

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Ergonomie

## Automatisiertes Fahren mit kontaktanalogem Head-Up Display

Dipl.-Ing. Univ. Thomas Wilhelm Weißgerber

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. mont. habil. Dr. rer. nat. h. c. Ewald Werner  
Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler  
2. Prof. Dr.-Ing. Frank Flemisch

Die Dissertation wurde am 08.03.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 01.10.2018 angenommen.

*„Wissenschaft gründet auf Redlichkeit.“*

Memorandum der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur  
„Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ (1998)

*Meinen Eltern*

## Danksagung

Herrn Professor Klaus Bengler danke ich sehr für sein Vertrauen in mich und für die Freiheit in der Bearbeitung wissenschaftlicher Themen. Bei Herrn Professor Frank Flemisch möchte ich mich für die Begutachtung meiner Arbeit bedanken.

Frau Simona Chiritescu-Kretsch, Frau Doris Herold und Frau Julia Fridgen bin ich sehr dankbar für unzählige beantwortete Fragen und dass es nie an etwas gefehlt hat.

Den vielen lieben Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls möchte ich für ihre kollegiale Art und Freundlichkeit danken. Die Lehrstuhlatsmosphäre war eine große Motivation für mich. Besonders herausstellen möchte ich dabei Annika Uiherr und meine Projektkollegen Martin Kienle und Daniel Damböck.

Den ehemaligen Studenten Johannes Dosch, Luis Kalb und Lukas Schablitzki möchte ich für ihre ausgezeichnete Unterstützung in der Versuchsdurchführung danken.

Nadine Jockel danke ich für die unermüdliche Ausstrahlung kraftspendender Ruhe.

Meinen Eltern möchte ich den größten Dank schenken.

## **Zusammenfassung**

Die Integration von Augmented-Reality-Information mittels kontaktanalogem Head-Up Display (kHUD) in ein automatisiertes Fahrzeug wirft die Frage auf, welchen Effekt ein kHUD auf den Fahrer im Übernahmeprozess hat. Um diese Frage zu klären, wurden zwei Fahrsimulatorstudien durchgeführt. Die erste Studie war eine Übernahmesituation an einer unkontrollierten Systemgrenze, die durch eine Fehlfunktion des Adaptive Cruise Control Systems (ACC) verursacht wurde. Für Fahrer mit kHUD wurde das vorausfahrende Fahrzeug mit einem Augmented-Reality-Symbol markiert, um ihnen die Objekterkennung des ACC-Systems zu visualisieren. Die zweite Studie war eine Übernahmesituation an einer kontrollierten Systemgrenze, die durch eine Navigationsentscheidung ausgelöst wurde. Fahrer mit kHUD wurden durch eine Augmented-Reality-Navigationshilfe unterstützt.

Das kHUD hatte keinen Einfluss auf die Übernahmezeit bei einem Zeitbudget von 6.6 und 4.0 Sekunden. Bei einem Zeitbudget von 6.0 Sekunden übernahmen Fahrer mit kHUD früher. Das kHUD hatte keinen Einfluss auf die Qualität der Manöverdurchführung oder das Absicherungsverhalten bei Fahrstreifenwechsel. Das Blickverhalten der Fahrer zeigte einen fokussierenden Effekt auf die Augmented-Reality-Information im kHUD, ohne negative Auswirkungen auf Sicherheitsaspekte zu haben.

## **Abstract**

Integrating augmented reality information via contact analog Head-Up Display (cHUD) into an automated car raises the question what effect a cHUD has on the driver during a take-over process. To answer that question, two driving simulator experiments were conducted. The first experiment investigated a take-over situation with an uncontrolled system boundary caused by a malfunction of the Adaptive Cruise Control System (ACC). For drivers with the cHUD, the proceeding car was marked with an augmented reality symbol to visualize the object recognition of the ACC system. The second experiment investigated a take-over situation with a controlled system boundary initiated by a navigation decision. Drivers with the cHUD were supported by an augmented reality navigation aid.

The cHUD had no influence on the take-over time with a time budget of 6.6 and 4.0 seconds. With a time budget of 6.0 seconds, drivers with the cHUD had shorter take-over times. There was no influence of the cHUD on the maneuver quality or on the ensurance of a lane change. The gaze behaviour of the drivers showed a focussing effect on the augmented reality information in the cHUD, without any negative effects on safety aspects.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG, ZIELSETZUNG UND AUFBAU .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN UND MODELLE .....</b>	<b>2</b>
2.1	AUTOMATISIERUNGSGRAD UND SYSTEMGRENZEN.....	2
2.2	MODELLE DER FAHRAUFGABE .....	6
2.3	INFORMATIONSVERRARBEITUNGSPROZESS .....	8
2.4	KONTAKTANALOGES HEAD-UP DISPLAY (KHU) .....	10
<b>3</b>	<b>STAND DER FORSCHUNG .....</b>	<b>12</b>
3.1	LORENZ, KERSCHBAUM & SCHUMANN, 2014 .....	12
3.2	ABHÄNGIGE VARIABLEN .....	16
<b>4</b>	<b>MESSTECHNIK .....</b>	<b>19</b>
4.1	FAHRSIMULATOR .....	19
4.2	BLICKERFASSUNG .....	20
4.3	VIDEOAUFZEICHNUNG .....	21
<b>5</b>	<b>SIMULATORSTUDIE TEILAUTOMATISIERT - FEHLFUNKTION .....</b>	<b>21</b>
5.1	METHODIK .....	22
5.1.1	<i>Versuchsaufbau</i> .....	22
5.1.1.1	Automationsumfang.....	22
5.1.1.2	Anzeigekonzept im KHU und Kombiinstrument .....	23
5.1.1.3	Versuchsstrecke .....	24
5.1.1.4	Szenariobeschreibung Fehlfunktion (FF) .....	24
5.1.1.5	Nebenaufgabe .....	25
5.1.1.6	Probandeninstruktionen .....	26
5.1.2	<i>Versuchsdesign</i> .....	26
5.1.3	<i>Probandenkollektiv</i> .....	26
5.2	HYPOTHESEN .....	27
5.3	ERGEBNISSE .....	29
5.3.1	<i>Subjektive Daten bei Fehlfunktion (FF)</i> .....	29
5.3.1.1	Beanspruchung (NASA-TLX).....	29
5.3.1.2	Bewertung KHU und Kombiinstrument.....	29
5.3.1.3	Automationsvertrauen .....	32
5.3.1.4	Wahrgenommene Kritikalität .....	33
5.3.1.5	Zusammenfassung der subjektiven Daten .....	34
5.3.2	<i>Übernahmekenngrößen bei Fehlfunktion (FF)</i> .....	34
5.3.2.1	Häufigkeit der Kollisionen.....	34
5.3.2.2	Fahrstreifenwechsel und Absicherung .....	36

# INHALTSVERZEICHNIS

---

5.3.2.3	Übernahmezeit.....	37
5.3.2.4	TTCmin .....	38
5.3.2.5	TTCmin-Zeitpunkt.....	39
5.3.2.6	Maximale Verzögerung longitudinal .....	41
5.3.2.7	Maximale Beschleunigung lateral.....	42
5.3.2.8	Maximale resultierende Beschleunigung .....	43
5.3.2.9	Zusammenfassung Übernahmekenngrößen .....	44
5.3.3	<i>Blickkenngrößen bei Fehlfunktion (FF)</i> .....	45
5.3.3.1	Blick voraus.....	46
5.3.3.2	Blicksequenz Zeitintervall 8 Sekunden .....	47
5.3.3.3	Prozentuale Verweildauer bei Fehlfunktion (FF).....	53
5.3.3.4	Blickhäufigkeit bei Fehlfunktion (FF) .....	55
5.3.3.5	Mittlere Verweildauer bei Fehlfunktion (FF).....	57
5.3.3.6	Zusammenfassung Blickkenngrößen bei Fehlfunktion (FF).....	59
5.3.4	<i>Blickkenngrößen bei Normalfahrt (NF)</i> .....	61
5.3.4.1	Prozentuale Blickdauer bei Normalfahrt (NF) .....	63
5.3.4.2	Blickhäufigkeit bei Normalfahrt (NF).....	66
5.3.4.3	Mittlere Blickdauer bei Normalfahrt (NF).....	68
5.3.4.4	Maximale Blickdauer bei Normalfahrt (NF).....	70
5.3.4.5	Horizontales Blickverhalten bei Normalfahrt (NF).....	72
5.3.4.6	Zusammenfassung Blickkenngrößen bei Normalfahrt (NF).....	74
5.4	HYPOTHESENÜBERSICHT.....	76
<b>6</b>	<b>SIMULATORSTUDIE HOCHAUTOMATISIERT - SYSTEMGRENZE.....</b>	<b>78</b>
6.1	METHODIK .....	78
6.1.1	<i>Versuchsaufbau</i> .....	78
6.1.1.1	Automationsumfang.....	78
6.1.1.2	Anzeigekonzept im kHUD und Kombiinstrument .....	79
6.1.1.3	Versuchsstrecke .....	81
6.1.1.4	Szenariobeschreibung Systemgrenze (SG) .....	82
6.1.1.4.1	Szene „AK links frei 6 s“ (Links6s).....	83
6.1.1.4.2	Szene „AK rechts frei 4 s“ (Rechts4s) .....	84
6.1.1.5	Nebenaufgabe .....	84
6.1.1.6	Probandeninstruktionen .....	85
6.1.2	<i>Versuchsdesign</i> .....	85
6.1.3	<i>Probandenkollektiv</i> .....	86
6.2	HYPOTHESEN .....	86
6.3	ERGEBNISSE.....	87
6.3.1	<i>Subjektive Daten bei Systemgrenze (SG)</i> .....	88
6.3.1.1	Beanspruchung (NASA-TLX).....	88
6.3.1.2	Bewertung kHUD.....	88
6.3.1.3	Automationsvertrauen .....	89



---

6.3.1.4	Wahrgenommene Kritikalität .....	89
6.3.1.5	Zusammenfassung der subjektiven Daten .....	90
<b>6.3.2</b>	<b><i>Übernahmekenngrößen bei Systemgrenze (SG)</i></b> .....	<b>91</b>
6.3.2.1	Häufigkeit der erfolgreichen Übernahmen.....	91
6.3.2.2	Fahrstreifenwechsel und Absicherung .....	92
6.3.2.3	Übernahmezeit.....	94
6.3.2.4	TTCmin .....	95
6.3.2.5	TTCmin-Zeitpunkt.....	96
6.3.2.6	Maximale Verzögerung longitudinal .....	98
6.3.2.7	Maximale Beschleunigung lateral.....	98
6.3.2.8	Maximale resultierende Beschleunigung .....	99
6.3.2.9	Zusammenfassung der Übernahmekenngrößen .....	100
<b>6.3.3</b>	<b><i>Blickkenngrößen bei Systemgrenze (SG)</i></b> .....	<b>101</b>
6.3.3.1	Blicksequenz Zeitintervall 8 Sekunden .....	102
6.3.3.2	Prozentuale Verweildauer bei Systemgrenze (SG) .....	108
6.3.3.3	Absolute Verweildauer bei Systemgrenze (SG) .....	112
6.3.3.4	Blickhäufigkeit bei Systemgrenze (SG) .....	114
6.3.3.5	Mittlere Verweildauer bei Systemgrenze (SG) .....	116
6.3.3.6	Zusammenfassung der Blickkenngrößen bei Systemgrenze (SG) .....	118
<b>6.4</b>	<b>HYPOTHESENÜBERSICHT</b> .....	<b>120</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION</b> .....	<b>122</b>
7.1	AUSGANGSSITUATION.....	122
7.2	ERKENNTNISGEWINN .....	123
7.3	FORSCHUNGSBEDARF UND VERSUCHSEINSCHRÄNKUNGEN .....	126
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>129</b>

## Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
AK	Autobahnkreuz
AOI	Area Of Interest
AR	Augmented Reality
BAST	Bundesamt für Straßenwesen
FF1	Fehlfunktion 1
FF2	Fehlfunktion 2
FSW	Fahrstreifenwechsel
FV	Fahrbahnverengung
FzgVor	Fahrzeug voraus
HUD	Head-Up Display
kHUD	kontaktanaloges Head-Up Display
Links6s	Fahrstreifenwechsel nach links mit Zeitbudget 6 Sekunden
LKAS	Lane Keeping Assistance System
M	Mean
MIT_kHUD	Bedingung mit kontaktanalogem Head-Up Display
NASA-TLX	National Aeronautics and Space Administration-Task Load Index
NF1	Normalfahrt 1
NF2	Normalfahrt 2
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
OHNE_kHUD	Bedingung ohne kontaktanalogem Head-Up Display
Rechts4s	Fahrstreifenwechsel nach rechts mit Zeitbudget 4 Sekunden
SAE	Society of Automotive Engineers
SD	Standard Deviation
SG	Systemgrenze
STSS	Short-term sensory store
TTC	Time To Collision
TTCmin	Minimale Time To Collision
→ D	Definition
→ E	Ergebnisse aus Versuchsdaten
→ M	Methodischer Handlungsbedarf
→ F	Forschungsbedarf und Fragestellung

### Anmerkung:

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit bei der allgemeinen Benennung von Personen oder Gruppen nur die männliche Form verwendet. Selbstverständlich sind immer beide Geschlechter angesprochen.

