnitt 4.3.1. Hypothese *H1* bleibt damit bestehen.

**Tabelle 50: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
WSS B - WSS A	0,129	0,148	(-0,167; 0,425)	0,87	0,386
WSS C - WSS A	0,036	0,148	(-0,261; 0,332)	0,24	0,811
WSS C - WSS B	-0,093	0,148	(-0,390; 0,203)	-0,63	0,530

Simultanes Konfidenzniveau = 87,93%

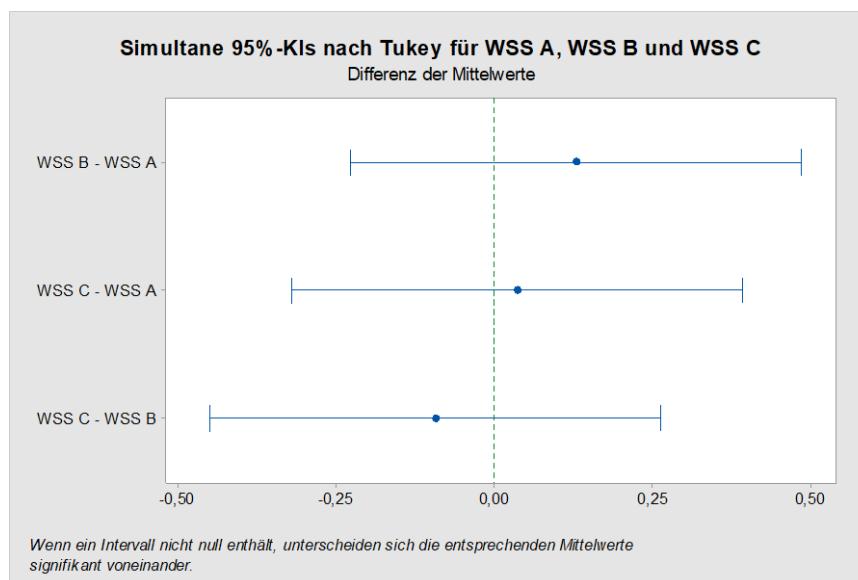


**Abb. A - 27:** Differenzbalken für Hypothese 1 der unabhängigen Variable mit den Stufen WSS A, WSS B und WSS C des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fischer

**Tabelle 51:** Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: WSS A, WSS B und WSS C

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
WSS B - WSS A	0,129	0,148	(-0,227; 0,485)	0,87	0,659
WSS C - WSS A	0,036	0,148	(-0,320; 0,391)	0,24	0,969
WSS C - WSS B	-0,093	0,148	(-0,449; 0,262)	-0,63	0,803

Individuelles Konfidenzniveau = 98,05%



**Abb. A - 28:** Differenzbalken für Hypothese 1 der unabhängigen Variablen mit den Stufen WSS A, WSS B und WSS C des simultanen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey

## Untersuchung von Hypothese H3

### Antwortvariablen zur Untersuchung der unabhängigen Variable von Hypothese 3

Tabelle 52: Antwortvariablen als Mittelwert je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4 sowie der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3

Proband #	Q1	Q2	Q3	Q4	Z1	Z2	Z3
19	4,00	5,00	4,00	5,00	4,50	5,00	4,50
20	3,50	5,00	5,00	5,00	4,50	5,00	5,00
21	1,00	2,00	2,00	3,00	2,00	3,50	2,50
22	5,00	5,00	4,50	4,50	5,00	5,00	4,50
23	5,00	5,00	4,50	5,00	5,00	4,00	4,50
24	4,00	5,00	4,00	5,00	4,00	4,00	5,00
25	5,00	5,00	4,50	4,50	4,50	5,00	4,00
26	5,00	4,50	4,50	4,50	3,50	5,00	4,00
27	3,50	3,50	3,00	3,00	2,50	4,50	4,00
28	1,00	2,00	2,50	3,50	2,50	3,50	4,00
29	3,00	4,00	4,00	5,00	3,00	5,00	3,50
30	2,50	3,00	4,50	4,50	4,00	5,00	4,00
31	4,50	4,50	4,50	5,00	4,00	4,00	4,50
32	4,50	5,00	4,00	5,00	4,00	5,00	4,50
33	3,50	4,00	2,00	3,50	4,00	3,50	3,50
34	3,50	5,00	4,00	5,00	3,50	5,00	4,50
35	4,00	4,50	4,50	4,00	4,50	5,00	5,00
36	2,50	4,00	5,00	3,00	3,50	5,00	5,00

**Prüfung auf Normalverteilung der unabhängigen Variable anhand des Anderson-Darling-Tests und Wahrscheinlichkeitsnetzen für Hypothese 3 anhand der Quadrantenbefragung**

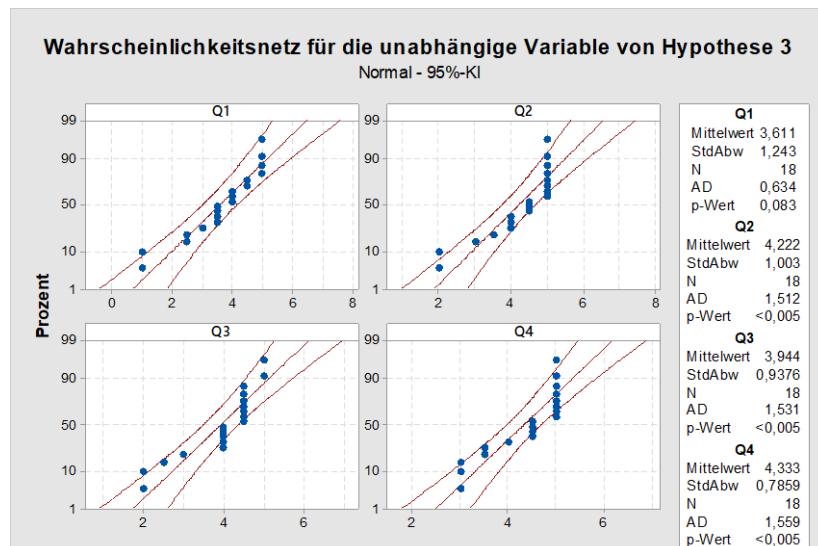


Abb. A - 29: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für die Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4

### **Test auf gleiche Varianzen für die unabhängige Variable von Hypothese 3 anhand der Quadrantenbefragung**

Tabelle 53: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4

Stichprobe	N	StdAbw	KI
Q1	18	1,24328	(0,750960; 2,39001)
Q2	18	1,00326	(0,534545; 2,18636)
Q3	18	0,93760	(0,543108; 1,87941)
Q4	18	0,78591	(0,531446; 1,34945)

Individuelles Konfidenzniveau = 98,75%

Tabelle 54: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4

Methode	Teststatistik	p-Wert
Mehrfachvergleiche	—	0,419
Levene	0,80	0,497

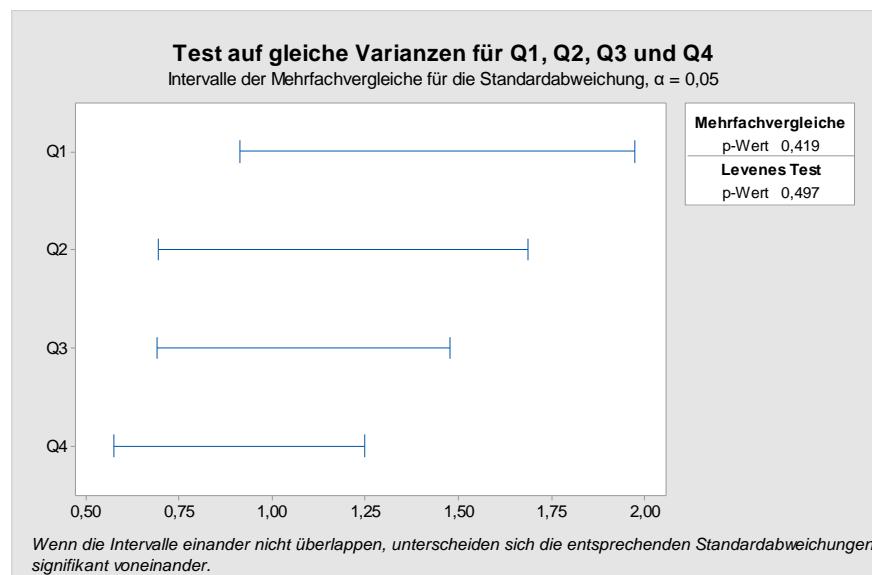


Abb. A - 30: Test auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4

### **ANOVA der unabhängigen Variable für Hypothese 3 anhand der Quadrantenbefragung**

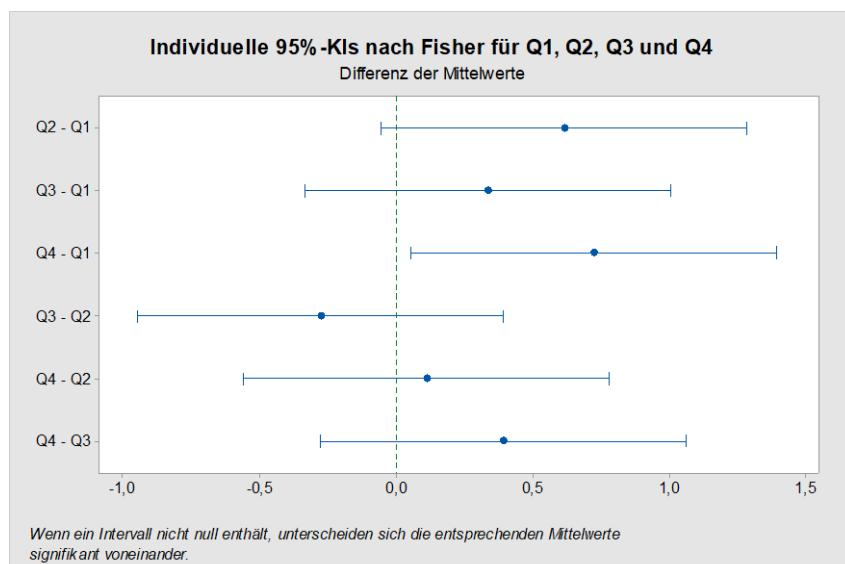
Im Folgenden ist das individuell ermittelte Konfidenzintervalle nach Fisher bzw. simultan ermittelte Konfidenzintervalle nach Tukey dokumentiert und dargestellt. Wider Erwarten sind auch hier kaum signifikante Mittelwertunterschiede in den Bewertungen der unterschiedlichen

Bildbereiche Q1 bis Q4 für WSS A durch die Probanden feststellbar. Ausschließlich zwischen den Mittelwerten von Q1 und Q4 lässt sich ein signifikanter Mittelwertsunterschied nach Fischer feststellen. Außerdem ist im Differenzbalkendiagramm nach Fischer (Abb. A - 31) ein annähernd signifikanter Mittelwertsunterschied zwischen Q1 und Q2 zu erkennen. Die statistische Auswertung der unterschiedlichen Bildbereiche passt damit nicht zu der Annahme aus Abschnitt 4.3.1 überein. Hypothese  $H_3$  bleibt damit für die Quadrantenbefragung bestehen.

**Tabelle 55: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
Q2 - Q1	0,611	0,335	(-0,058; 1,280)	1,82	0,073
Q3 - Q1	0,333	0,335	(-0,336; 1,003)	0,99	0,324
Q4 - Q1	0,722	0,335	(0,053; 1,391)	2,15	0,035
Q3 - Q2	-0,278	0,335	(-0,947; 0,391)	-0,83	0,410
Q4 - Q2	0,111	0,335	(-0,558; 0,780)	0,33	0,741
Q4 - Q3	0,389	0,335	(-0,280; 1,058)	1,16	0,250

Simultanes Konfidenzniveau = 80,02%



**Abb. A - 32: Differenzbalken für Hypothese 3 anhand der Quadrantenbefragung der unabhängigen Variable mit den Stufen Q1, Q2, Q3 und Q4 des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fischer**

**Tabelle 56: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable der Quadrantenbefragung Q1, Q2, Q3 und Q4**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
Q2 - Q1	0,611	0,335	(-0,271; 1,493)	1,82	0,272
Q3 - Q1	0,333	0,335	(-0,549; 1,216)	0,99	0,753

Q4 - Q1	0,722	0,335	(-0,160; 1,604)	2,15	0,147
Q3 - Q2	-0,278	0,335	(-1,160; 0,604)	-0,83	0,841
Q4 - Q2	0,111	0,335	(-0,771; 0,993)	0,33	0,987
Q4 - Q3	0,389	0,335	(-0,493; 1,271)	1,16	0,654

Individuelles Konfidenzniveau = 98,95%

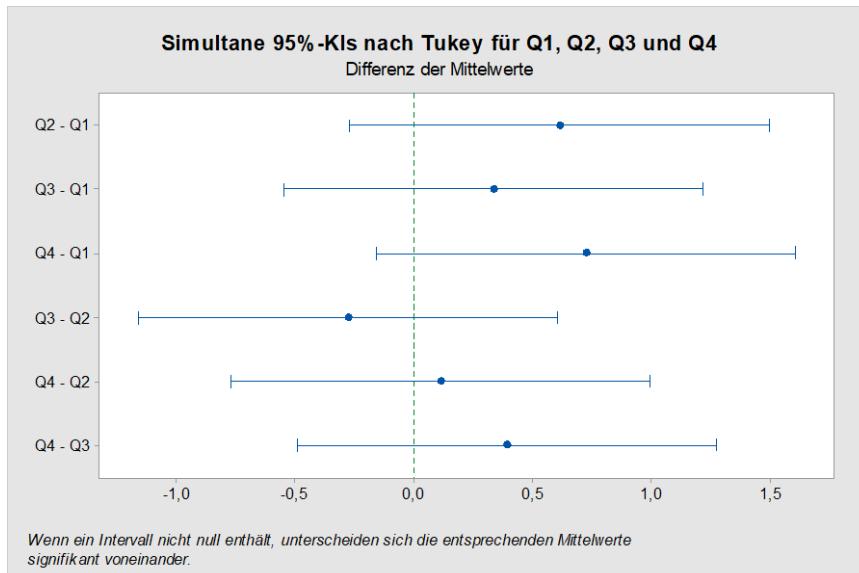


Abb. A - 33: Differenzbalken für Hypothese 3 anhand der Quadrantenbefragung der unabhängigen Variable mit den Stufen Q1, Q2, Q3 und Q4 des simultanen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey

**Prüfung auf Normalverteilung der unabhängigen Variable anhand des Anderson-Darling-Tests und Wahrscheinlichkeitsnetzen für Hypothese 3 anhand der Zeilenbefragung**

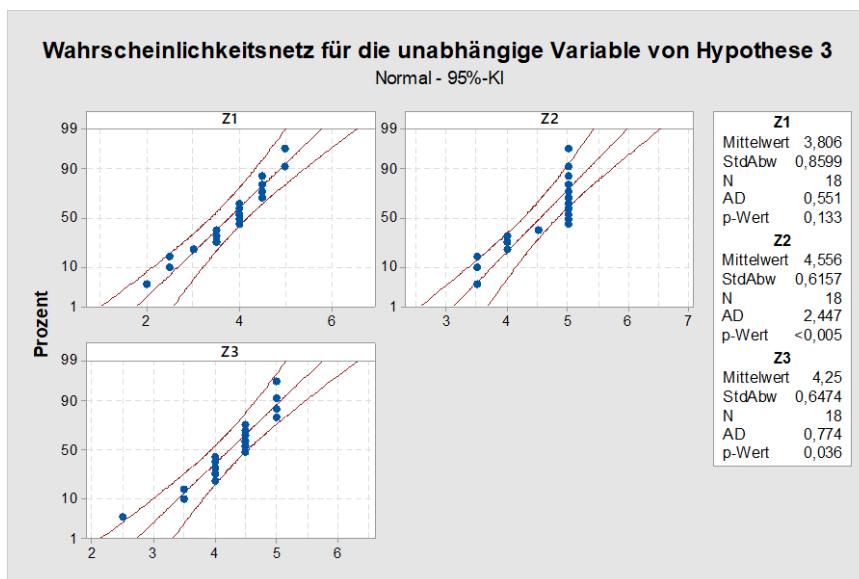


Abb. A - 34: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für die Stufen der unabhängigen Variable der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3

**Test auf gleiche Varianzen für die unabhängige Variable von Hypothese 3 anhand der Zeilenbefragung**

Tabelle 57: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3

Stichprobe	N	StdAbw	KI
Z1	18	0,859872	(0,581077; 1,46762)
Z2	18	0,615699	(0,417053; 1,04840)
Z3	18	0,647393	(0,363482; 1,32994)

Individuelles Konfidenzniveau = 98,3333%

Tabelle 58: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3

Methode	Teststatistik	p-Wert
Mehrfachvergleiche	—	0,387
Levene	0,61	0,546

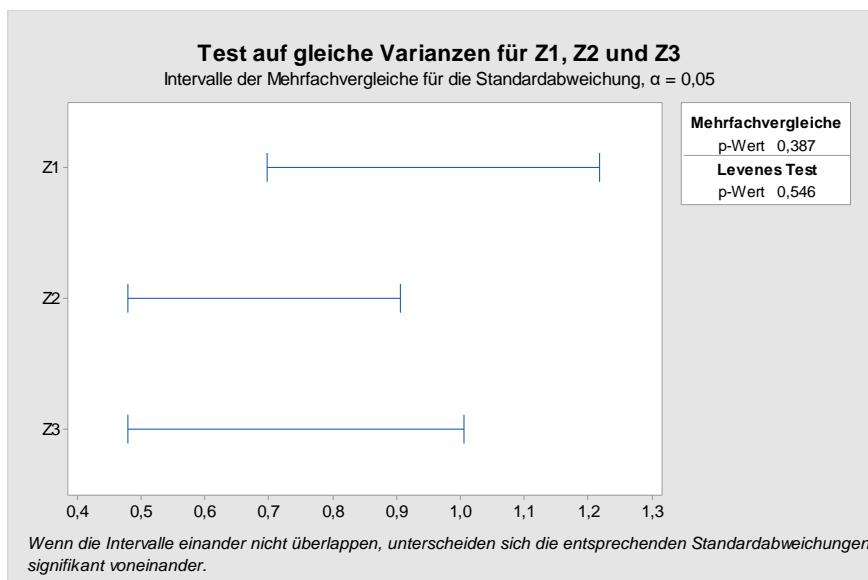


Abb. A - 35: Test auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3

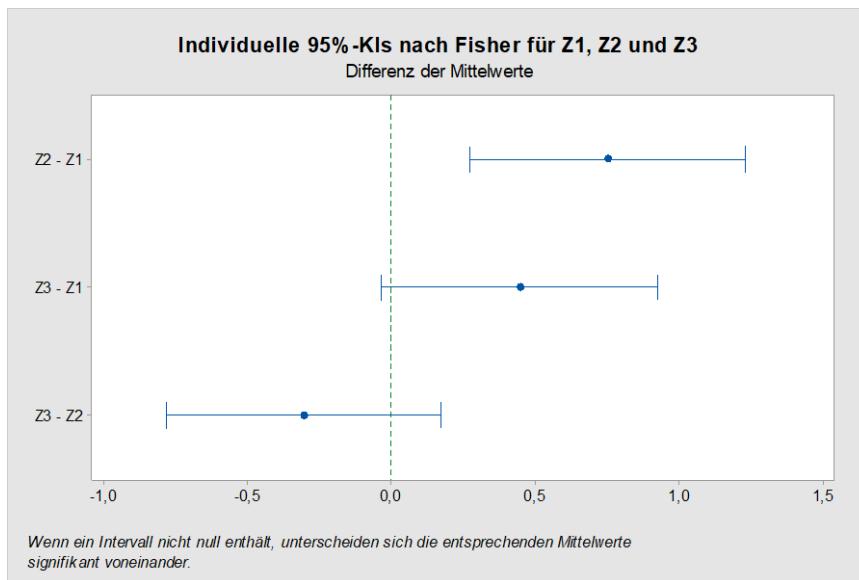
### ***ANOVA der unabhängigen Variable für Hypothese 3 anhand der Zeilenbefragung***

Im Folgenden ist das individuell ermittelte Konfidenzintervalle nach Fisher bzw. simultan ermittelte Konfidenzintervalle nach Tukey dokumentiert und dargestellt. Für die Zeilenbefragung sind für beide Verfahren signifikante Mittelwertunterschiede in den Bewertungen der unterschiedlichen Bildbereiche Z1, Z2 und Z3 für WSS A durch die Proband:innen feststellbar. Die statistische Auswertung der unterschiedlichen Bildbereiche passt für die Zeilenbefragung damit zu der Annahme aus Abschnitt 4.3.1 überein. Hypothese H3 erhält daher für die Zeilenbefragung eine Ablehnung.