## 1 Einleitung, Zielsetzung und Aufbau

Durch die zunehmende Automatisierung im Fahrzeug unterliegen der Charakter der Fahraufgabe und die daraus entstehenden Anforderungen für den Fahrer einem starken Wandel. Es ist möglich, den Fahrer sowohl zu unterstützen als ihn auch in Teilaspekten der Fahrzeugführung vollständig zu ersetzen. Besonders bei höheren Automatisierungsgraden wird der Fahrer zu einem passiven Systemüberwacher, der weniger Tätigkeiten aktiv ausführen muss. Für die sichere Erfüllung der Überwachungsaufgabe muss der Fahrer ausreichend Information über Systemzustand und Handlungsabsicht (Sarter & Woods, 1995) der Automation haben, damit er dauerhaft über Systemrückmeldungen in den Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis eingebunden ist (Endsley & Kiris, 1995; IHRA Working Group on ITS, 2010). Das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Projekt „H-Mode“ (Flemisch et al., 2003) thematisierte diese Herausforderung unter anderem mit Forschungsarbeiten zur haptischen Rückmeldung aktiver Stellteile (Kienle, Damböck, Kelsch, Flemisch & Bengler, 2009; Kienle, Damböck, Bubb & Bengler, 2012). Das Ziel war die Ausgestaltung einer kooperativen Fahrzeugführung zwischen Fahrer und Fahrzeug (Bengler & Flemisch, 2011). Voraussetzung der kooperativen Fahrzeugführung ist das gegenseitige Informations-, Vorschlags-, und Annahmewesen, das partnerschaftliche Synergieeffekte für eine effektive Aufgabenerfüllung nutzbar macht (Bruder, Franz, Kauer & Schreiber, 2011). Für eine fehlerfreie Kommunikation und einen lückenlosen Informationsaustausch zwischen den beiden Kooperationspartnern Fahrer und Fahrzeug ist eine multimodale Interaktionsgestaltung nötig, in der alle Sinnesmodalitäten (Bubb, 1993) ressourcengerecht angesprochen und genutzt werden. Die visuelle Wahrnehmung des Fahrers dominiert die Informationsaufnahme in der multimodalen Interaktion, für die das kontaktanaloge Head-Up Display (kHUD) einen wichtigen Betrag liefern kann (Bubb, 2015b).

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen eines bereits erprobten Anzeigekonzept im kontaktanalogen Head-Up Display für das automatisierte Fahren zu ermitteln. Dazu werden zwei Simulatorstudien anhand subjektiver Bewertungen, Übernahmekenngrößen und Blickkenngrößen, die sich in der Literatur etabliert haben, ausgewertet und auf ihre Tauglichkeit zur Bewertung eines kHUD geprüft. Kenngrößen ohne Aussagekraft und neue Randbedingungen für eine geeignete Evaluierung sollen

benannt und damit die Methodik hinterfragt und ausgebaut werden. Es werden auch weiterführende Forschungsfragen formuliert. Unabhängig vom kHUD soll ein Beitrag zum besseren Verständnis für Übernahmeprozesse bei automatisierten Fahrten erzielt werden. Letztlich soll die Frage beantwortet werden, ob für die automatisierte Fahrzeugführung das kHUD notwendig oder hinreichend ist.

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich entsprechend der Zielsetzung: Kapitel 2 schafft durch die Vorstellung von Begriffsdefinitionen und Modellen eine Ausgangsbasis für die Themenbereiche automatisiertes Fahren und kontaktanaloges Head-Up Display. Kapitel 3 greift hauptsächlich eine aktuelle Studie aus der Literatur auf, um die abhängigen Variablen für die spätere Auswertung zu identifizieren. Kapitel 4 beschreibt die verwendete Messtechnik, insoweit sie in beiden Simulatorstudien genutzt wurde. Die Kapitel 5 und 6 stellen zunächst die jeweilige Studie vor, präsentiert die Ergebnisse und fassen sie zusammen. Kapitel 7 gibt einen Überblick wichtiger Kernaussagen, diskutiert die Studien und zeigt weiteren Forschungsbedarf auf.

Diese Arbeit entstand im Rahmen des DFG-Projektes „H-Mode2KFF“ mit dem Schwerpunkt auf der Ausgestaltung einer kooperativen Fahrzeugführung zwischen Fahrer und automatisiertem Fahrzeug.

## **2 Grundlagen und Modelle**

In diesem Kapitel werden Nomenklaturen und Modelle aufgegriffen, um die Szenariengestaltung der Simulatorstudien bezüglich Automatisierungsgrad, Systemgrenze (Kapitel 2.1) und Fahraufgabe (Kapitel 2.2) einzuordnen. Der Informationsverarbeitungsprozess des Menschen (Kapitel 2.3) zeigt den fahrerseitigen Bedarf an Rückmeldung, der durch das kontaktanaloge Head-Up Display (Kapitel 2.4) gedeckt werden kann.

### **2.1 Automatisierungsgrade und Systemgrenzen**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) definierte als erste deutsche Behörde Automatisierungsgrade für automatisiertes Fahren (Gasser, 2012; Gasser et al., 2012). Damböck (2013) detaillierte besonders die niedrigen Automatisierungsgrade, die in der letzten Nomenklatur der BASt durch übergeordnete Kategorien berücksichtigt wurden (siehe Abbildung 2-1). Diese Arbeit orientiert sich an der aktuellen Kategorisierung der BASt (Gasser, Seeck & Smith, 2015 oder englische Version Gasser, Seeck & Smith, 2016).

<b>Kategorie A:</b>  <b>Informierende und warnende Funktionen</b>	<b>Kategorie B:</b>  <b>Kontinuierlich automatisierende Funktionen</b>	<b>Kategorie C:</b>  <b>Eingreifende Notfallfunktionen (unfallgeneigte Situation)</b>
Wirken ausschließlich „mittelbar“ über den Fahrer auf die Fahrzeugführung	Haben unmittelbaren Einfluss auf die Fahrzeugsteuerung (bewusste Übertragung durch den Fahrer – arbeitsteilige Ausführung). Immer übersteuerbar, i.d.R. Komfortfunktionen	Haben unmittelbaren Einfluss auf die Fahrzeugsteuerung in unfallgeneigten Situationen, die der Fahrer faktisch nicht mehr kontrollieren kann (i.d.R: Sicherheitsfunktionen)
Gestaltungsbeispiele: • Verkehrszeichenassistentz (bspw. Anzeige der Geschwindigkeitsbegrenzung) • Spurverlassenswarnung (bspw. Vibration am Lenkrad)	Gestaltungsbeispiele: • Adaptive Geschwindigkeitsregelung (ACC) • Spurhalteassistentz (über Lenkeingriffe)	Gestaltungsbeispiele: • Automatisches Notbremssystem (systeminitiiert) • Ausweichsystem • Nothaltesystem (Fahrer handlungsunfähig)

*Abbildung 2-1: Zusammenfassende Darstellung der drei übergeordneten Kategorien von Fahrerassistenzsystemen nach ihrer Wirkweise mit Gestaltungsbeispielen (Gasser et al., 2015).*

Abbildung 2-1 zeigt die übergeordnete Einteilung von Assistenzsystemen nach ihrer funktionalen Wirkweise in drei Kategorien mit entsprechenden Gestaltungsbeispielen. Für diese Arbeit sind nur Kategorie A und B wichtig. Kategorie A schließt alle informierenden und warnenden Funktionen ein, die mittelbar über den Fahrer auf die Fahrzeugführung einwirken. Der Fahrer nimmt Information aus der Szenerie und den Systemen der Kategorie A auf, gleicht sie ab und trifft eine Handlungsentscheidung. Der Fahrer ist oberste Entscheidungsinstanz und Informationszentrale im Regelkreis der Fahrzeugführung. Zu dieser Kategorie sind auch Navigationshinweise zu zählen. Sie sind Handlungsanweisungen, die nicht aus einer automatisierten Funktion entstehen und somit als eigenständige „Informations-Automation“ verstanden werden (Billings, 1997). Systeme der Kategorie B werden als kontinuierlich automatisierende Funktionen beschrieben, die direkt auf die Fahrzeugführung einwirken und vom Fahrer jederzeit übersteuert werden können. Eine sinnvolle Ergänzung wäre, dass dauerhaft Systemrückmeldungen über Systemzustand und Systemhandlungen an den Fahrer erfolgen müssen.

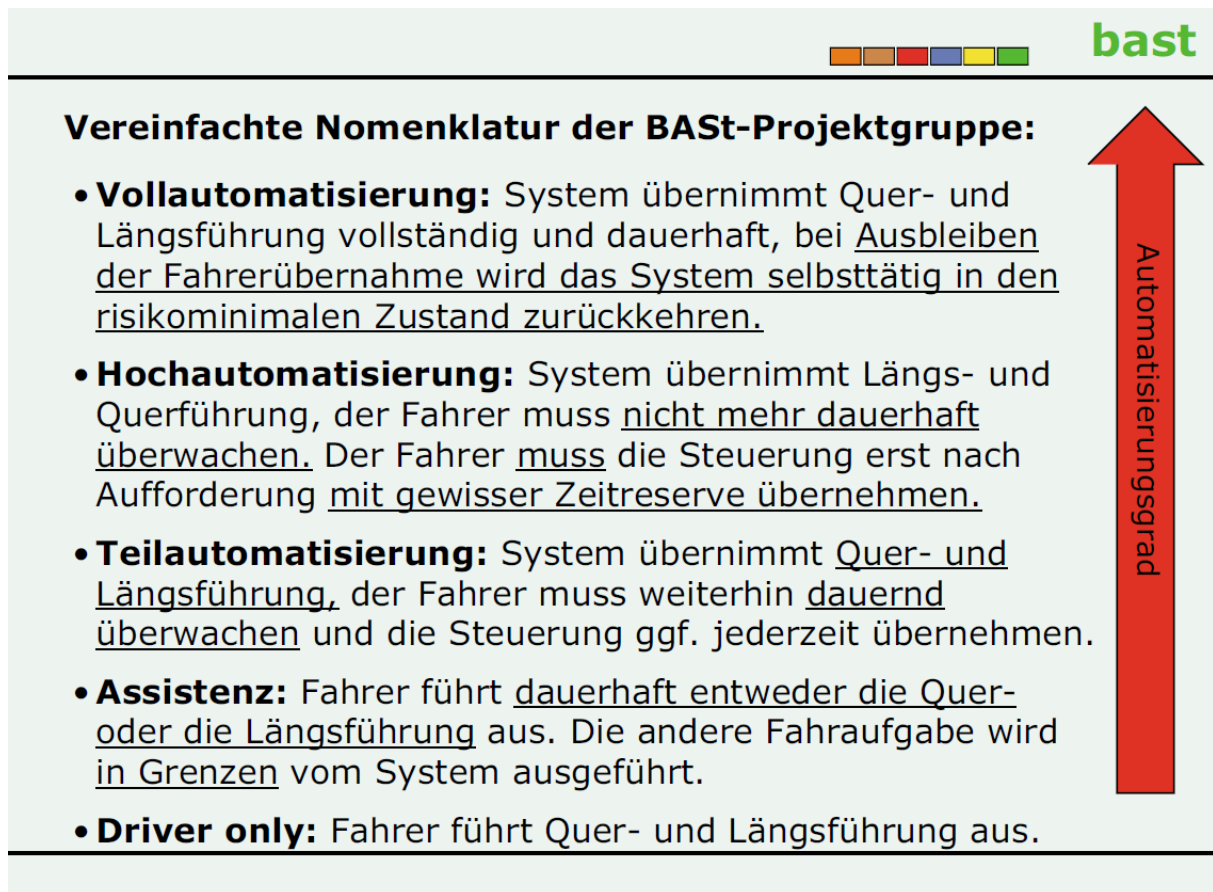


Abbildung 2-2: Vereinfachte Nomenklatur kontinuierlicher Fahrzeugautomatisierung (Gasser et al., 2015).