**Tabelle 59: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
Z2 - Z1	0,750	0,239	(0,271; 1,229)	3,14	0,003
Z3 - Z1	0,444	0,239	(-0,035; 0,924)	1,86	0,068
Z3 - Z2	-0,306	0,239	(-0,785; 0,174)	-1,28	0,206

Simultanes Konfidenzniveau = 87,93%

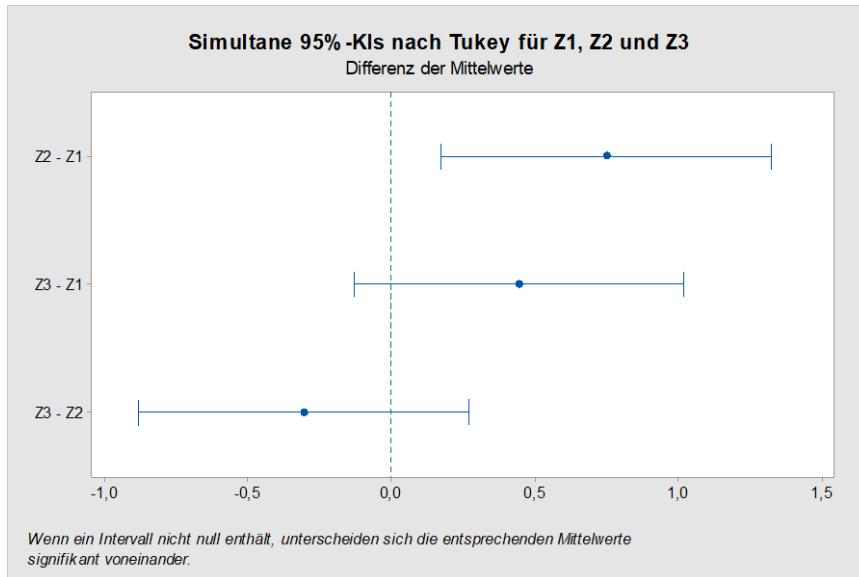


**Abb. A - 36: Differenzbalken für Hypothese 3 anhand der Zeilenbefragung der unabhängigen Variable mit den Stufen Z1, Z2 und Z3 des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fischer**

**Tabelle 60: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable der Zeilenbefragung Z1, Z2 und Z3**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
Z2 - Z1	0,750	0,239	(0,175; 1,325)	3,14	0,008
Z3 - Z1	0,444	0,239	(-0,131; 1,020)	1,86	0,160
Z3 - Z2	-0,306	0,239	(-0,881; 0,270)	-1,28	0,413

*Individuelles Konfidenzniveau = 98,05%*



**Abb. A - 37: Differenzbalken für Hypothese 3 anhand der Zeilenbefragung der unabhängigen Variable mit den Stufen Z1, Z2 und Z3 des simultanen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey**

## *Untersuchung von Hypothese H4*

### **Antwortvariablen zur Untersuchung der unabhängigen Variable von Hypothese 4**

Tabelle 61: Antwortvariablen als Mittelwert je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal

WSS A				WSS B				WSS C			
#	Stat.	Dyn. H.	Dyn. V.	#	Stat.	Dyn. H.	Dyn. V.	#	Stat.	Dyn. H.	Dyn. V.
1	4,750	4,000	4,500	19	5,000	3,500	3,000	37	4,500	2,250	3,000
2	5,000	4,000	4,625	20	5,000	4,750	4,000	38	4,375	4,125	4,250
3	3,625	2,125	2,000	21	5,000	2,875	3,125	39	4,375	3,625	4,000
4	4,750	2,000	4,750	22	3,875	4,375	4,000	40	4,375	4,375	4,000
5	5,000	4,375	4,875	23	4,875	4,500	4,250	41	5,000	3,875	3,500
6	4,125	3,750	4,500	24	4,750	5,000	4,750	42	3,750	2,625	2,750
7	4,500	4,500	4,750	25	4,375	3,125	3,750	43	4,500	4,500	4,500
8	3,875	4,125	4,625	26	4,250	3,875	4,000	44	4,500	4,375	4,375
9	3,750	3,250	3,250	27	4,375	4,375	4,625	45	4,375	2,750	3,500
10	4,500	1,875	2,250	28	5,000	4,375	4,375	46	5,000	3,750	4,125
11	4,875	3,250	4,000	29	4,750	3,875	3,750	47	4,625	3,625	3,750
12	4,125	3,625	3,625	30	4,125	3,750	3,500	48	4,500	1,250	1,750
13	5,000	4,625	4,625	31	4,875	5,000	5,000	49	5,000	4,750	4,875
14	4,625	4,875	4,625	32	5,000	4,125	4,000	50	4,375	4,875	4,500
15	2,875	3,375	3,250	33	4,875	3,125	2,125	51	4,500	4,000	4,125
16	4,250	4,125	4,375	34	5,000	5,000	4,750	52	5,000	3,875	5,000
17	4,500	4,250	4,250	35	4,250	3,000	4,375	53	4,000	3,000	2,625
18	3,625	3,625	3,625	36	3,625	3,500	3,250	54	5,000	4,500	4,875

### **Prüfung auf Normalverteilung der unabhängigen Variable anhand des Anderson-Darling-Tests und Wahrscheinlichkeitsnetzen für Hypothese 3**

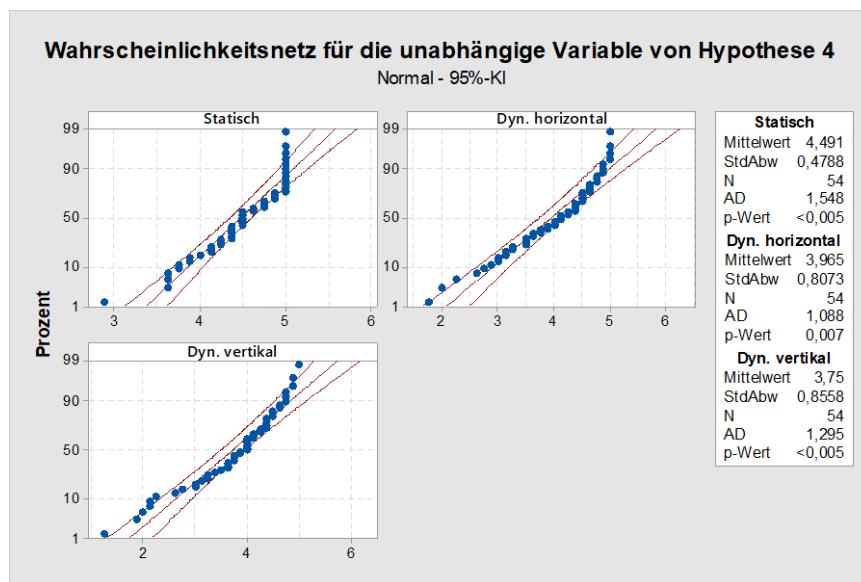


Abb. A - 38: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für die Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal

### Test auf gleiche Varianzen für die unabhängige Variable von Hypothese 4

Tabelle 62: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal

Stichprobe	N	StdAbw	KI
Statisch	54	0,478828	(0,357547; 0,67099)
Dyn. horizontal	54	0,807328	(0,632594; 1,07812)
Dyn. vertikal	54	0,855752	(0,656102; 1,16793)

Individuelles Konfidenzniveau = 98,3333%

Tabelle 63: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal

Methode	Teststatistik	p-Wert
Mehrfachvergleiche	—	0,007
Levene	5,39	0,005

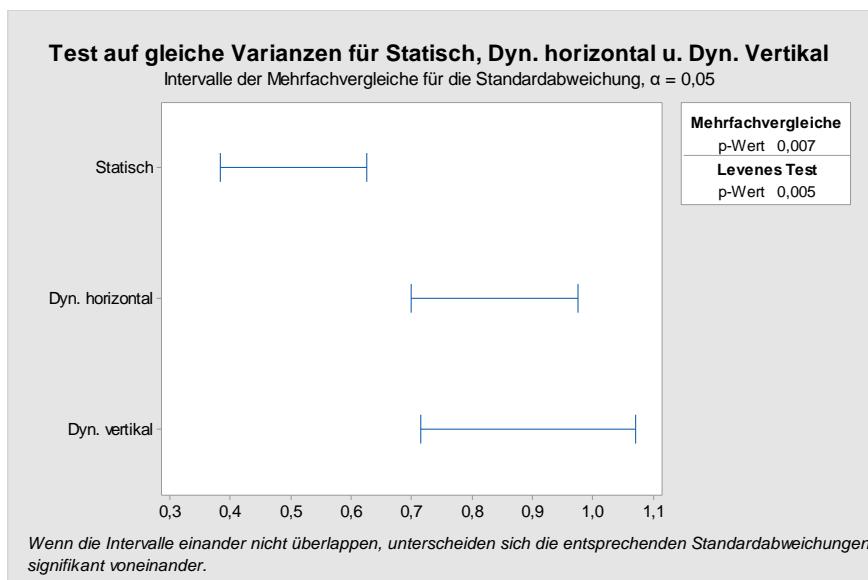


Abb. A - 39: Test auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal

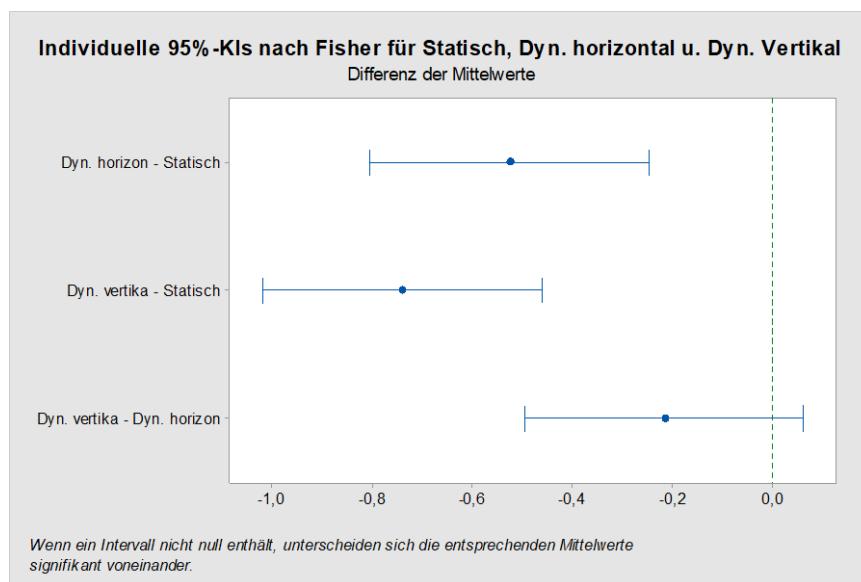
### ***ANOVA der unabhängigen Variable für Hypothese 3***

Im Folgenden ist das individuell ermittelte Konfidenzintervalle nach Fisher bzw. simultan ermittelte Konfidenzintervalle nach Tukey dokumentiert und dargestellt. Wider Erwarten sind auch hier kaum signifikante Mittelwertunterschiede in den Bewertungen der unterschiedlichen Bildbereiche Q1 bis Q4 für WSS A durch die Probanden feststellbar. Ausschließlich zwischen den Mittelwerten von Q1 und Q4 lässt sich ein signifikanter Mittelwertsunterschied nach Fischer feststellen. Außerdem ist im Differenzbalkendiagramm nach Fischer (Abb. A - 40) ein annähernd signifikanter Mittelwertsunterschied zwischen Q1 und Q2 zu erkennen. Die statistische Auswertung der unterschiedlichen Bildbereiche passt damit nicht der Annahme aus Abschnitt 4.3.1 überein. Hypothese  $H_3$  bleibt damit bestehen.