Die Kategorie B wird weiter unterschieden in fünf Automatisierungsstufen (siehe Abbildung 2-2), wovon zwei für diese Arbeit relevant sind. Im teilautomatisierten Modus (Level 2) führt das System Längs- und Querführung gleichzeitig aus. Mit steigender Mächtigkeit des Systems wachsen auch Nutzungszeitraum und Einsatzbereiche. Der Fahrer muss seiner Aufgabe der dauerhaften Überwachung und der Bereitschaft zu korrigierenden Eingriffen bis zur vollständigen Übernahme jederzeit nachkommen. In der hochautomatisierten Stufe (Level 3) werden ebenfalls Längs- und Querführung gleichzeitig ausgeführt. Allerdings ist der Fahrer nicht mehr zur dauerhaften Überwachung verpflichtet. Erst an Systemgrenzen, die per Definition zuverlässig erkannt werden, ist der Fahrer zur Übernahme verpflichtet, da das System nicht immer in einen risikominimalen Zustand übergehen kann.

Das für die Fahrerübernahme nötige Zeitbudget bei Hochautomatisierung muss in Forschungstätigkeiten weiter konkretisiert werden. Die herrschende Unsicherheit spiegelt sich im Wandel der Formulierungen wider: Anfänglich wurde von einer „ausreichenden Zeitreserve“ (Gasser, 2012; Gasser et al., 2012) gesprochen, die zu

„certain time buffer“ (Gasser & Westhoff, 2012) bzw. „gewisser Zeitreserve“ (siehe Abbildung 2-2) wurde und im erläuternden Fließtext sogar mit einer „relativ kurzen Vorlaufzeit“ (Gasser et al., 2015, S. 31) bezeichnet wird. Die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) verwendet im Automatisierungsgrad Level 3 – Limited Self-Driving Automation die Formulierung „appropriate amount of transition time“ (NHTSA, 2013). Auch die SAE beschreibt mit der Formulierung „sufficient lead time“ im Automatisierungsgrad Level 3 – Conditional Automation die Übernahmezeit nur sehr qualitativ (SAE International, 2014). Es besteht großes Interesse, Übernahmeprozesse detailliert zu kennen und Zeitengpässe in den unterschiedlichen Verarbeitungs- und Handlungsabläufen zu identifizieren.

Der wesentliche Unterschied zwischen Level 2 und Level 3 für die Pflichten des Fahrers ergibt sich aus dem Grad der zugesicherten Systemzuverlässigkeit. In Level 3 wird ihm in definierten Anwendungsfällen und Zeiträumen Fehlerfreiheit garantiert. Verfällt die Garantie, wird er vor der sicher identifizierten Systemgrenze zu einer kontrollierten Übernahme aufgefordert. In Level 2 hat der Fahrer zu keinem Zeitpunkt eine Garantie auf Fehlerfreiheit. Die dauerhafte Überwachung soll ermöglichen, dass er auch an unkontrollierten Systemgrenzen (z. B. Fehlfunktionen) selbstinitiiert übernimmt.

➔ D: Kontrollierte Systemgrenze: System erkennt Grenzen zuverlässig und fordert den Fahrer gezielt zur Übernahme auf.

➔ D: Unkontrollierte Systemgrenzen: Das System erkennt eine Grenze (z. B. Fehlfunktion) nicht und gibt keine Übernahmeaufforderung an den Fahrer aus.

Unkontrollierte Systemgrenzen können vom Fahrer nur identifiziert werden, wenn er den Leistungsumfang der Automation ausreichend erlernt hat und ihm Systemzustände und Systemabsichten dauerhaft und nachvollziehbar rückgemeldet werden.

Gegenwärtig werden auch in der Literatur mögliche Systemfehler eingeräumt: Nach Gasser et al. (2012) können in Level 2 Fehler vorkommen, und auch zukünftig ist mit Fehlern zu rechnen. Selbst in Level 3 werden seltene Systemfehler nicht ausgeschlossen. Weitere Beispiele sind das Projekt EMPHASIS, in dem Fehlfunktionen ausführlich behandelt wurden (Buld & Krüger, 2002), und ein Versuch zu Bremszeiten von Fahrexperten und Fahrnovizen bei unterschiedlichen Automatisierungsgraden (Young & Stanton, 2007). Um die Fehleranzahl gering zu

halten, muss der Fehlerfall im Automationsspektrum berücksichtigt werden (HAVEit, 2011). Deswegen ist die Absicherung einer Fehlfunktion sinnvoll und wichtig.

Für diese Arbeit ergeben sich daraus zwei Szenarios, die in Simulatorstudien umgesetzt wurden. Eine Übernahmesituation an einer fehlerinduzierten unkontrollierten Systemgrenze in einer teilautomatisierten Fahrt (siehe Kapitel 5) und eine Übernahmeaufforderung durch das System an einer kontrollierten Systemgrenze in einer hochautomatisierten Fahrt (siehe Kapitel 6). Die Begriffsdefinitionen zur Szenariobeschreibung richten sich nach Geyer et al. (2014).

## **2.2 Modelle der Fahraufgabe**

Die primäre Fahraufgabe (Geiser, 1985) als wichtigste Fahraufgabe wurde von Bernotat (1970), Donges (1982) und Michon (1985) in drei Ebenen der Fahrzeugführung unterteilt. Die folgende Begriffswahl orientiert sich an Donges (1982). Auf der Navigationsebene wird die Fahrtroute ausgewählt. Die kognitive Anforderung ist in dieser Ebene am höchsten, muss aber nur selten an Verkehrsknotenpunkten aufgebracht werden (Reichart & Haller, 1995). Entscheidungen in der Navigationsebene können zu Handlungsbedarf auf der Führungsebene führen. Auf ihr werden abhängig von Szenerie und umgebendem Verkehr Sollgrößen in Längs- und Querführung geplant. Die Frequenz der Neuplanungen hängt von der Umgebung ab und ist in aller Regel höher als auf der Navigationsebene, dafür nicht so fordernd. Die Planungs- oder Sollgrößen aus der Führungsebene werden auf der Stabilisierungsebene motorisch durch Stellteilbedienung umgesetzt. Korrekturingriffe auf Stabilisierungsebene erfolgen permanent bei niedriger kognitiver Anforderung. Dieses Modell nach Donges (1982) ist aus der Differenzierung der Fahraufgabe entstanden. Der Fahrer bleibt unberücksichtigt. Durch die unterschiedlichen Ausübungsfrequenzen in den drei Ebenen entstehen fahrerseitig Lerneffekte.

Die zweite Dimension – der Fahrer – wird im Modell von Rasmussen (1983) berücksichtigt, das nicht aus dem Automobilkontext kommt. Das Leistungsniveau des Menschen wird in drei Ebenen eingeteilt. Auf der wissensbasierten Ebene werden unbekannte und komplexe Aufgaben mit einem übergeordneten Ziel bearbeitet. Bis zur Handlungsumsetzung vergeht viel Zeit, da mehrere Handlungsalternativen auf ihre Zielführung geprüft werden müssen. Auf der regelbasierten Ebene erkennt der Mensch Ähnlichkeiten zu bereits erlebten Situationen und kann auf geeignete und bereits erprobte Handlungsmuster zurückgreifen. Durch die Anwendung von erlernten Regeln



steigt die Effizienz in der Problemlösung. Auf der fertigkeitbasierten Ebene ist der Lernprozess weitestgehend abgeschlossen. Der Mensch reagiert sehr schnell und zielgerichtet mit routinemäßigen Handlungssequenzen auf einen bekannten Reiz, ohne großen kognitiven Aufwand.

*Tabelle 2-1: Mit Beispielen belegte Matrix aus dem Handlungsmodell (Rasmussen, 1983) und den Ebenen der Fahraufgaben (Donges, 1982) nach Hale, Stoop & Hommels (1990) aus Ranney (1994). Übersetzung und Ergänzungen nach Lange (2008). Die Versuchsbedingungen für Fehlfunktion 1 (FF1), Fehlfunktion 2 (FF2) und Systemgrenze (SG) sind zur besseren Einordnung der Versuchsreihen in der Matrix eingetragen.*

	<b>Wissensbasiert</b>	<b>Regelbasiert</b>	<b>Fertigkeitsbasiert</b>
<b>Navigation</b>	Zurechtfinden in einer fremden Stadt	<b>Wahl zwischen vertrauten Wegen – SG</b>	Täglicher Weg in die Arbeit – (SG)
<b>Führung</b>	<b>Steuern auf schneebedeckter oder vereister Fahrbahn – FF1</b>	<b>Überholen anderer Fahrzeuge, Fahrstreifenwechsel – FF2</b>	Abbiegen an einer bekannten Kreuzung
<b>Stabilisierung</b>	Fahrschüler in der ersten Fahrstunde	Ein ungewohntes Auto fahren	Kurven fahren, Kuppeln und Schalten

Hale et al. spannten aus dem Handlungsmodell von Rasmussen (1983) und den Fahraufgaben nach Donges (1982) eine Matrix mit Beispielen auf, um zu zeigen, dass die Handlungsebenen nicht nur einer Fahraufgabe zugeordnet werden können (siehe Tabelle 2-1). Innerhalb einer Ebene der Fahraufgabe kann ein Fahrer seine Fertigungsstufe durch Übung oder Erfahrungen verbessern. Die Matrix bildet die Dimension der Automatisierung nicht explizit ab, sie kann aber bei der Einteilung in die Matrix berücksichtigt werden. Jeder Fahrer eines automatisierten Fahrzeugs durchläuft parallel zur konventionellen Fahrzeugführung auch den Lernprozess der automatisierten Fahrzeugführung. Das Wissen über Umfang der Automation, Systemgrenzen, -zustand und -absicht wird durch das Erfahren der Automation vergrößert.

In der Matrix können vorweggreifend die beiden Versuchsreihen dieser Arbeit eingeordnet werden. Das wiederholte Erleben einer unvorhergesehenen Fehlfunktion bei der Erkennung des vorausfahrenden Fahrzeugs (siehe Kapitel 5) ist auf der

Führungsebene einzuordnen. Die Fertigungsstufe des Fahrers bei der ersten Fehlfunktion muss auf der wissensbasierten Ebene eingeordnet werden, da die Fehlfunktion unangekündigt erfolgt. In der zweiten Fehlfunktion, die fünf Minuten später auftritt, kann der Fahrer bereits auf eine Erfahrung zurückgreifen, die ihn vielleicht sogar schon auf der regelbasierten Ebene agieren lässt. Die Versuchsreihe zur Übernahmeaufforderung an einer kontrollierten Systemgrenze (siehe Kapitel 6) wird auf der Navigationsebene eingeordnet, da die Fahrer einer Routenanweisung folgen müssen. Die Fahrer handeln mindestens auf der regelbasierten Ebene, da sie in der gesamten Versuchszeit zwölf Übernahmesituationen erlebten.

### 2.3 Informationsverarbeitungsprozess

Der Fahrer ist der entscheidende Akteur im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis (HAVEit, 2011). Um in zeitkritischen Übernahmesituationen Zeitengpässe identifizieren zu können, ist es nötig, den Informationsverarbeitungsprozess des Menschen zu kennen. Dieses Kapitel stellt das Informationsverarbeitungsmodell von Wickens & Hollands (2000) vor, das in Abbildung 2-3 dargestellt ist.

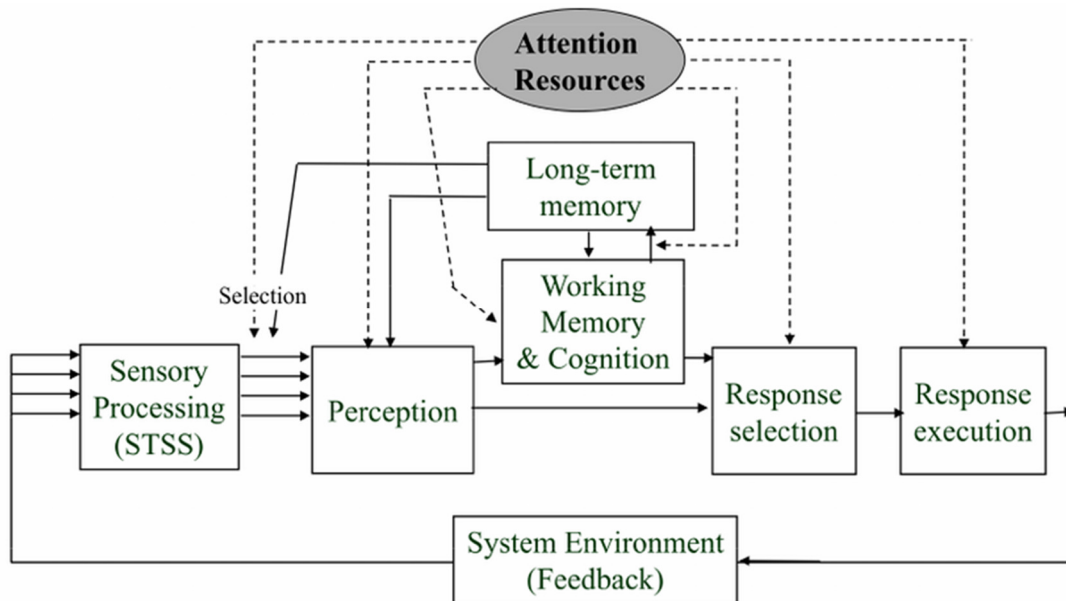


Abbildung 2-3: Die Stufen des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses (Wickens & Hollands, 2000).

In der ersten Stufe „Sensory Processing“ werden Stimuli über die Sinnesorgane aufgenommen und zur Weiterverarbeitung an das Gehirn gesendet. Diesem Prozessschritt ist noch ein sensorischer Kurzzeitspeicher (STSS = short-term sensory

store) angegliedert, der abhängig von der Sinnesmodalität das Einwirken des Sinnesreizes verlängert. Visuell ist eine Verlängerung von ca. einer halben Sekunde und auditiv von zwei bis vier Sekunden möglich.

In der Wahrnehmungsphase, der „Perception“, werden diese Daten im Gehirn bewusst verarbeitet und mit einer Bedeutung belegt. Dieser Prozess kann sowohl durch die Sinneswahrnehmung (Bottom-up-Prozess) als auch durch das Langzeitgedächtnis (Top-down-Prozess) angestoßen werden. Bei einer unsicheren oder lückenhaften Wahrnehmungslage kann das Langzeitgedächtnis erfahrungsbasierte Annahmen treffen, die den Wahrnehmungsprozess stabilisieren können.

Die weitere Art der Informationsverarbeitung auf dem Weg zur Handlungsentscheidung („Response selection“) wird hauptsächlich in der Verarbeitungszeit und der Ressourcenbindung unterschieden. In Abbildung 2-3 sind die beiden Extrema des als Kontinuum zu verstehenden Prozesses dargestellt. In einem Fall ist der Prozess direkter und damit schneller, weil ein bekannter Stimulus mit einer spezifischen Handlungsantwort im Menschen verknüpft ist (siehe Kapitel 2.2). Im anderen Fall ist der Ressourcenbedarf wegen steigender kognitiver Anforderungen größer. Hier wird das Arbeitsgedächtnis verstärkt eingesetzt, über das auch wichtige Information in das Langzeitgedächtnis eingebracht werden kann (siehe auch Baddeley, 2012).

Im nächsten Block („Response selection“) entscheidet sich der Mensch für eine der möglichen Handlungsalternativen und führt sie aus („Response execution“). Die Rückmeldungsschleife („Feedback“) verdeutlicht, dass der Verarbeitungsprozess nicht zwangsläufig durch einen sensorischen Stimulus von außen, sondern auch durch einen inneren Wunsch ausgelöst werden kann, und betont den kontinuierlichen Charakter dieses Kreisprozesses. Damit der Prozess effizient ablaufen kann, müssen den unterschiedlichen Verarbeitungsstufen ständig angepasste Aufmerksamkeitsressourcen zugewiesen werden. Weiterführende Informationen zum Konstrukt Aufmerksamkeit finden sich in Wickens & McCarley (2008).

Der Fahrer muss ausreichend Wissen über den Automationsumfang während der Lernphase und über den Systemzustand bzw. die Systemabsicht während der Nutzungsphase vermittelt bekommen, um die Vorteile der Automatisierung optimal nutzen zu können. Für eine schnelle Informationsverarbeitung sollten möglichst wenig erfahrungsbasierte Annahmen einen Wahrnehmungsprozess stabilisieren und

gleichzeitig spezifische Handlungsantworten mit einem bekannten Stimulus verknüpft sein.

In der Simulatorstudie zur Fehlfunktion in der Längsführung (Kapitel 5) wird dem Fahrer angezeigt, welche regelrelevanten Objekte von der Sensorik der Automation erkannt werden. Wird ein vorausfahrendes Fahrzeug nicht kontaktanalog markiert, existiert es für die Automation nicht und der Fahrer muss eingreifen. In der ersten Fehlfunktion wird der Fahrer verstärkt über das Arbeitsgedächtnis zu einer Entscheidung kommen, während bei der zweiten Fehlfunktion fünf Minuten später durchaus eine spezifische Handlungsantwort existieren kann.

In der Studie zu Systemgrenzen (Kapitel 6) wird dem Fahrer eine Navigationshilfe präsentiert. Dem Fahrer soll durch eine Unterstützung in der Informationsaufnahme aus der Szenerie die Navigationsaufgabe erleichtert werden. Der Fahrer fungiert in beiden Studien als Informationszentrale mit der alleinigen Entscheidungskompetenz. Die Informationspflicht liegt bei der Automation (Weißgerber, Damböck, Kienle & Bengler, 2012b). Das kontaktanaloge Head-Up Display stellt eine technische Möglichkeit dar, dieser Verpflichtung nachzukommen.

## **2.4 Kontaktanaloges Head-Up Display (kHUD)**

Anders als im statischen oder konventionellen HUD (siehe Abbildung 2-4) wird im kontaktanalogen Head-Up Display virtuelle Information mit der realen Szenerie ortskorrekt überlagert (Bubb, 1975), d. h. die Information muss einem realen Objekt örtlich und zeitlich zugeordnet sein (Bubb, 2015b). Auf einem Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum kann das kHUD mit einer Augmented Reality (AR) Darstellung verstanden werden (Milgram & Kishino, 1994).

Für diese Arbeit sind die technische Umsetzung (siehe dazu Bubb, 1975; Schneid, 2008; Bergmeier, 2009; Israel, 2012; Pfannmüller, 2017) und daraus entstehende Problematiken nicht relevant. Die Grundlage bildet ein kHUD mit idealen Anzeigeeigenschaften, ohne zeitlichen oder räumlichen Versatz (siehe Kapitel 5.1.1.2. und 6.1.1.2).



*Abbildung 2-4: Statisches oder konventionelles Head-Up Display in Grün und kontaktanalogen Head-Up Display in Blau (Continental AG, 2017).*

Ein großer Vorteil des kHUD liegt darin, dass die objektgebundene Information im zentralen Sichtfeld des Fahrers präsentiert wird. Der Einsatzbereich des kHUD als wirkungsvoller Informationsgeber ist der primären Fahraufgabe auf Navigations- und Führungsebene vorbehalten (Donges, 2015; Bubb, 2015b), die der Szenarioauswahl dieser Arbeit entsprechen (siehe Kapitel 2.2).

Problematisch ist der Effekt des „Cognitive Capture“ zu sehen. Bei diesem Effekt findet eine Fokussierung auf die kontaktanaloge Anzeige statt. Aufmerksamkeitszuwendungen zur realen Szenerie werden seltener und bedingen den Effekt des „Perceptual Tunneling“: Verkehrsrelevante Informationsreize werden nicht mehr umfassend wahrgenommen und verarbeitet. Pfannmüller (2017) ergänzt den Literaturüberblick von Gish & Staplin (1995) mit neueren Studien zu diesem Thema und kommt zu dem Schluss, dass diese beiden negativen Effekte, die ursprünglich in der Luftfahrt entdeckt worden waren, im Automobilbereich überwiegend nicht nachgewiesen werden konnten.

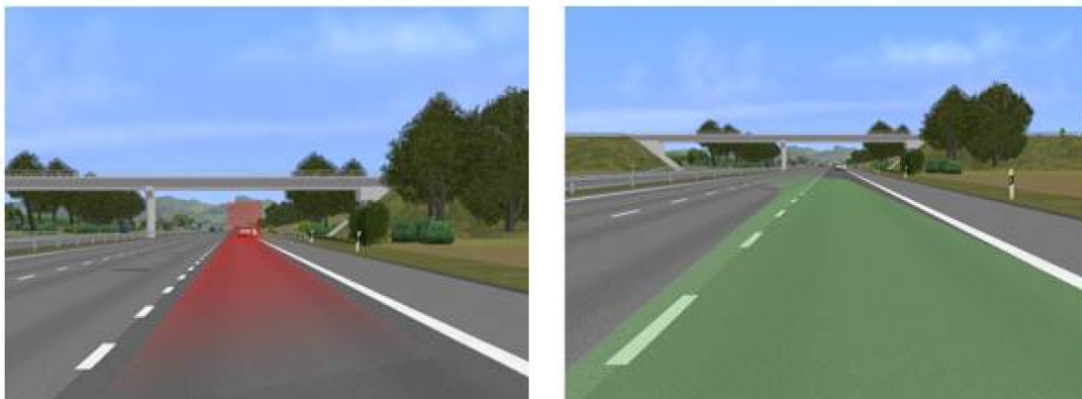
Für die Bewertung der Effizienz von kontaktanalogen Anzeigen ist die fahrerische Leistung maßgeblich (Bubb, 2015b). Zusätzlich sollten bei einer visuellen Rückmeldung Effekte im Blickverhalten unbedingt durch Blickdaten dokumentiert und Veränderungen im Absicherungsverhalten bewertet werden.

### 3 Stand der Forschung

Im folgenden Kapitel 3.1 wird eine die aktuelle Studie „Designing take over scenarios for automated driving: How does augmented reality support the driver to get back into the loop?“ (Lorenz, Kerschbaum & Schumann, 2014) zusammenfassend dargestellt. In der anschließenden Besprechung werden nicht geeignete abhängige Variablen ausgeschlossen. Die abhängigen Variablen für beide Versuchsreihen dieser Arbeit werden in Kapitel 3.2 aufgeführt.

#### 3.1 Lorenz, Kerschbaum & Schumann, 2014

In diesem BMW-Fahrsimulationsversuch wird versucht zu klären, inwieweit eine kontaktanaloge Anzeige die Informationsverarbeitungsdauer während der Übernahmephase beim hochautomatisierten Fahren verkürzen und die Fahrerreaktionen qualitativ beeinflussen kann. Dazu wurden zwei Anzeigekonzepte und eine Baseline ohne Anzeige „Without AR“ in einer unverbundenen Stichprobe ( $N_{\text{green}}=17$ ,  $N_{\text{red}}=16$ ,  $N_{\text{without}}=10$ ) verglichen. Es handelt sich hierbei um eine kontrollierte Übernahmeaufforderung auf Führungsebene, die vom System 7 Sekunden vor einem Pannenfahrzeug ausgegeben wird.



*Abbildung 3-1: Anzeigekonzept AR red (links) und AR green (rechts) aus der Studie von Lorenz et al. (2014).*

Die AR-Anzeige „AR red“ zeigt dem Fahrer durch einen roten Teppich im rechten Fahrstreifen das Pannenfahrzeug und den nicht befahrbaren Korridor an. Die Anzeige „AR green“ zeigt durch einen grünen Teppich den befahrbaren Korridor an, der auf den nebenliegenden Fahrstreifen führt. „AR red“ zeigt auf Führungsebene eine Einschränkung und überlässt dem Fahrer die Entscheidungsfindung. Die Anzeige

„AR green“ gibt dem Fahrer die Handlungsempfehlung eines Fahrstreifenwechsels (FSW); sie soll die Phase der Entscheidungsfindung im Informationsverarbeitungsprozess des Fahrers verkürzen. Die Ergebnisdarstellung erfolgt nach einem etablierten Auswerteschema. Es teilt sich in die zwei Blöcke Handlungszeiten im Übernahmeprozess und Übernahmequalität bzw. Übernahmeverhalten auf.