Tabelle 64: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
Dyn. horizon - Statisch	-0,525	0,141	(-0,804; -0,247)	-3,72	0,000
Dyn. vertika - Statisch	-0,741	0,141	(-1,019; -0,462)	-5,25	0,000
Dyn. vertika - Dyn. horizon	-0,215	0,141	(-0,494; 0,063)	-1,53	0,129

Simultanes Konfidenzniveau = 87,82%

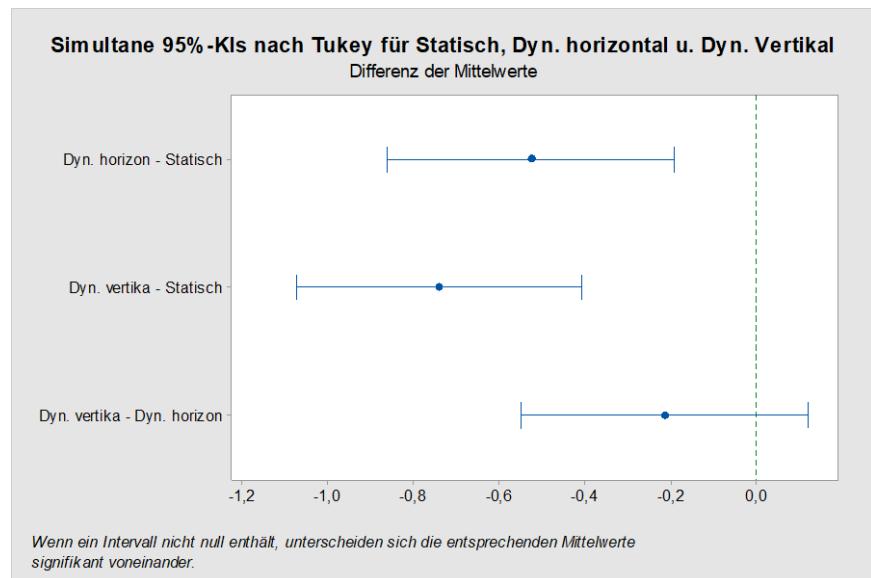


**Abb. A - 41: Differenzbalken für Hypothese 4 der unabhängigen Variable mit den Stufen Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fischer**

**Tabelle 65: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
Dyn. horizon - Statisch	-0,525	0,141	(-0,860; -0,191)	-3,72	0,001
Dyn. vertika - Statisch	-0,741	0,141	(-1,075; -0,406)	-5,25	0,000
Dyn. vertika - Dyn. horizon	-0,215	0,141	(-0,550; 0,119)	-1,53	0,282

Individuelles Konfidenzniveau = 98,10%



**Abb. A - 42: Differenzbalken für Hypothese 4 der unabhängigen Variable mit den Stufen Statisch, Dyn. horizontal u. Dyn. Vertikal des simultanen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey**

## A.5 Statistische Kennzahlen und Grafiken zur Analyse der Störfaktoren in Abschnitt 5.3.3

### *Antwortvariablen zur Untersuchung der Störfaktoren*

Tabelle 66: Antwortvariablen für die Wahrnehmungsschwelle je Proband:in inkl. Iteration 1 und Iteration 2

Iteration	Alter in Jahren				Körpergröße in cm			Geschlecht		Sehhilfe		HUD Erfahrung		
	18 - 30	31 - 40	41 - 50	51 - 60	≤ 170	171 - 180	≥ 180	Weiblich	Männlich	Ja	Nein	Seiten	Häufig	Immer
1	83	95	83	88	95	83	83	95	83	83	83	83	95	86
2	87	93	88	79	93	88	87	93	87	88	87	87	93	87
1	96	83	79	79	79	79	88	79	88	83	95	88	79	100
2	89	88	84	85	84	85	79	84	79	88	93	79	85	85
1	66	83	77	72	66	83	83	66	83	72	88	83	72	85
2	82	88	84	86	82	88	88	82	88	86	79	88	86	96
1	80	73	79	86	73	79	72	73	83	86	79	83	83	79
2	88	80	89	87	80	89	86	80	88	87	85	88	88	85
1	76	75	89	79	89	76	96	89	79	83	79	79	80	
2	84	85	94	87	94	84	89	94	85	88	84	84	88	
1	87	82	79	78	90	75	86	90	72	80	96	96	79	
2	92	90	91	84	99	85	87	99	86	88	89	89	89	
1	87	90	92	100	87	78	77	87	96	76	66	66	78	
2	93	99	94	85	93	84	84	93	89	84	82	82	84	
1	87	89	62	81	86	82	80	87	86	78	73	73	82	
2	88	92	84	92	95	90	88	88	87	84	80	80	90	
1	87	83	86	80		79	79	80	83	79	77	77	87	
2	92	95	90	88		91	87	88	88	91	84	84	97	
1	79	87	85	81		86	87	85	77	92	79	76		
2	85	97	96	91		90	92	96	84	94	89	84		
1	86		90	85		89	100		80	62	75	75		
2	95		93	89		92	85		88	84	85	85		
1	82					87	92		79	87	79	79		
2	93					88	94		89	93	87	87		
1						81	62		76	81	89	89		
2						92	84		84	92	94	94		
1						80	83		75	85	82	87		
2						88	95		85	96	90	92		
1						85	87		79	79	87	79		
2						96	92		87	85	92	91		
1						81	79		78	81	100	90		
2						91	85		84	91	85	99		
1						87	90		82	90	90	92		

2				97	93	90	93	99	94
1				82	85	87	86	86	62
2				93	89	92	90	84	
1						100	89	86	
2						85	92	90	
1						79	83	87	
2						91	95	93	
1						92	87	89	
2						94	88	92	
1						62	80	83	
2						84	88	95	
1						86	87	87	
2						90	92	88	
1						89	86	81	
2						92	95	92	
1						83	87	80	
2						95	97	88	
1						81	82	87	
2						92	93	92	
1						87	85	86	
2						92	89	95	
1						79		81	
2						85		91	
1						86		90	
2						95		93	
1						81		82	
2						91		93	
1						90		85	
2						93		89	
1						87			
2						97			
1						82			
2						93			
1						85			
2						89			

Tabelle 67: Antwortvariablen für die Störschwelle je Proband:in inkl. Iteration 1 und Iteration 2

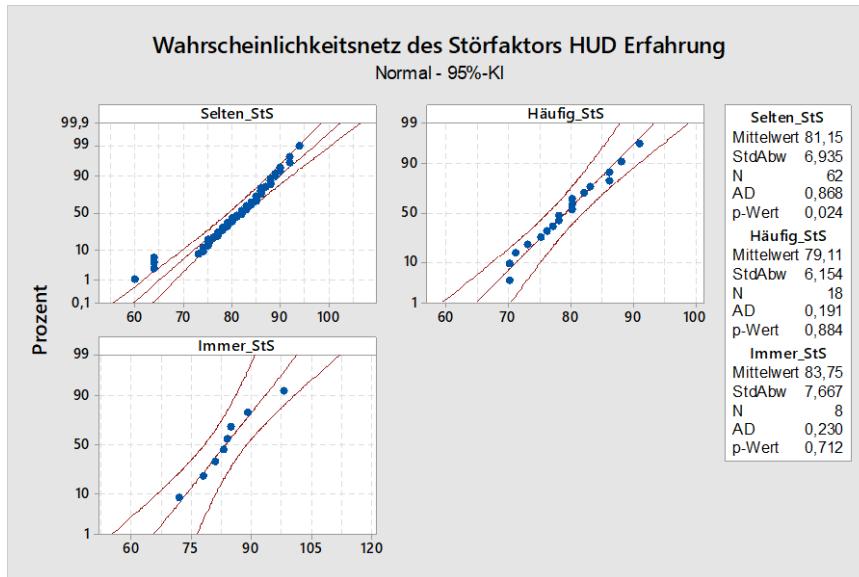
Iteration	Alter in Jahren				Körpergröße in cm			Geschlecht		Sehhilfe		HUD Erfahrung		
	18 - 30	31 - 40	41 - 50	51 - 60	≤ 170	171 - 180	≥ 180	Weiblich	Männlich	Ja	Nein	Seiten	Häufig	Immer
1	78	91	75	78	91	80	78	91	78	75	78	78	91	85
2	82	86	76	75	86	79	82	86	82	76	82	82	86	84

1	84	80	75	73	75	73	78	75	78	80	91	78	73	98
2	81	79	77	80	77	80	75	77	75	79	86	75	80	72
1	64	78	75	70	64	78	75	64	75	70	78	75	70	83
2	74	82	79	71	74	82	76	74	76	71	75	76	71	89
1	78	64	76	85	64	76	70	64	80	85	73	80	78	78
2	83	64	70	84	64	70	71	64	79	84	80	79	82	81
1	73	74	88	78	88	73	84	88	73	78	75	75	78	
2	79	81	92	83	92	79	81	92	80	82	77	77	83	
1	85	80	77	77	89	74	85	89	70	78	84	84	76	
2	87	75	82	80	94	81	84	94	71	83	81	81	70	
1	86	89	88	98	86	77	75	86	84	73	64	64	77	
2	88	94	90	72	88	80	79	88	81	79	74	74	80	
1	85	84	60	80	83	80	78	85	85	77	64	64	80	
2	83	86	77	89	90	75	83	83	84	80	64	64	75	
1	83	82	85	79		77	78	79	78	77	75	75	86	
2	85	92	86	85		82	83	85	82	82	79	79	88	
1	78	86	83	80		85	85	83	75	88	76	73		
2	81	88	89	86		86	87	89	79	90	70	79		
1	83		86	82		84	98		78	60	74	74		
2	90		88	84		86	72		83	77	81	81		
1	80					85	88		76	86	78	78		
2	77					83	90		70	88	83	83		
1						80	60		73	80	88	88		
2						89	77		79	89	92	92		
1						79	82		74	83	80	85		
2						85	92		81	89	75	87		
1						83	83		78	78	85	77		
2						89	85		83	81	87	82		
1						80	78		77	80	98	89		
2						86	81		80	86	72	94		
1						86	86		80	86	89	88		
2						88	88		75	88	94	90		
1						80	82		85		85	60		
2						77	84		87		86	77		
1									98		84	85		
2									72		86	86		
1									77		82	86		
2									82		92	88		
1									88		85	84		
2									90		83	86		
1									60		79	82		
2									77		85	92		
1									85		83	85		
2									86		85	83		
1									84		83	80		

2			86	90	89
1			82	86	79
2			92	88	85
1			80	80	83
2			89	77	85
1			83	82	83
2			85	84	90
1			78		80
2			81		86
1			83		86
2			90		88
1			80		80
2			86		77
1			86		82
2			88		84
1			86		
2			88		
1			80		
2			77		
1			82		
2			84		

### ***Prüfung auf Normalverteilung der Störfaktoren anhand des Anderson-Darling-Tests und Wahrscheinlichkeitsnetzen***

Folgend ist beispielhaft die Prüfungen der einzelnen Stufen für die Störschwelle des Störfaktors *HUD Erfahrung* auf Normalverteilungen dokumentiert. Anhand der Antwortvariablen für die Wahrnehmungs- und Störschwelle je Stufe der Störfaktoren in Tabelle 66 und Tabelle 67 kann bei Bedarf auch für die weiteren Störfaktoren die Prüfung auf Normalverteilung erfolgen.



**Abb. A - 43: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für die Störschwellen des Störfaktors *HUD Erfahrung***

### Test auf gleiche Varianzen für die Stufen der Störfaktoren

Folgend sind beispielhaft die Ergebnisse des Tests auf gleiche Varianzen für die Stufen des Störfaktors *HUD Erfahrung* abgetragen. Diese sind in Tabelle 68 und Tabelle 69 sowie Abb. A - 44 zu sehen. Anhand der Antwortvariablen für die Wahrnehmungs- und Störschwelle je Stufe der Störfaktoren in Tabelle 66 und Tabelle 67 kann bei Bedarf auch für die weiteren Störfaktoren der Test auf gleiche Varianzen erfolgen.

**Tabelle 68: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Störschwelle der Stufen des Störfaktors *HUD Erfahrung***

Stichprobe	N	StdAbw	KI
Selten_StS	62	6,93494	(5,26249; 9,5059)
Häufig_StS	18	6,15380	(4,44524; 9,8259)
Immer_StS	8	7,66718	(3,32912; 25,1986)

Individuelles Konfidenzniveau = 98,3333%

**Tabelle 69: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Störschwelle der Stufen des Störfaktors *HUD Erfahrung***

Methode	Teststatistik	p-Wert
Mehrfachvergleiche	—	0,718
Levene	0,05	0,956

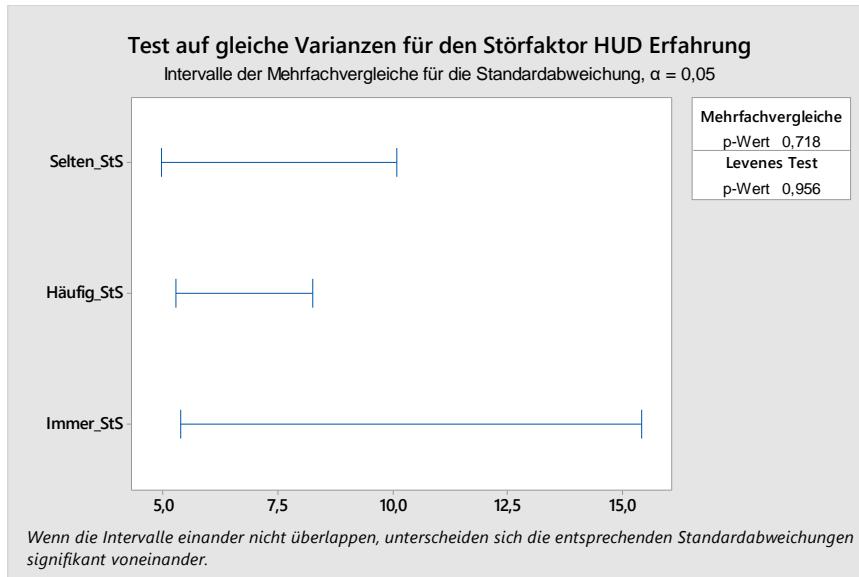


Abb. A - 45: Test auf gleiche Varianzen für die Störschwelle des Störfaktors *HUD Erfahrung*

### ***ANOVA der Störfaktoren zur Untersuchung von Mittelwertunterschieden***

An dieser Stelle sind keine weiteren Ergebnisse zu den einfaktoriellen Varianzanalysen für die Störfaktoren dokumentiert, da keiner dieser Faktoren einen statistisch signifikanten Einfluss auf die abhängige Variablen Wahrnehmungs- oder Störschwelle aufweist. Anhand der Antwortvariablen für die Wahrnehmungs- und Störschwelle je Stufe der Störfaktoren in Tabelle 66 und Tabelle 67 kann bei Bedarf auch für die weiteren Störfaktoren eine Einflussanalyse anhand einfaktorieller Varianzanalysen erfolgen. Die Ergebnisse der jeweiligen ANOVAs sind bereits in Tabelle 34 in Abschnitt 5.3.3 unter der Analyse der Störfaktoren zu finden.

### **A.6 Statistische Kennzahlen und Grafiken zur Analyse der subjektiven Bewertung der Wahrnehmungs- und Störschwelle für Doppelbildfehler eines p-polarisierten Head-up Displays**

#### ***Untersuchung von Hypothese H5***

#### ***Antwortvariablen zur Untersuchung der unabhängige Variable von Hypothese 5***

Tabelle 70: Antwortvariablen je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable: WS\_Gesamt und StS\_Gesamt

Proband#_Iteration	WS_Gesamt	StS_Gesamt	Proband#_Iteration	WS_Gesamt	StS_Gesamt	Proband#_Iteration	WS_Gesamt	StS_Gesamt
1_1	83	78	16_1	79	76	31_1	89	84
1_2	87	82	16_2	89	70	31_2	92	86

2_1	95	91	17_1	76	73	32_1	83	82
2_2	93	86	17_2	84	79	32_2	95	92
3_1	88	78	18_1	75	74	33_1	87	85
3_2	79	75	18_2	85	81	33_2	88	83
4_1	83	75	19_1	79	78	34_1	81	80
4_2	88	76	19_2	87	83	34_2	92	89
5_1	83	80	20_1	78	77	35_1	80	79
5_2	88	79	20_2	84	80	35_2	88	85
6_1	79	73	21_1	89	88	36_1	85	83
6_2	85	80	21_2	94	92	36_2	96	89
7_1	79	75	22_1	82	80	37_1	87	83
7_2	84	77	22_2	90	75	37_2	92	85
8_1	72	70	23_1	87	85	38_1	79	78
8_2	86	71	23_2	92	87	38_2	85	81
9_1	96	84	24_1	100	98	39_1	86	83
9_2	89	81	24_2	85	72	39_2	95	90
10_1	86	85	25_1	79	77	40_1	81	80
10_2	87	84	25_2	91	82	40_2	91	86
11_1	83	78	26_1	90	89	41_1	90	86
11_2	88	82	26_2	99	94	41_2	93	88
12_1	66	64	27_1	92	88	42_1	87	86
12_2	82	74	27_2	94	90	42_2	97	88
13_1	73	64	28_1	62	60	43_1	82	80
13_2	80	64	28_2	84	77	43_2	93	77
14_1	77	75	29_1	86	85	44_1	85	82
14_2	84	79	29_2	90	86	44_2	89	84
15_1	80	78	30_1	87	86			
15_2	88	83	30_2	93	88			

**Prüfung auf Normalverteilung der unabhängigen Variable anhand des Anderson-Darling-Tests und Wahrscheinlichkeitsnetzen für Hypothese 5**

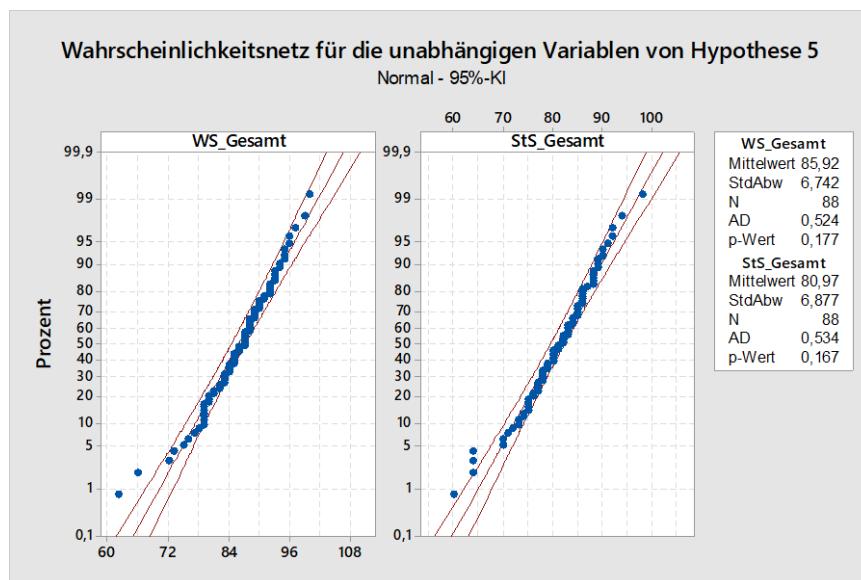


Abb. A - 46: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für die Stufen der unabhängigen Variablen: WS\_Gesamt und StS\_Gesamt

**Test auf gleiche Varianzen für die unabhängige Variable von Hypothese 5**

Tabelle 71: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: WS\_Gesamt und StS\_Gesamt

Stichprobe	N	StdAbw	KI
WS_Gesamt	88	6,74191	(5,75961; 8,10835)
StS_Gesamt	88	6,87733	(5,87530; 8,27121)

Individuelles Konfidenzniveau = 97,5%

Tabelle 72: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: WS\_Gesamt und StS\_Gesamt

Methode	Teststatistik	p-Wert
Mehrfachvergleiche	0,02	0,882
Levene	0,12	0,734

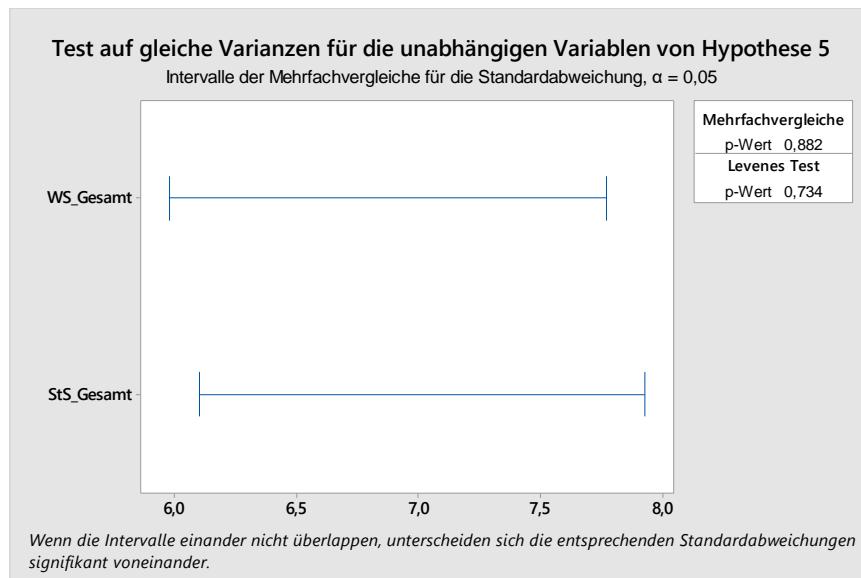


Abb. A - 47: Test auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: WS\_Gesamt und StS\_Gesamt