Die Handlungszeiten Blickreaktion, Straßenfixation, Hands-on-Zeit, Übernahmezeit, Blick zum Seitenspiegel und Blinken zeigten keinen Unterschied zwischen den drei Versuchsgruppen.

Bei der Eingriffsart (Bremsen, Lenken, kombiniert) zeigt sich, dass von „AR red“ zu „AR green“ die Bremseneingriffe abnehmen und die Lenkeingriffe zunehmen. In der Gruppe „AR green“ sind Lenkeingriffe und kombinierte Eingriffe nahezu ausgewogen. In der Kontrollgruppe dominieren die Lenkeingriffe deutlich.

In den drei Gruppen kontrollierte fast niemand den Innenspiegel, der für dieses Manöver weniger relevant war. Nahezu alle Probanden blickten in den Seitenspiegel ohne Unterschied zwischen den Gruppen. In der Gruppe „AR red“ kontrollierte kein Proband den Bereich neben dem Fahrzeug. Sehr wenige Probanden führten den Fahrstreifenwechsel ohne irgendeine Art von Kontrollblick durch. Einzig in der Gruppe „AR green“ nutzten rund 35 % der Probanden den Blinker nicht. In den Gruppen „AR red“ und „Without AR“ betätigten alle Probanden den Blinker. Die Trajektorienverläufe der Probanden liegen bei der Gruppe „AR green“ näher zusammen. Die Handlungsempfehlung zum Fahrstreifenwechsel führt zu homogeneren Manövern.

Die Verzögerung in Längsrichtung, die Querbefleunigung und die resultierende Beschleunigung zeigen keinen Unterschied zwischen den Gruppen. Die Verzögerung in Längsrichtung weist eine große Standardabweichung auf.

Die zwei Forschungsfragen dieser Veröffentlichung (Lorenz et al., 2014) werden folgendermaßen beantwortet: Die Anzeigen hatten keinen Einfluss auf die Übernahmezeit, aber beeinflussten die Art und Qualität der Fahrerhandlung. Es wird von Anzeigen mit restriktivem Inhalt abgeraten („AR red“) und ein handlungsempfehlender Inhalt („AR green“) empfohlen.

➔ Übernahmezeiten werden nicht beeinflusst.

- Eingriffsart wird beeinflusst: Kontrollgruppe lenkt mehr und bremst weniger. „AR red“ bremst mehr. „AR green“ hat ausschließlich Lenkeingriffe und kombinierte Eingriffe.
- „AR red“ kontrolliert den Korridor neben Fahrzeug gar nicht.
- „AR green“ blinken 35 % nicht.
- „AR green“ zeigt sehr homogenen Trajektorienverlauf.
- Beschleunigungen werden nicht beeinflusst.

Dass Beschleunigungen und Übernahmezeiten nicht durch die Anzeige beeinflusst werden, könnte dadurch erklärt werden, dass eine positive Beeinflussung des Informationsverarbeitungsprozesses nicht unmittelbar in einer schnelleren Übernahmezeit resultieren muss. Der Effekt könnte durch eine niedrigere Beanspruchung des Fahrers abgeschwächt werden, die in der Studie nicht aufgeführt wurde.

Das Anzeigekonzept „AR green“ scheint in diesem Versuch Fehlerfreiheit vorauszusetzen. Als Ausblick wird empfohlen, das Blickverhalten bei besetztem Zielfahrstreifen zu testen. Dabei ist die grüne Farbcodierung problematisch. Sie suggeriert dem Fahrer sehr wahrscheinlich, dass der Zielfahrstreifen frei ist und das System fehlerfrei funktioniert. Der Einfluss auf das Absicherungsverhalten zeigt sich durch die geringere Blinkerbetätigung der Probanden. Besonders bei der Erprobung von farbcodierten Anzeigekonzepten wären ein allgemeiner Sehtest und eine Befragung zu Farbfehlsichtigkeiten wünschenswert.

Der kombinierte **Eingriff** ist nicht ausreichend definiert. Weißgerber & Bengler (2017) schlagen vor, Brems- und Lenkeingriffe, die mit einem Abstand von weniger als 1 Sekunde aufeinander erfolgen, als kombiniert zu bezeichnen. Dieser Wert bezieht sich auf Ergebnisse von Gold, Damböck, Lorenz & Bengler (2013). Die Eingriffsart wird wahrscheinlich zu einem geringen Teil von persönlichen Präferenzen beeinflusst, dafür sehr stark vom durchzuführenden Manöver (Weißgerber & Bengler, 2017). Bei Szenarien, die durch Bremsmanöver gelöst werden können, gibt es keinen Aussagewert.

- D: Bei einem kombinierten Lenkeingriff finden Brems- und Lenkeingriff innerhalb 1 Sekunde statt, ohne die Reihenfolge zu berücksichtigen.

Die **Blickreaktion** ist die Zeit, bis der erste Blick von der fahrfremden Tätigkeit abgewendet wird. Blickreaktionszeiten aus Studien zeigen einen zuverlässigen Mittelwert von 0.5 Sekunden als Reaktion auf einen Reiz (Lorenz et al., 2014; Gold et



al., 2013; Damböck, 2013). Der Proband bekommt bei hochautomatisierten Fahrten die Anweisung, bei einem Übernahmesignal die Fahrzeugführung wieder zu übernehmen. Dadurch muss er keine zeitintensive Handlungsauswahl treffen. Die Blickreaktion eignet sich daher nicht zur Bewertung von Anzeigen in einer Übernahmesituation. Die Blickreaktion wird durch Ermüdung verlängert, durch persönliche Leistungsschwankungen beeinflusst (Müller-Limmroth, 1993) oder durch Erhöhung der Phonzahl verkürzt (Schmidtke, 1993). Sie gibt Auskunft über die Gestaltung von Übernahmeaufforderungen und den Fahrerzustand. Wenn diese Parameter konstant gehalten werden – wie es in den oben genannten Studien der Fall war –, dann sind Unterschiede in der Blickreaktion vermutlich zufallsbedingt oder durch Ausreißer verursacht. Diese könnten durch einen signifikanten Unterschied identifiziert werden und nach einer näheren Einzelfallbetrachtung eventuell von der weiteren Bewertung ausgeschlossen werden.

Für teilautomatisiertes Fahren ist die Blickreaktion nur für diejenigen Fahrer von Bedeutung, die den Blick zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung nicht auf die vorausliegende Szenerie gerichtet haben. Für die Mehrheit der Fahrer wird diese Messgröße keine aussagekräftigen Werte liefern, da der Fahrer im teilautomatisierten Modus zur dauerhaften Überwachung der Fahraufgabe verpflichtet ist (siehe Kapitel 2.1).

Für die Bewertung einer unkontrollierten Übernahmesituation im Falle einer Fehlfunktion ist diese Messgröße nicht anwendbar, da der Fahrer keine Übernahmeaufforderung durch das System erhält. Für die Bewertung des Einflusses eines kHUD auf den Übernahmeprozess bei teilautomatisiertem Fahren und bei Fehlfunktionen hat die Variable Blickreaktion keine Aussagekraft.

Die **Straßenfixierung** ist die Zeit, bis der erste Blick auf die Szenerie gerichtet ist. Studien weisen einen Wertebereich 0.64 bis 1.1 Sekunden auf (Lorenz et al., 2014; Gold et al., 2013; Damböck, 2013). Diesen Wertebereich beeinflussen unterschiedliche Zeitbudgets und Positionierungen der Nebenaufgabe. Werden diese beiden unabhängigen Variablen konstant gehalten, wird die abhängige Variable Straßenfixierung keine Aussage liefern. Für teilautomatisierte Fahrten ist die Straßenfixierung ungeeignet, da der Fahrer zur dauerhaften Überwachung verpflichtet ist. Zur Bewertung eines Anzeigekonzeptes ist die Straßenfixierung nicht geeignet.

Die **Hands-on-Zeit** ist die Zeit von der Übernahmeaufforderung bis mindestens eine Hand das Lenkrad berührt. Die Zeiten variieren zuverlässig zwischen 1.39 bis 1.85

Sekunden (Lorenz et al., 2014; Gold et al., 2013). Größere Abweichungen der Hands-on-Zeit lassen sich durch die Positionierung der Nebenaufgabe erklären oder ob ein Eingabegerät aus den Händen gelegt werden muss. Starke Variationen in den Hands-on-Zeiten können auch dadurch entstehen, dass die linke Hand schneller ans Lenkrad geführt wird, vorausgesetzt die Nebenaufgabe erfolgt durch eine einhändige Bedienung der rechten Hand.

Für das teilautomatisierte Fahren ist der Fahrer zur dauerhaften Überwachung verpflichtet. Das bedeutet nicht explizit, dass die Hände am Lenkrad sein müssen. Der Serienstand erlaubt es dem Fahrer, die Hände für einige Sekunden vom Lenkrad zu nehmen. Erfolgt in dieser Zeit eine Übernahmeaufforderung, sollten zur Auswertung Gruppen mit und ohne Hände am Lenkrad gebildet werden, wodurch die Stichprobengröße ansteigen muss. Bei dauerhafter Überwachung mit den Händen am Lenkrad ist diese Variable ebenfalls nicht geeignet. Zur Bewertung einer Anzeige hat diese Größe keine Aussagekraft.

Bei dieser Variablen muss dokumentiert sein, wo die Hände zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung sind, ob ein Gegenstand weggelegt werden muss und wo sich die linke Hand bei einer einhändigen Bedienung der Nebenaufgabe befindet.

Auch wenn Blickreaktion, Straßenfixierung und Hands-on-Zeiten keine geeigneten Variablen für eine eigenständige Aussage in Bezug auf Anzeigekonzepte sind, müssen sie auf Ausreißer überprüft werden, da sie beim hochautomatisierten Fahren in der Übernahmezeit enthalten sind.

### **3.2 Abhängige Variablen**

In diesem Kapitel werden die abhängigen Variablen vorgestellt, die in beiden Versuchsreihen dieser Arbeit zur Bewertung eines kHUD verwendet werden. Sie müssen sich für teilautomatisierte und hochautomatisierte Fahrten eignen.

#### **Beanspruchung (NASA-TLX)**

Der Effekt eines kHUD könnte in einer komfortableren Übernahme liegen. Das würde sich nicht in einer schnelleren Übernahmezeit äußern, sondern in einer geringeren Beanspruchung des Fahrers. Die Theorie der Task-Difficulty-Homöostase beschreibt eine Verhaltensadaption bei der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen. Der Fahrer reguliert den Schwierigkeitsgrad der Fahraufgabe, indem er die Geschwindigkeit der Handlungsausführung anpasst (Fuller, 2005). Die Beanspruchung kann über den ungewichteten NASA-TLX abgefragt werden (Hart & Staveland, 1988).

### **Subjektive Bewertung der Anzeige**

Probandenbefragungen sind besonders für Anzeigekonzepte eine sinnvolle Ergänzung, um objektive Kennwerte besser interpretieren zu können.

### **Automationsvertrauen**

Eine Anzeige kann im Automatisierungskontext zu einer erhöhten Systemtransparenz beitragen, die sich letztlich in einem höheren Automationsvertrauen zeigen kann (Lee & See, 2004).

### **Wahrgenommene Kritikalität**

Diese Größe dient sehr stark als Qualitätskontrolle des Szenarios. Sie zeigt an, ob die Szenariogestaltung vom Probanden in gewünschter Weise wahrgenommen wird.

### **Häufigkeit der Kollisionen oder der erfolgreichen Übernahmen**

Durch diese Größe werden Probanden für die weitere Auswertung herausgefiltert. Der Aussagewert ist stark abhängig von der Szenariogestaltung, da bei einem statistischen Vierfelder-Test alle Felder ausreichend befüllt sein müssen. Für die weitere Auswertung ist oft die Probandenanzahl zu niedrig. Kollisionen oder nicht erfolgreiche Übernahmen müssen trotzdem dokumentiert werden.

### **Fahrstreifenwechsel und Absicherung**

Für die Analyse der Absicherung des Fahrstreifenwechsels sollte die Anzahl der Probanden mit Spiegelblick in den relevanten Außenspiegel, Schulterblick und Betätigung des Blinkers in Relation zur Anzahl der Probanden, die einen Fahrstreifenwechsel durchgeführt haben, gesetzt werden. Die Anpassung ist nötig, wenn die Probanden szenariobedingt nicht zu einem Fahrstreifenwechsel gezwungen sind. Diese Größe wird wenig Aussagekraft haben, wenn die Situation durch ein Bremsmanöver gelöst werden kann.