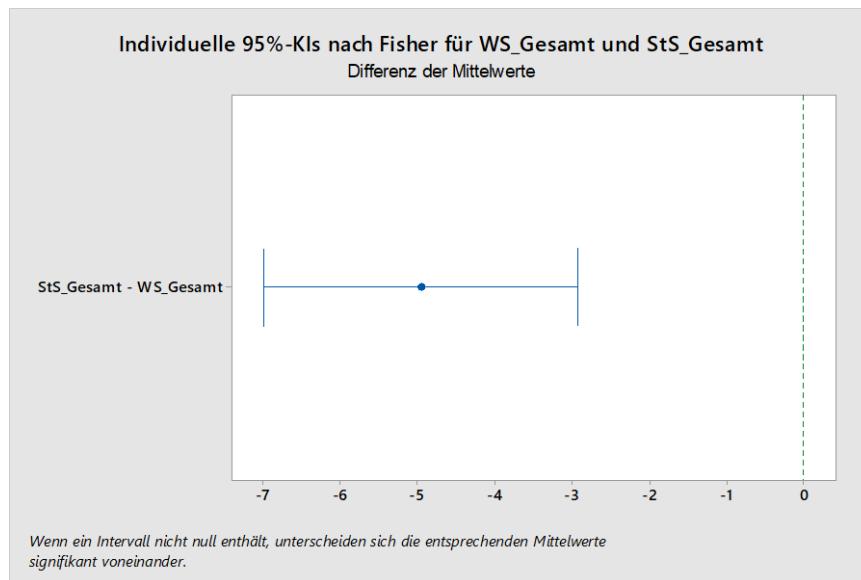
### ***ANOVA der unabhängigen Variable für Hypothese 5***

Im Folgenden ist das individuell ermittelte Konfidenzintervalle nach Fisher bzw. simultan ermittelte Konfidenzintervalle nach Tukey dokumentiert und dargestellt. Beide Verfahren liefern signifikante Mittelwertunterschiede in den Bewertungen gesamtheitlichen Wahrnehmungs- und Störschwelle durch die Proband:innen. Sie bestätigen damit die Ablehnung von Hypothese H5.

**Tabelle 73: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: WS\_Gesamt und StS\_Gesamt**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
StS_Gesamt - WS_Gesamt	-4,95	1,03	(-6,98; -2,93)	-4,83	0,000

Simultanes Konfidenzniveau = 95,00%

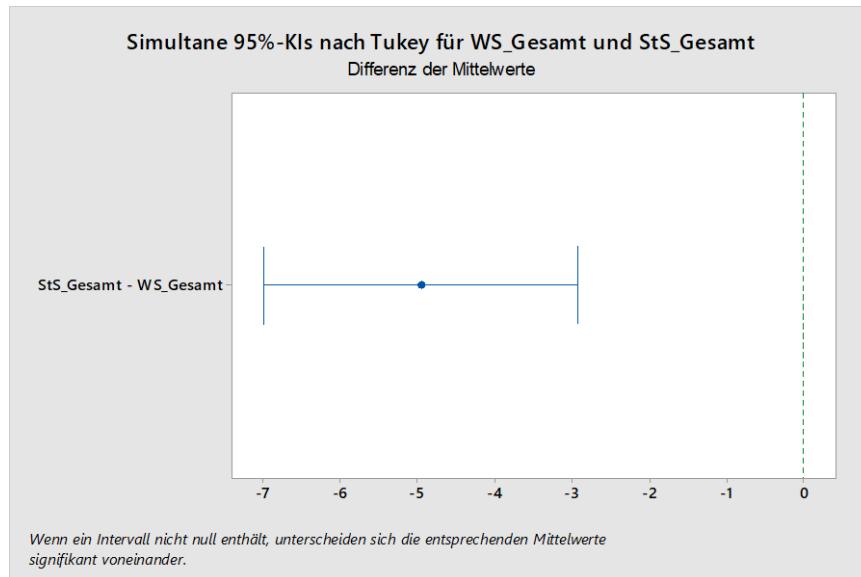


**Abb. A - 48: Differenzbalken für Hypothese 5 der unabhängigen Variable mit den Stufen WS\_Gesamt und StS\_Gesamt des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fischer**

**Tabelle 74: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: WS\_Gesamt und StS\_Gesamt**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
StS_Gesamt - WS_Gesamt	-4,95	1,03	(-6,98; -2,93)	-4,83	0,000

*Individuelles Konfidenzniveau = 95,00%*



**Abb. A - 49: Differenzbalken für Hypothese 5 der unabhängigen Variablen mit den Stufen WS\_Gesamt und StS\_Gesamt des simultanen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey**

## *Untersuchung von Hypothese H6*

### *Antwortvariablen zur Untersuchung der unabhängige Variable von Hypothese 6*

Tabelle 75: Antwortvariablen je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable: *H\_StS und D\_StS*

Proband#_Iteration	H_StS	Proband#_Iteration	H_StS	Proband#_Iteration	D_StS	Proband#_Iteration	D_StS
1_1	78	13_1	64	21_1	88	33_1	85
1_2	82	13_2	64	21_2	92	33_2	83
2_1	91	14_1	75	22_1	80	34_1	80
2_2	86	14_2	79	22_2	75	34_2	89
3_1	78	15_1	78	23_1	85	35_1	79
3_2	75	15_2	83	23_2	87	35_2	85
4_1	75	16_1	76	24_1	98	36_1	83
4_2	76	16_2	70	24_2	72	36_2	89
5_1	80	17_1	73	25_1	77	37_1	83
5_2	79	17_2	79	25_2	82	37_2	85
6_1	73	18_1	74	26_1	89	38_1	78
6_2	80	18_2	81	26_2	94	38_2	81
7_1	75	19_1	78	27_1	88	39_1	83
7_2	77	19_2	83	27_2	90	39_2	90
8_1	70	20_1	77	28_1	60	40_1	80
8_2	71	20_2	80	28_2	77	40_2	86
9_1	84	13_1	64	29_1	85	41_1	86
9_2	81	13_2	64	29_2	86	41_2	88
10_1	85	14_1	75	30_1	86	42_1	86
10_2	84	14_2	79	30_2	88	42_2	88
11_1	78			31_1	84	43_1	80
11_2	82			31_2	86	43_2	77
12_1	64			32_1	82	44_1	82
12_2	74			32_2	92	44_2	84

**Prüfung auf Normalverteilung der unabhängigen Variable anhand des Anderson-Darling-Tests und Wahrscheinlichkeitsnetzen für Hypothese 6**

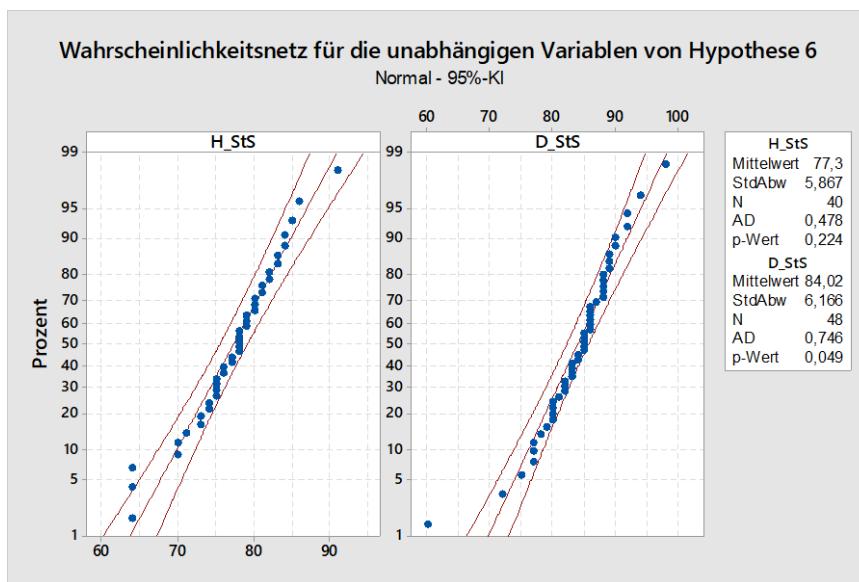


Abb. A - 50: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für die Stufen der unabhängigen Variablen: *H\_StS* und *D\_StS*

**Test auf gleiche Varianzen für die unabhängige Variable von Hypothese 6**

Tabelle 76: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: *H\_StS* und *D\_StS*

Stichprobe	N	StdAbw	KI
H_StS	40	5,86690	(4,44297; 8,20708)
D_StS	48	6,16610	(4,17746; 9,54725)

Individuelles Konfidenzniveau = 97,5%

Tabelle 77: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: *H\_StS* und *D\_StS*

Methode	Teststatistik	p-Wert
Mehrfachvergleiche	—	0,831
Levene	0,00	0,996

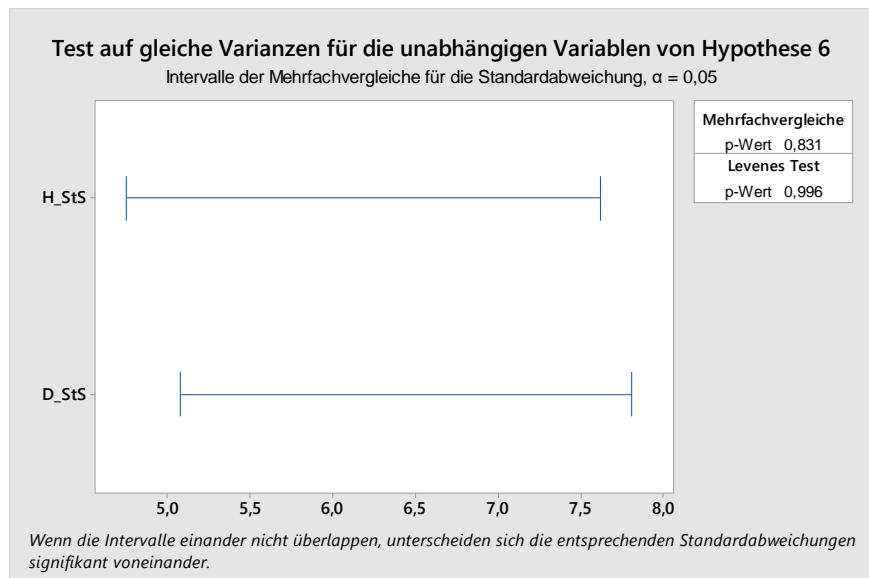


Abb. A - 51: Test auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable:  $H\_StS$  und  $D\_StS$

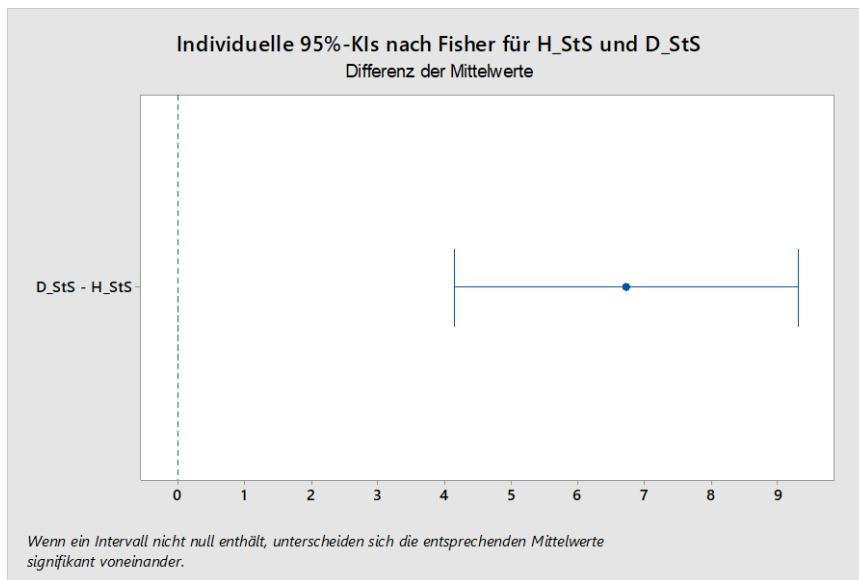
### ***ANOVA der unabhängigen Variable für Hypothese 6***

Im Folgenden ist das individuell ermittelte Konfidenzintervalle nach Fisher bzw. simultan ermittelte Konfidenzintervalle nach Tukey dokumentiert und dargestellt. Beide Verfahren liefern signifikante Mittelwertunterschiede in den Bewertungen gesamtheitlichen Wahrnehmungs- und Störschwelle durch die Proband:innen. Sie bestätigen damit die Ablehnung von Hypothese  $H_6$ .

**Tabelle 78: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable:  $H\_StS$  und  $D\_StS$**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
$D\_StS - H\_StS$	6,72	1,29	(4,15; 9,29)	5,20	0,000

Simultanes Konfidenzniveau = 95,00%

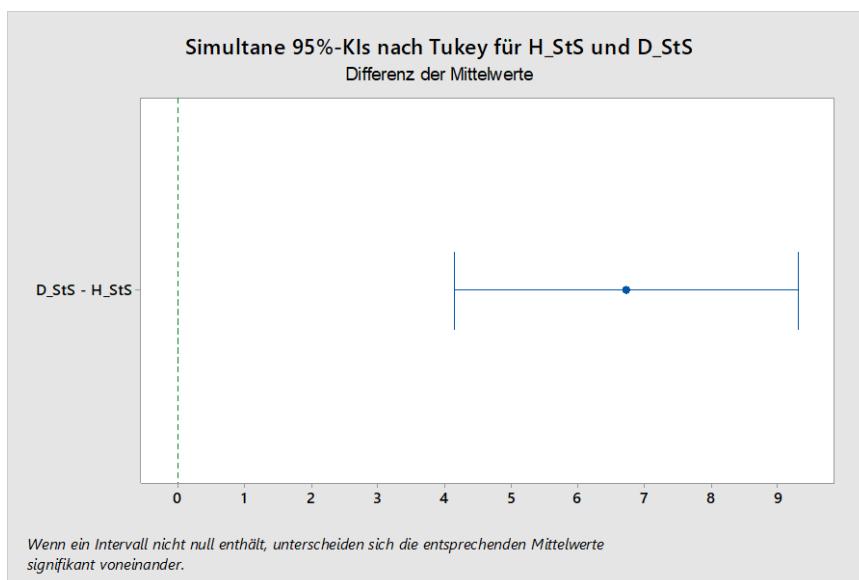


**Abb. A - 52: Differenzbalken für Hypothese 6 der unabhängigen Variable mit den Stufen H\_StS und D\_StS des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fisher**

**Tabelle 79: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: H\_StS und D\_StS**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
D_StS - H_StS	6,72	1,29	(4,15; 9,29)	5,20	0,000

*Individuelles Konfidenzniveau = 95,00%*



**Abb. A - 53: Differenzbalken für Hypothese 6 der unabhängigen Variablen mit den Stufen H\_StS und D\_StS des simultanen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey**

## *Untersuchung von Hypothese H7*

### *Antwortvariablen zur Untersuchung der unabhängige Variable von Hypothese H7*

Tabelle 80: Antwortvariablen je Proband:in für die Stufen der unabhängigen Variable: WS\_1, WS\_2, StS\_1 und StS\_2

Proband# _Iteration _Umgebung*	WS	StS	Proband# _Iteration _Umgebung*	WS	StS	Proband# _Iteration _Umgebung*	WS	StS
1_1_hell	83	78	16_1_hell	79	76	31_1_dunkel	89	84
1_2_hell	87	82	16_2_hell	89	70	31_2_dunkel	92	86
2_1_hell	95	91	17_1_hell	76	73	32_1_dunkel	83	82
2_2_hell	93	86	17_2_hell	84	79	32_2_dunkel	95	92
3_1_hell	88	78	18_1_hell	75	74	33_1_dunkel	87	85
3_2_hell	79	75	18_2_hell	85	81	33_2_dunkel	88	83
4_1_hell	83	75	19_1_hell	79	78	34_1_dunkel	81	80
4_2_hell	88	76	19_2_hell	87	83	34_2_dunkel	92	89
5_1_hell	83	80	20_1_hell	78	77	35_1_dunkel	80	79
5_2_hell	88	79	20_2_hell	84	80	35_2_dunkel	88	85
6_1_hell	79	73	21_1_dunkel	89	88	36_1_dunkel	85	83
6_2_hell	85	80	21_2_dunkel	94	92	36_2_dunkel	96	89
7_1_hell	79	75	22_1_dunkel	82	80	37_1_dunkel	87	83
7_2_hell	84	77	22_2_dunkel	90	75	37_2_dunkel	92	85
8_1_hell	72	70	23_1_dunkel	87	85	38_1_dunkel	79	78
8_2_hell	86	71	23_2_dunkel	92	87	38_2_dunkel	85	81
9_1_hell	96	84	24_1_dunkel	100	98	39_1_dunkel	86	83
9_2_hell	89	81	24_2_dunkel	85	72	39_2_dunkel	95	90
10_1_hell	86	85	25_1_dunkel	79	77	40_1_dunkel	81	80
10_2_hell	87	84	25_2_dunkel	91	82	40_2_dunkel	91	86
11_1_hell	83	78	26_1_dunkel	90	89	41_1_dunkel	90	86
11_2_hell	88	82	26_2_dunkel	99	94	41_2_dunkel	93	88
12_1_hell	66	64	27_1_dunkel	92	88	42_1_dunkel	87	86
12_2_hell	82	74	27_2_dunkel	94	90	42_2_dunkel	97	88
13_1_hell	73	64	28_1_dunkel	62	60	43_1_dunkel	82	80
13_2_hell	80	64	28_2_dunkel	84	77	43_2_dunkel	93	77
14_1_hell	77	75	29_1_dunkel	86	85	44_1_dunkel	85	82
14_2_hell	84	79	29_2_dunkel	90	86	44_2_dunkel	89	84
15_1_hell	80	78	30_1_dunkel	87	86			
15_2_hell	88	83	30_2_dunkel	93	88			

**Prüfung auf Normalverteilung der unabhängigen Variable anhand des Anderson-Darling-Tests und Wahrscheinlichkeitsnetzen für Hypothese 7**

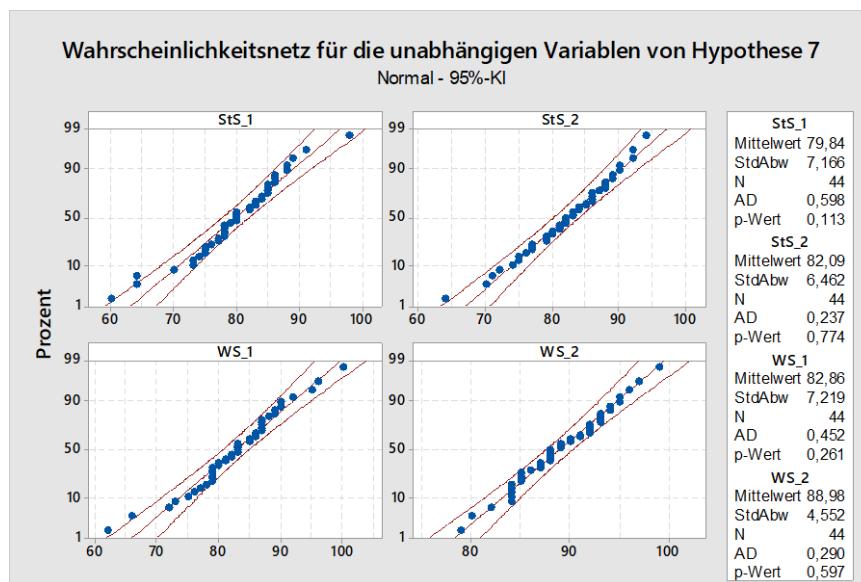


Abb. A - 54: Wahrscheinlichkeitsnetz und Prüfung auf Normalverteilung anhand der Ergebnisse des Anderson-Darling-Tests für die Stufen der unabhängigen Variablen: *WS\_1, WS\_2, StS\_1 und StS\_2*

**Test auf gleiche Varianzen für die unabhängige Variable von Hypothese 7**

Tabelle 81: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: *WS\_1 und WS\_2*

Stichprobe	N	StdAbw	KI
WS_1	44	7,21945	(5,39078; 10,1874)
WS_2	44	4,55197	(3,73131; 5,8512)

Individuelles Konfidenzniveau = 97,5%

Tabelle 82: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: *WS\_1 und WS\_2*

Methode	Teststatistik	p-Wert
Mehrfachvergleiche	5,05	0,025
Levene	4,09	0,046

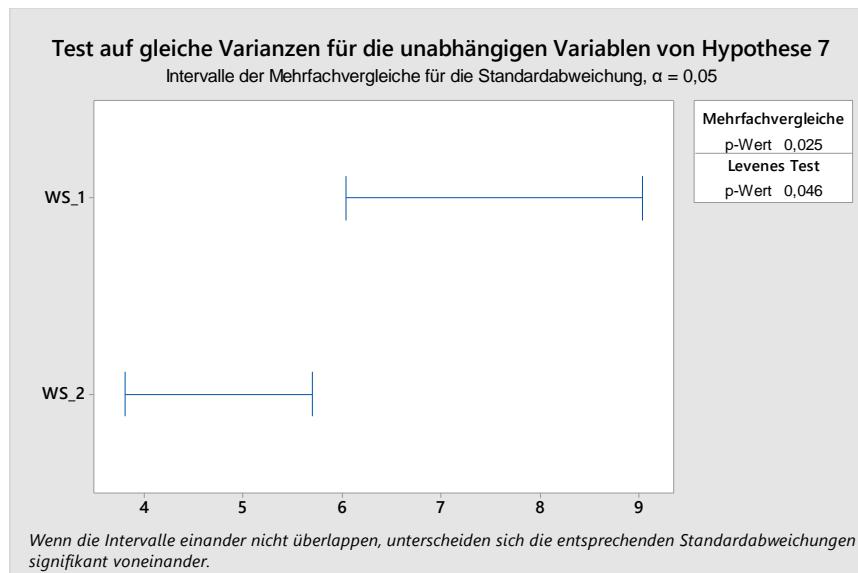
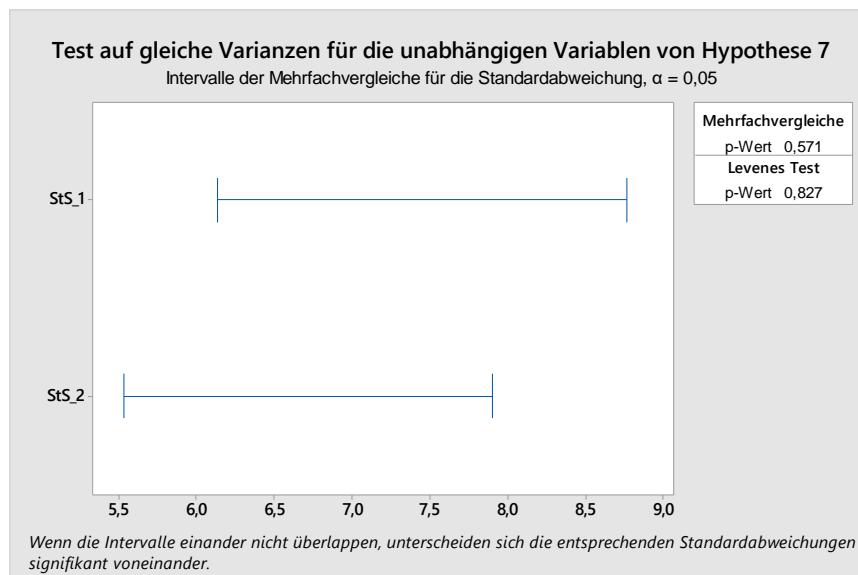
Tabelle 83: 95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen – Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: *StS\_1 und StS\_2*