### **Übernahmezeit**

Die Übernahmezeiten aus Studien variieren von 2.10 bis 3.03 Sekunden (Lorenz et al., 2014; Gold et al., 2013) bzw. bis 6.0 Sekunden bei einer komfortablen Übernahme (Damböck, 2013). Die Übernahmezeit ist eine wichtige Größe für die Bewertung von Übernahmeprozessen. Zu diesem Zeitpunkt hat der Fahrer bereits aufgrund der aufgenommenen und verarbeiteten Information eine Entscheidung getroffen und beginnt mit dem Manöver.

### **Minimale Time To Collision (TTC<sub>min</sub>)**

Die TTC kann als Beurteilungsgröße für den Fahrer gesehen werden, der seine Handlungen aus ihr ableitet (Färber, 1986 zitiert aus Abendroth & Bruder, 2015). Die

TTC errechnet sich aus dem Abstand  $d$  der Fahrzeuge in m durch die Differenzgeschwindigkeit  $v_{rel}$  der Fahrzeuge in m/s:

$$TTC [s] = \frac{d}{v_{rel}} \quad (3.1)$$

Für konstant verzögernde Hindernisfahrzeuge gibt es die Enhanced TTC (Winner, 2015). Sie wird hier nicht verwendet, da im betrachteten Intervall die Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs bereits beendet ist.

Die TTCmin als kleinster Wert der TTC im Manöververlauf gibt an, wie kritisch die Situation war. Während die Übernahmezeit als Ausgangspunkt zu sehen ist, stellt die TTCmin als kritischsten Zeitpunkt das Ergebnis der Manöverausführung dar. Im Zeitverlauf von der Übernahme bis zur TTCmin stellen Beschleunigungen den Qualitätsaspekt dar.

#### **TTCmin-Zeitpunkt**

Die TTCmin zeigt an, wie kritisch die Situation war. Der Zeitpunkt der TTCmin lokalisiert den kritischsten Zeitpunkt im Übernahmeprozess. Die Verortung der TTCmin kann ein wichtiger Baustein für die Verlaufsanalyse eines Übernahmeprozesses sein.

#### **Maximale Beschleunigung longitudinal, lateral und resultierend**

Alle Beschleunigungen zeigen die qualitative Umsetzung des Manövers durch den Fahrer, beginnend mit der Übernahme und endend mit der TTCmin. Die longitudinale und die laterale Beschleunigung sind stark manöverabhängig; sie leiten sich wiederum aus der Szenariogestaltung ab. Die resultierende Beschleunigung bietet manöverübergreifend den besseren Vergleichswert.

#### **Blick voraus**

Die Größe dient hauptsächlich der Kontrolle, ob die Fahrer tatsächlich die kontaktanaloge Anzeige angeblickt haben und damit die Möglichkeit hatten, die Information der Anzeige wahrzunehmen. Sie ist nur an unkontrollierten Systemgrenzen nötig, da hier das System keine Übernahmeaufforderung ausgibt.

#### **Blicksequenz**

Die Blicksequenz in den Übernahmesituationen soll helfen, ein Betrachtungsintervall für die Blickanalyse festzulegen. Es wird ein langes Betrachtungsintervall von 8 Sekunden gewählt, um den Blickverlauf über die Manöverdurchführung hinaus abbilden zu können.

**Prozentuale Blick-/Verweildauer, absolute Blick-/Verweildauer, Blickhäufigkeit, mittlere Blick-/Verweildauer**

Diese vier Kenngrößen sollen Veränderungen im Blickverhalten beschreiben. Sie beziehen sich jeweils auf die weiter unten definierten Area Of Interest (AOI). Die Blickdauer ist die Summe aus Übergangszeit und Verweildauer (ISO/TS 15007-2). Entsprechend der technischen Möglichkeiten wird vorzugsweise die Verweildauer angegeben, weil sie der reinen Informationsaufnahmezeit entspricht. Bei unterschiedlich großen Zeitintervallen wird die absolute Blick-/Verweildauer nicht aufgeführt.

**Maximale Blickdauer**

Die maximale Blickdauer wird für Betrachtungsintervalle von mehreren Minuten bei teilautomatisierten Fahrten erfasst, um die Sicherheitsgefährdung durch besonders lange Blickabwendungen zu ermitteln.

**Horizontales Blickverhalten**

Der horizontale Blickwinkel wird für Betrachtungsintervalle von mehreren Minuten bei teilautomatisierten Fahrten erfasst. Literaturquellen führen einen größeren Winkelbereich auf eine niedrigere Beanspruchung des Fahrers zurück. Während Drummond (1989), Gregersen (1994) und Mayhew & Simpson (1996) diesen Effekt für Fahrnovizen und Fahrexperten feststellten, konnte Damböck (2013) diesen Effekt bei einem steigenden Automatisierungsgrad nachweisen.

## **4 Messtechnik**

In diesem Kapitel werden der Fahrsimulator und die Messtechnik beschrieben, sofern sie sich für beide Versuchsreihen gleichen. Abweichungen in der Konfiguration sind unter den einzelnen Versuchsreihen vermerkt.

### **4.1 Fahrsimulator**

Hardwareseitig besteht der statische Fahrsimulator aus einem BMW 6er Cabrio (BMW E64) mit Automatikgetriebe. Die Frontansicht wird über drei Projektionsflächen zu einer Gesamtsicht von nahezu 180° aufgespannt (siehe Abbildung 4-1). Die Projektionsrichtungen sind auf den Augpunkt des Fahrers ausgerichtet. Für jeden der drei Rückspiegel gibt es in der Rückansicht eine eigene Projektionsfläche.



Abbildung 4-1: LINKS – Schematische Draufsicht des Simulators; RECHTS – Außenansicht des Fahrzeugs mit Stadtszenerie (LfE Bilddatenbank).

Das Fahrzeug ist mit einem aktiven Lenkrad ausgestattet, auf das ein Lenkmoment aufgeschaltet wird. Das Kombiinstrument ist durch einen frei programmierbaren Bildschirm ersetzt. Motorengeräusche werden über die fahrzeugeigenen Lautsprecher eingespielt. Nicken, Wanken und Gieren werden nur über die Simulationssoftware eingespielt.

Softwareseitig wird der Fahrsimulator mit der Simulationsumgebung SILAB der Firma Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH (WIVW GmbH) betrieben. Über SILAB können alle wichtigen Übernahmekenngrößen aufgezeichnet werden. Dazu gehören die Geschwindigkeit sowie die Abstände des Ego-Fahrzeugs zu anderen Verkehrsteilnehmern oder der Infrastruktur aus der Szenerie. Das Mockup ist über einen CANBUS mit der Simulationssoftware SILAB verbunden.

## 4.2 Blickerfassung

Zur Aufzeichnung des Blickverhaltens der Probanden wurde das Blickerfassungssystem Dikablis (Digitales kabelloses Blickerfassungssystem) der Firma Ergoneers GmbH verwendet. Das kopfbasierte System ermöglicht im Vergleich zu berührungslosen Systemen eine zuverlässige Erkennung von Spiegel- und Schulterblicken. Die Head-Unit der Dikablisbrille (siehe Abbildung 4-2) besteht aus einer nach vorne gerichteten Szenenkamera (Field-Cam) und einer auf das linke Auge gerichteten Augenkamera (Eye-Cam). Hier wird das Auge mit einer Infrarotleuchtdiode ausgeleuchtet, um die Pupille zu detektieren. Die Kamerabilder der Szenerie und der

Pupille müssen durch eine Kalibrierung überlagert werden. Die Kameras zeichnen mit einer Frequenz von 25 Hz auf.

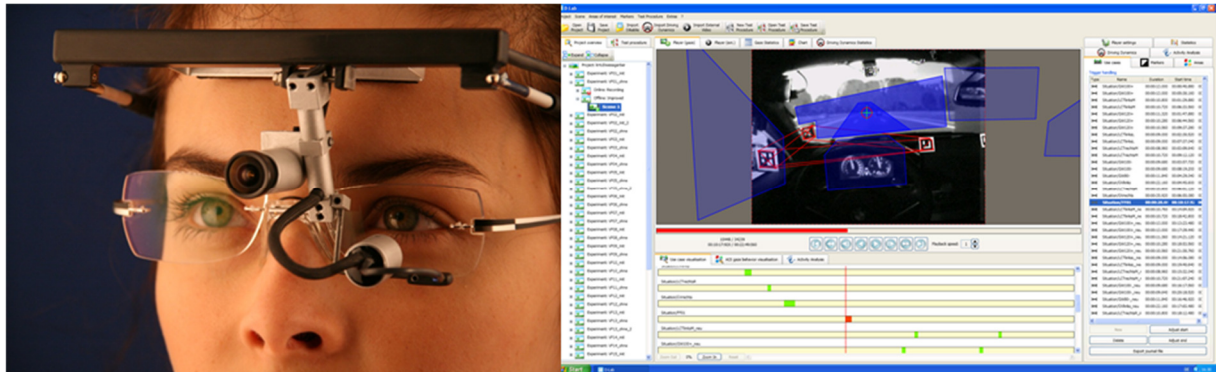


Abbildung 4-2: LINKS – Kopfeinheit des Blickerfassungssystems Dikablis (Ergoneers GmbH); RECHTS – Oberfläche der Auswertungssoftware D-Lab.

Die Aufbereitung der Daten erfolgt mit der Auswertesoftware D-Lab (siehe Abbildung 4-2). Hier können die Blickdaten für unterschiedliche Betrachtungsintervalle und statische Areas of Interest (AOI) automatisch ausgelesen werden. Für dynamische AOI bzw. Objekte – wie es bei der kontaktanalogen Markierung eines Verkehrszeichens oder Fahrzeugs der Fall ist – sind die Ergebnisse der automatischen Blickauswertung nur noch bedingt aussagekräftig. Eine zeitaufwendige Alternative ist die manuelle Auswertung der Blickdaten, die in den Kapiteln 5.3.3 und 6.3.3 durchgeführt wurde.

### 4.3 Videoaufzeichnung

Die Probanden wurden während der gesamten Versuchsfahrt mit einer Videokamera aufgenommen. Diese Videodaten waren nicht mit den restlichen Daten synchronisiert. Sie dienen dazu, in der Auswertungsphase unklare Datenlagen zu erklären. Die Videokamera war auf der Höhe der Kopfstütze des Beifahrersitzes montiert und erfasste die Probanden von rechts im Profil.

## 5 Simulatorstudie teilautomatisiert - Fehlfunktion

Diese Studie soll aufzeigen, ob die Art der visuellen Rückmeldung des Systemzustands bei wiederholtem Auslösen einer Fehlfunktion in Längsführung (ACC) das Übernahmeverhalten des Fahrers eines automatisierten Fahrzeugs beeinflusst. Dazu wurde als Baseline eine seriennahe Visualisierung im Kombiinstrument einem

zusätzlichen kontaktanalogen Head-Up Display gegenübergestellt. Beide Anzeigen liefern dem Fahrer die grundlegenden Informationen, welche regelrelevanten Objekte vom System erkannt sind. Die schlagwortartige Einordnung der Studie in den Grundlagenteil (Kapitel 2) lautet:

- System Kategorie B.
- Teilautomatisiert (Level 2).
- Führungsebene.
- Fehlfunktion 1 entspricht wissensbasiertem Verhalten.
- Fehlfunktion 2 entspricht regelbasiertem Verhalten.

Vorversuche zu dieser Studie wurden von Lukas Schablitzki in einer Bachelorarbeit durchgeführt (Schablitzki, 2015). Die Daten für diese Versuchsreihe wurden im März 2015 von mir erhoben. Die Arbeiten unterstützte Luis Kalb als studentische Hilfskraft.

## **5.1 Methodik**

### **5.1.1 Versuchsaufbau**

Die Versuchsreihe wurde ohne die Projektionsfläche vorne rechts durchgeführt, da ein Beamer defekt war. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind davon nicht betroffen, weil nur Fahrstreifenwechsel nach links durchgeführt wurden.