Stichprobe	N	StdAbw	KI
StS_1	44	7,16563	(5,32702; 10,1562)
StS_2	44	6,46212	(5,06965; 8,6792)

Individuelles Konfidenzniveau = 97,5%

**Tabelle 84: Ergebnisse der Prüfung auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: StS\_1 und StS\_2**

Methode	Teststatistik	p-Wert
Mehrfachvergleiche	0,32	0,571
Levene	0,05	0,827

**Abb. A - 55: Test auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: WS\_1 und WS\_2****Abb. A - 56: Test auf gleiche Varianzen für die Stufen der unabhängigen Variable: StS\_1 und StS\_2**

### ***ANOVA der unabhängigen Variable für Hypothese 7***

Im Folgenden sind die individuell ermittelten Konfidenzintervalle nach Fisher bzw. simultan ermittelten Konfidenzintervalle nach Tukey für Hypothese 7 dokumentiert und dargestellt. Die

Betrachtungen inkludieren beispielhaft die ANOVAs zu WS\_1 und WS\_2 sowie StS\_1 und StS\_2.

**Tabelle 85: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: WS\_1 und WS\_2**

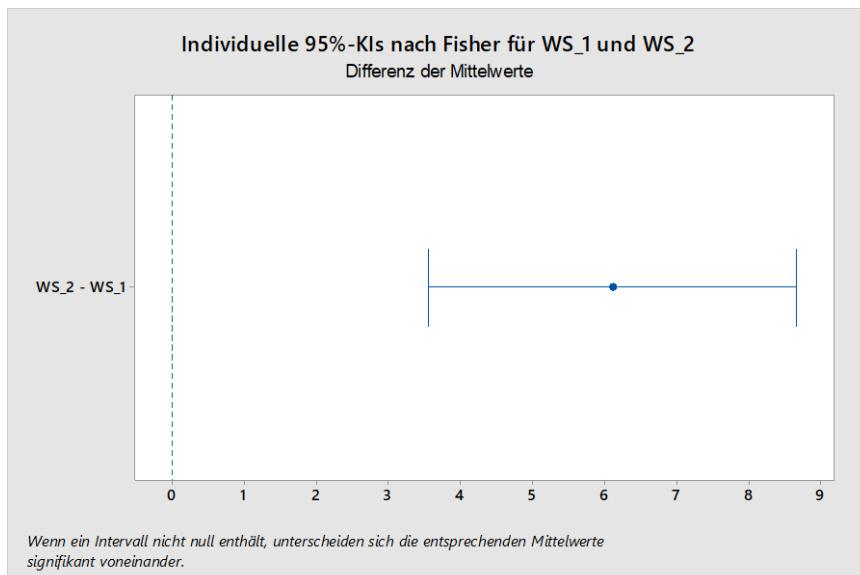
Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
WS_2 - WS_1	6,11	1,29	(3,56; 8,67)	4,75	0,000

Simultanes Konfidenzniveau = 95,00%

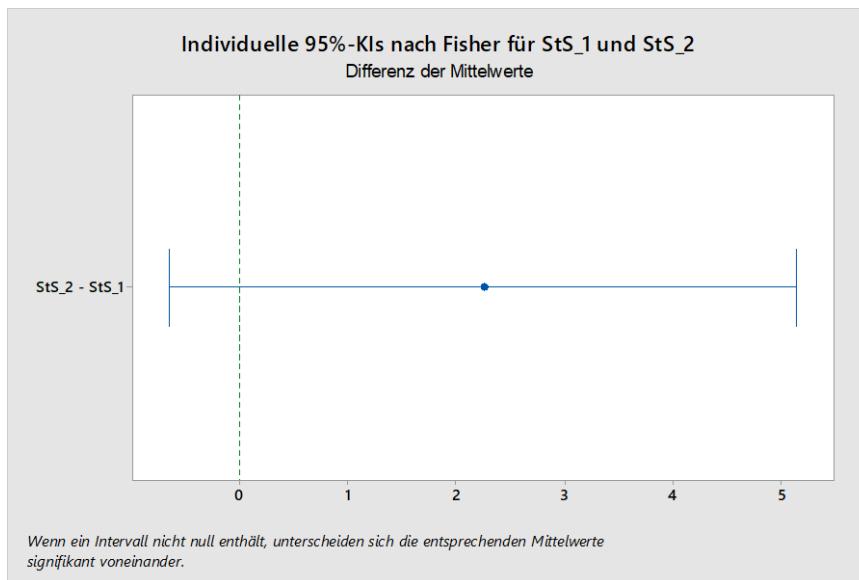
**Tabelle 86: Individuelle Fisher-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: StS\_1 und StS\_2**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
StS_2 - StS_1	2,25	1,45	(-0,64; 5,14)	1,55	0,126

Simultanes Konfidenzniveau = 95,00%



**Abb. A - 57: Differenzbalken für Hypothese 7 der unabhängigen Variable mit den Stufen WS\_1 und WS\_2 des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fischer**



**Abb. A - 58: Differenzbalken für Hypothese 7 der unabhängigen Variable mit den Stufen StS<sub>1</sub> und StS<sub>2</sub> des individuellen 95 % Konfidenzintervalls nach Fisher**

**Tabelle 87: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: WS<sub>1</sub> und WS<sub>2</sub>**

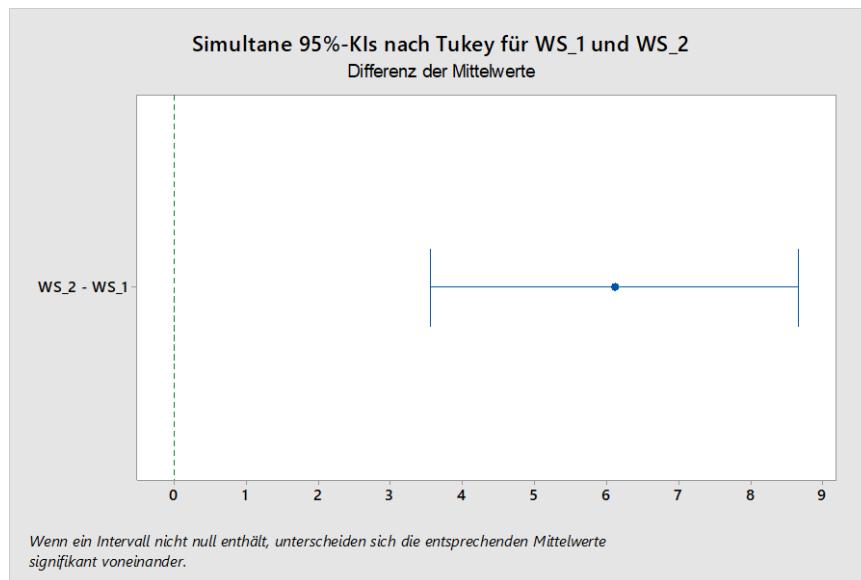
Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
WS <sub>2</sub> - WS <sub>1</sub>	6,11	1,29	(3,56; 8,67)	4,75	0,000

Individuelles Konfidenzniveau = 95,00%

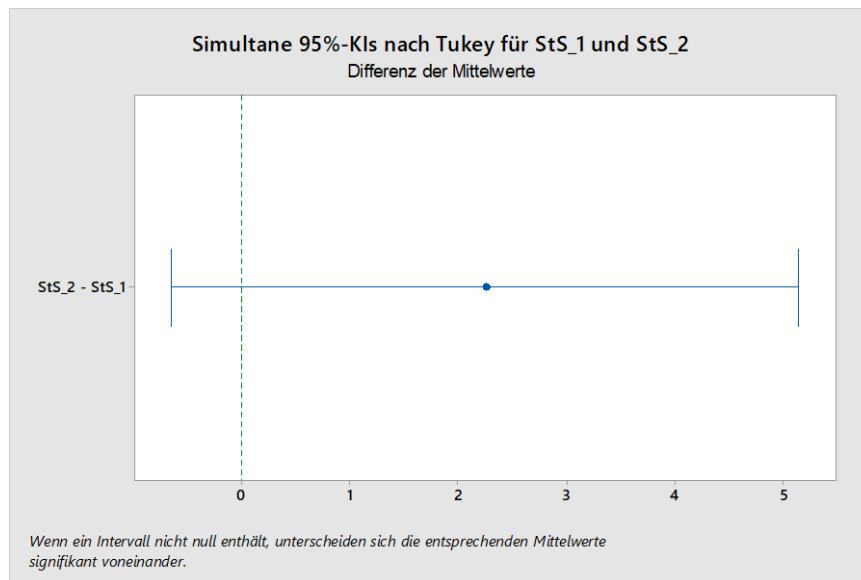
**Tabelle 88: Simultane Tukey-Tests für Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stufen der unabhängigen Variable: StS<sub>1</sub> und StS<sub>2</sub>**

Differenz der Stufen	Differenz der Mittelwerte	SE der Differenz	95%-KI	t-Wert	Korrigierter p-Wert
StS <sub>2</sub> - StS <sub>1</sub>	2,25	1,45	(-0,64; 5,14)	1,55	0,126

Individuelles Konfidenzniveau = 95,00%



**Abb. A - 59: Differenzbalken für Hypothese 7 der unabhängigen Variablen mit den Stufen WS\_1 und WS\_2 des simultanen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey**



**Abb. A - 60: Differenzbalken für Hypothese 7 der unabhängigen Variablen mit den Stufen StS\_1 und StS\_2 des simultanen 95 % Konfidenzintervalls nach Tukey**