#### **5.1.1.1 Automationsumfang**

Die implementierte Automation setzte sich aus folgenden Einzelkomponenten zusammen: ein Abstandsregeltempomat (ACC) mit einer Verkehrszeichenerkennung für die Längsführung und ein Spurhalteassistent (LKAS) mit einer Spurwechselunterstützung (LCS) für die Querverführung. Der tote Winkel wurde nicht vom System überwacht. Der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug war fest voreingestellt auf 2.2 Sekunden und konnte von den Probanden nicht verändert werden. Bei freier Fahrt wurde das Tempolimit mittels einer Verkehrszeichenerkennung in die Geschwindigkeitsregelung übernommen. Bei einem Geschwindigkeitslimit wurde 100 Meter vor dem Verkehrszeichen mit der Verzögerung auf die Zielgeschwindigkeit begonnen. Beschleunigungen auf eine höhere Geschwindigkeit wurden vom System ab dem Verkehrszeichen begonnen. Ein Fahrstreifenwechsel konnte von den Probanden durch das Betätigen des Blinkers initiiert werden. Der Fahrstreifenwechsel musste vorher von den Probanden durch



einen Schulter-/Spiegelblick abgesichert werden (siehe auch Probandeninstruktionen in 5.1.1.6). Die Automation konnte über einen Knopf an der Lenkradspeiche aktiviert und deaktiviert werden. Zusätzlich konnte die Automation über Brems- und Lenkeingriffe deaktiviert werden.

### 5.1.1.2 Anzeigekonzept im kHUD und Kombiinstrument

Die Anzeigesymbole sind einfarbig gehalten. Auf eine Farbcodierung wurde verzichtet, weil die Position und die Form der Anzeigeelemente ausreichend Information über den Automationszustand transportieren. Als Farbe wurde ein leuchtendes Gelb gewählt, um bei jeder Hintergrundfarbe einen größtmöglichen Kontrast zu erzielen. Der Entwurf und eine detaillierte Prüfung dieses Anzeigekonzeptes auf ergonomische Anforderungen fanden im Vorfeld statt (Weißgerber, 2011).

Die Auswirkung einzelner Anzeigesymbole wurde bereits bei der Fehlererkennung der Verkehrszeichenerkennung (Weißgerber et al., 2012b), der Falscherkennung von Baustellenmarkierungen (Weißgerber, Damböck, Kienle & Bengler, 2012a) und bei der Falscherkennung von Fahrbahnmarkierungen (Damböck, Weißgerber, Kienle & Bengler, 2012b) ermittelt.

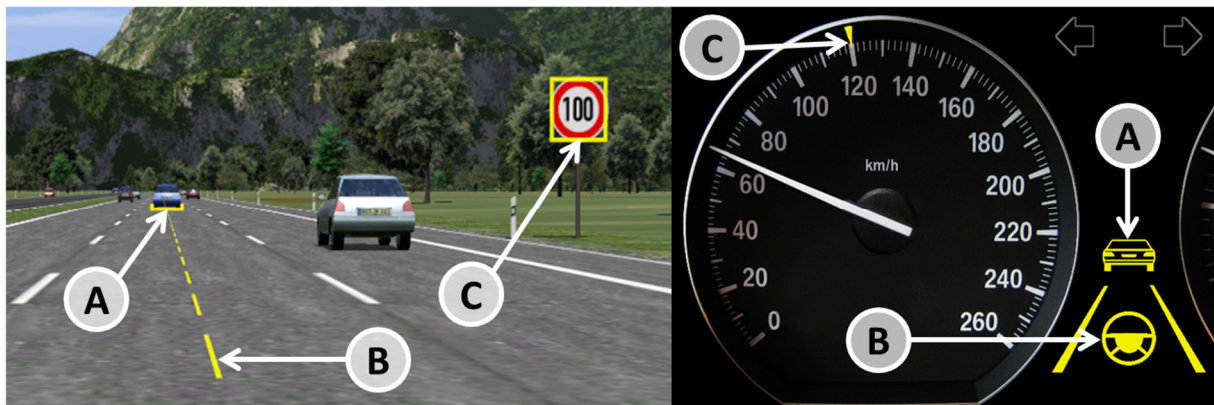


Abbildung 5-1: LINKS – Anzeigesymbole A) Klammer, B) Trajektorie und C) Rahmen im kHUD; RECHTS – Anzeigesymbole A) Fahrzeug, B) Lenkrad mit Fahrstreifenmarkierung und C) Pfeil im Kombiinstrument.

Abbildung 5-1 zeigt das Anzeigekonzept im kHUD und im Kombiinstrument. Beide Anzeigekonzepte visualisieren durch drei Symbole die wesentlichen Funktionen der Automation. Für die Fahrzeugführung relevante Objekte werden kontaktanalog markiert oder durch ein entsprechendes Symbol im Kombiinstrument angezeigt, um dem Fahrer zu vermitteln, welche Objekte die simulierte Umfelderkennung erfasst hat.

In der kontaktanalogen Variante werden erkannte Verkehrszeichen durch einen Rahmen (C) markiert, während im Kombiinstrument das erkannte Tempolimit durch einen Pfeil (C) im Zahlenkranz des Tachos angezeigt wird. Der erkannte Fahrstreifen wird kontaktanalog durch eine mittig im Fahrstreifen positionierte Trajektorie (B) markiert. Auf konventionelle Weise wird die Fahrstreifenerkennung durch ein Lenkradsymbol mit Fahrstreifenmarkierung (B) angezeigt. Die dritte Funktion des ACC wird durch eine kontaktanaloge Klammer am vorausfahrenden Fahrzeug (A) bzw. durch ein Fahrzeugsymbol (A) im Kombiinstrument verdeutlicht.

Probanden in der Bedingung MIT\_kHUD hatten sowohl die Anzeige des kHUD als auch das Kombiinstrument zur Verfügung; Probanden der Bedingung OHNE\_kHUD hatten nur das Kombiinstrument, um lediglich den Systemzustand abzufragen.

Die Anzeige zeigt keine Handlungsempfehlungen an. Es wird der Systemzustand der jeweiligen Sensorik visualisiert. Damit sieht der Fahrer, was die Automation „sieht“ und kann den Abgleich von virtueller Information und realer Szenerie selbst vornehmen (siehe Kapitel 2.3). Diese Darstellung hat Vorteile bei zwei Fehlertypen:

- ➔ D: Eine Fehlerkennung liegt vor, wenn das System ein vorhandenes regelrelevantes Objekt nicht erkannt hat.
- ➔ D: Eine Falscherkennung liegt vor, wenn das System ein anderes regelirrelevantes Objekt der gleichen Objektklasse erkannt hat.

Die Fehlerkennung kann der Fahrer durch das fehlende Anzeigesymbol in kHUD und Kombiinstrument erkennen. Die Falscherkennung kann der Fahrer nur im kHUD durch die eindeutige Objektzuordnung erkennen. Diese Studie befasst sich mit einer Fehlerkennung.

#### **5.1.1.3 Versuchsstrecke**

Die Versuchsstrecke war für alle Probanden bei allen Bedingungen identisch. Auf der dreistreifigen Autobahn wurden mehrere Fahrmanöver, wie Geschwindigkeitswechsel und Fahrstreifenwechsel, durchgeführt. Die erste Fehlfunktion (FF1) tritt 11 Minuten und die zweite Fehlfunktion (FF2) tritt 16 Minuten nach Fahrtbeginn auf. Die Fehlfunktionen sind identisch.

#### **5.1.1.4 Szenariobeschreibung Fehlfunktion (FF)**

Ego-Fahrzeug und vorausfahrendes Fahrzeug bewegen sich bis zur Fehlfunktion konstant mit 120 km/h und einer Zeitlücke von 2.2 Sekunden. Das Vorliegen einer Fehlfunktion kann der Fahrer im kHUD durch das Fehlen der Klammer am

vorausfahrenden Fahrzeug (siehe Abbildung 5-2 links) und durch das Erlöschen des Fahrzeugsymbols im Kombiinstrument (siehe Abbildung 5-1 rechts) erkennen. Abbildung 5-2 rechts zeigt die Verkehrssituation zum Zeitpunkt der Fehlfunktion. Der Verkehr auf dem linken Nachbarstreifen lässt einen Fahrstreifenwechsel zur Situationsbewältigung zu. Mit dem Auslösen der Fehlfunktion beginnt das vorausfahrende Fahrzeug mit einer Verzögerung von  $5 \text{ m/s}^2$  auf eine Geschwindigkeit von  $70 \text{ km/h}$  zu bremsen. Dem Fahrer bleiben  $6.6$  Sekunden bis zur Kollision. Dieses Szenario mit einer konstanten Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs wurde gewählt, da die kinästhetischen Einflüsse durch Beschleunigung oder Verzögerung im Fahrsimulator nicht nachempfunden werden können und damit schwerer auf die Realität übertragbar wären. In diesem konkreten Fall liegt eine Fehlerkennung der Umfeldsensorik vor, die im Folgenden weiterhin als Fehlfunktion bezeichnet wird. Dieses Szenario entspricht einer Führungsaufgabe (siehe Kapitel 2.2).

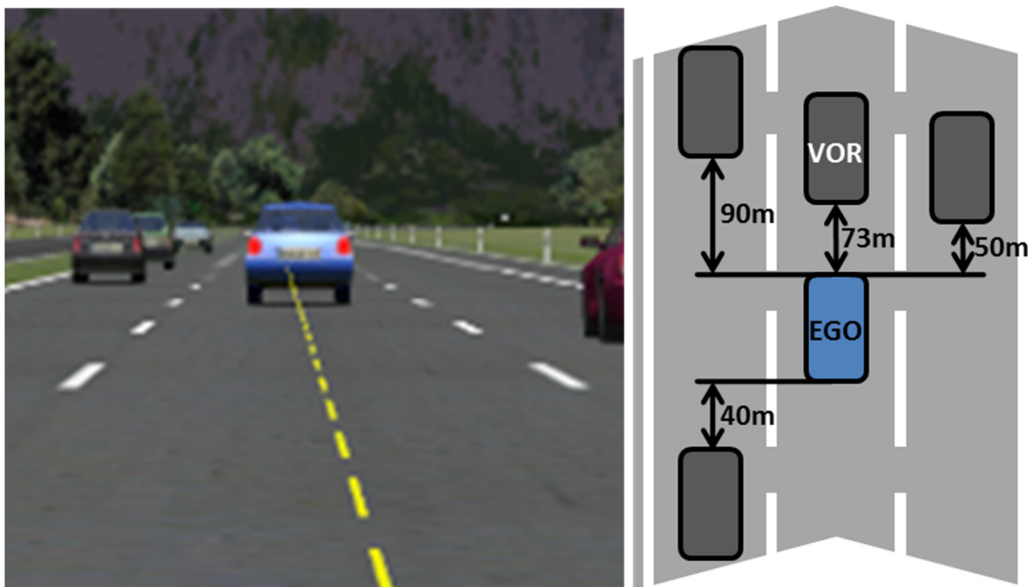


Abbildung 5-2: LINKS – Anzeige im kHUD aus der Sicht des Fahrers zum Zeitpunkt der Fehlfunktion; RECHTS – Draufsicht der Verkehrssituation.

#### 5.1.1.5 Nebenaufgabe

Um den Probanden eine dauerhafte visuelle Überwachung des Systems zu ermöglichen, wurde ihnen eine leichte akustische Nebenaufgabe gegeben. Es wurden Zahlen von eins bis neun eingespielt. Jede „Zwei“ und jede „Sieben“ mussten die Probanden mit einem „Ja“ bestätigen. Die Versuchsdauer war mit  $16$  Minuten sehr kurz und die Nebenaufgabe nicht sehr fordernd. Daher kann bei den Probanden von

einem mittleren Aktivierungsniveau ausgegangen werden. Problematiken der Daueraufmerksamkeit und der Vigilanz können ausgeschlossen werden. Die Nebenaufgabe wurde nicht ausgewertet.

#### **5.1.1.6 Probandeninstruktionen**

Die Probanden wurden mit der Information zum Versuch eingeladen, die Nutzung und Gebrauchstauglichkeit der bestehenden Automation zu testen. Sie wurden über den Automatisierungsgrad „teilautomatisiert“ bzw. „Level 2 – Combined Function Automation“ und die damit verbundene Verpflichtung, das System dauerhaft zu überwachen, aufgeklärt (siehe Kapitel 2.1). Ihnen wurde verdeutlicht, dass bei derzeitiger Gesetzeslage der Hersteller keine Haftung übernimmt, sondern allein der Fahrzeugführer haftet. Die Straßenverkehrsordnung war strikt einzuhalten. Es musste mit mindestens einer Hand Kontakt zum Lenkrad gehalten werden. Die Probanden mussten auf der Strecke Fahrstreifenwechsel durch Betätigung des Blinkers initiieren und selbstständig absichern. In diesem Zusammenhang wurde vermittelt, dass das Vermeiden von Kollisionen die wichtigste Fahraufgabe darstellte.

#### **5.1.2 Versuchsdesign**

Es wurde eine unverbundene Stichprobe mit dem Faktor Anzeige (MIT\_kHUD, OHNE\_kHUD) und dem messwiederholten Faktor Fehlfunktion (FF1, FF2) gewählt. Beide Probandengruppen sollten in Abhängigkeit der Anzeigenart einen Erstkontakt mit einer Fehlfunktion erleben, um den Einfluss einer kontaktanalogen Anzeige auf das Fahrerverhalten zu ermitteln. Durch die Wiederholung der Fehlfunktion sollten bewusst Lerneffekte ermittelt werden.

#### **5.1.3 Probandenkollektiv**

Die Teilnehmer der Probandengruppe MIT\_kHUD (N=21) waren zwischen 24 und 66 Jahre alt (M=41.5 Jahre, SD=15.5 Jahre); es handelte sich um 7 Frauen und 14 Männer. Der Führerscheinbesitz wurde mit M=23.6 Jahre (SD=15.5 Jahre) angegeben bei einer jährlichen Kilometerleistung von M=16071 km/a (SD=5732 km/a).

Die Teilnehmer der Probandengruppe OHNE\_kHUD (N=21) waren zwischen 22 und 66 Jahre alt (M=43.3 Jahre, SD=17.2 Jahre); es handelte sich um 7 Frauen und 14 Männer. Der Führerscheinbesitz wurde mit M=26.0 Jahre (SD=16.9 Jahre)

angegeben, bei einer jährlichen Kilometerleistung von  $M=13810$  km/a ( $SD=6829$  km/a).

Die Probandengruppen sind bezüglich Alter, Geschlechterverteilung, Dauer des Führerscheinbesitzes und jährlicher Kilometerleistung der Teilnehmer vergleichbar. Die Probanden sind im Durchschnitt als fahrerfahren anzusehen, da das Teilnahmekriterium bei mindestens sieben Jahren Führerscheinbesitz oder 100.000 Kilometern Gesamtfahrleistung angesetzt worden war. Gemäß dieser Grenzwerte hat ein Fahrer sein Novizenstadium verlassen (Willmes-Lenz, 2002). Alle Probanden haben einen Sehtest vor der Versuchsfahrt absolviert und bestanden. In der Gruppe MIT\_kHUD hatte kein Proband und in der Gruppe OHNE\_kHUD hatten drei Probanden eine Rot-Grün-Farbfehlsichtigkeit. Da alle Anzeigesymbole im kHUD und im Kombiinstrument gelb dargestellt und nicht farbcodiert waren, hatte das keine Auswirkung auf den Versuch. Alle Probanden haben in einer Einführungsfahrt Automation und Anzeigekonzept gemäß der jeweiligen Bedingung ausführlich kennenlernen können.

## **5.2 Hypothesen**

In Tabelle 5-1 sind die statistisch nachprüfbareren Hypothesen für jede abhängige Variable formuliert. Ihre Gliederung entspricht dem Aufbau der Arbeit. Bei den Blickdaten ist aus Platzgründen keine Unterteilung in die einzelnen Areas of Interest (AOI) vorgenommen worden. Die Hypothesen sind nur für die unabhängige Variable „Anzeige“ formuliert. Lerneffekte durch das wiederholte Erleben der Fehlfunktion sind in den jeweiligen Kapiteln ausgeführt.

Die übergeordnete Fragestellung möchte klären, auf welche abhängigen Variablen das kHUD einen Einfluss hat und wie zukünftig ein kHUD bewertet werden kann. Daher wird eine Vielzahl von Variablen abgefragt, die thematisch zusammengefasst sind. Die subjektiven Daten dienen der Ergänzung der objektiven Daten, die sich aus Übernahmekenngrößen und Blickkenngröße zusammensetzen. Die Übernahmekenngrößen vereinen Variablen, die bisher zur Beschreibung von Übernahmeprozessen des automatisierten Fahrens genutzt wurden. Hier stellt sich die Frage, ob diese Größen auch zur Bewertung einer kontaktanalogen Anzeige geeignet sind. Die Blickkenngrößen sollen die Frage beantworten, ob das kHUD Veränderungen im Blickverhalten bewirkt, die sicherheitskritisch sind.

Tabelle 5-1: Hypothesen der Versuchsreihe „Fehlfunktion“ nach Kapiteln strukturiert.

<b>Subjektive Daten bei Fehlfunktion (FF) - Kapitel 5.3.1</b>		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Beanspruchung nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Beanspruchung.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Automationsvertrauen nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Automationsvertrauen.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Kritikalitätsempfinden nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Kritikalitätsempfinden.	
<b>Übernahmekenngrößen bei Fehlfunktion (FF) - Kapitel 5.3.2</b>		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Häufigkeit der Kollisionen nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Häufigkeit der Kollisionen.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Absicherungsverhalten nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Absicherungsverhalten.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Übernahmezeit nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Übernahmezeit.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die TTCmin nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die TTCmin.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst den Zeitpunkt der TTCmin nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst den Zeitpunkt der TTCmin.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Verzögerung longitudinal nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Verzögerung longitudinal.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Beschleunigung lateral nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Beschleunigung lateral.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale resultierende Beschleunigung nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale resultierende Beschleunigung.	
<b>Blickkenngrößen bei Fehlfunktion (FF) - Kapitel 5.3.3</b>		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Verweildauer auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Verweildauer auf die AOIs.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Verweildauer auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Verweildauer auf die AOIs.	
<b>Blickkenngrößen bei Normalfahrt (NF) - Kapitel 5.3.4</b>		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Blickdauer auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Blickdauer auf die AOIs.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Blickdauer auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Blickdauer auf die AOIs.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Blickdauer auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Blickdauer auf die AOIs.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst den horizontalen Blickwinkel auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst den horizontalen Blickwinkel auf die AOIs.	

## 5.3 Ergebnisse

Das Ergebniskapitel ist in vier Kapitel mit einer jeweils abschließenden Zusammenfassung untergliedert. In Kapitel 5.3.1 werden die subjektiven Befragungsergebnisse der Probanden dargestellt. Kapitel 5.3.2 beschreibt anhand von Übernahmekenngrößen das Übernahmeverhalten und die Übernahmequalität. Kapitel 5.3.3 befasst sich mit den Blickkenngrößen während der Fehlfunktionen und Kapitel 5.3.4 mit den Blickkenngrößen während der Normalfahrt. Alle statistischen Tests verwenden ein Signifikanzniveau von 5 %. Da die Gruppen ähnlich groß sind, sind t-Test und ANOVA robust gegenüber der Verletzung der Normalverteilung und der Varianzhomogenität (Bortz & Schuster, 2010).

Jede Kenngröße endet mit einer stichpunktartigen Auflistung der Erkenntnisse. Dabei wird zwischen → E: Ergebnisse aus Versuchsdaten, → M: Methodischer Handlungsbedarf und → F: Forschungsbedarf und Fragestellung unterschieden.

### 5.3.1 Subjektive Daten bei Fehlfunktion (FF)

#### 5.3.1.1 Beanspruchung (NASA-TLX)

Nach der Versuchsfahrt wurde die Beanspruchung für die gesamte Fahrzeit über den ungewichteten NASA-TLX abgefragt (Hart & Staveland, 1988). Ein t-Test mit einem Signifikanzniveau von 5 % zeigt zwischen den Gruppen MIT\_kHUD (M=36.3, SD=13.2) und OHNE\_kHUD (M=41.6, SD=16.0) keinen Unterschied in der Beanspruchung ( $t(40)=-1.194$ ,  $p=.240$ ). Die geringe Varianz weist auf einen aussagekräftigen Mittelwert hin.

→ E: Die Art der Anzeige hat keinen Einfluss auf die Beanspruchung während der gesamten Fahrt.

#### 5.3.1.2 Bewertung kHUD und Kombiinstrument

Nach der Versuchsfahrt durften die Probanden zehn Aussagen (A1-A10) zu Anzeige und Fehlfunktion bewerten. Die Gruppe MIT\_kHUD wurde ausschließlich über das kontaktanaloge Head-Up Display (kHUD) und die Gruppe OHNE\_kHUD über das Kombiinstrument (Kombi) befragt. Den Aussagen konnte mit einer siebenstufigen Likert-Skala voll zugestimmt (1) oder gar nicht zugestimmt (7) werden. Tabelle 5-2 zeigt die Ergebnisse der Probandenbewertung mit Mittelwert, Standardabweichung

und statistischen Ergebnissen. Es wurde ein t-Test mit einem Signifikanzniveau von 5 % gerechnet.

*Tabelle 5-2: Ergebnisse zu den Aussagen 1–10. Angegeben sind die Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) für die Gruppen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD und der t-Test der unverbundenen Stichprobe.*

	MIT_kHUD M/SD		OHNE_kHUD M/SD		t-Test
A1	3.19	1.69	2.81	1.44	t(40)=.787, p=.436
A2	3.38	2.18	5.00	2.05	t(40)=-2.480, p=.017
A3	2.86	2.10	5.14	1.98	t(40)=-3.623, p=.001
A4	4.14	1.88	5.19	1.83	t(40)=-1.829, p=.075
A5	4.48	2.23	2.29	1.55	t(35.737)=3.696, p=.001
A6	1.90	0.89	2.95	1.86	t(28.713)=-2.332, p=.027
A7	1.52	0.68	1.52	0.68	t(40)=.000, p=1.000
A8	1.90	1.22	1.57	0.75	t(40)=1.067, p=.292
A9	1.95	1.24	2.67	1.28	t(40)=-1.835, p=.074
A10	6.24	1.09	5.57	1.16	t(40)=1.914, p=.063

**Aussage 1: Ich konnte die Fehlfunktionen schnell erkennen.**

Die Anzeige hat keinen Einfluss auf die subjektive Einschätzung, wie schnell die Fehlfunktionen erkannt wurden. Beide Gruppen liegen im Mittelfeld.

**Aussage 2: Die Anzeige (kHUD/Kombi) hat mir geholfen, die Fehlfunktion zu erkennen.**

Den Fahrern MIT\_kHUD hat die Anzeige signifikant mehr geholfen, die Fehlfunktion zu erkennen. Es zeigt sich der Positionierungsvorteil des kHUD im zentralen Sehbereich.

**Aussage 3: Die Anzeige (kHUD/Kombi) hat mir geholfen zu verstehen, welche Fehlfunktion im Gesamtsystem vorliegt.**

Die Fahrer MIT\_kHUD hatten ein signifikant besseres Systemverständnis über die Art der Fehlfunktion. Das ist nicht dem Inhalt des kHUD, sondern der Positionierung zuzuschreiben. Das Anzeigekonzept war für beide Anzeigen vergleichbar gestaltet (siehe Abbildung 5-1).

**Aussage 4: Durch die Anzeige (kHUD/Kombi) wusste ich, wie ich handeln muss.**

Fahrer MIT\_kHUD wussten durch die Anzeige tendenziell besser, wie sie handeln müssen. Dieser Effekt ist fraglich, da beide Anzeigen inhaltsgleich gestaltet sind. Im Mittel war die Gruppe MIT\_kHUD der Aussage neutral und OHNE\_kHUD eher ablehnend gegenübergestanden. Die schlechte Bewertung der beiden Anzeigen deckt



sich sehr gut mit der Tatsache, dass sie keine Handlungshinweise, sondern nur Systemzustände anzeigten (siehe Abbildung 5-1).

**Aussage 5: Während der Fehlfunktion habe ich die Anzeige (kHUD/Kombi) gar nicht beachtet.**

Die Fahrer MIT\_kHUD haben die Anzeige signifikant mehr beachtet. Dieser Effekt liegt an der entfernten Positionierung des Kombiinstruments vom Fahrgeschehen. Der Mittelwert MIT\_kHUD liegt im neutralen Bereich der Bewertungsskala.

**Aussage 6: Es war leicht, die Information zu finden, die ich brauchte.**

Für die Fahrer MIT\_kHUD war es signifikant leichter die benötigte Information zu finden. Durch die ungenaue Formulierung der Aussage dürfte hier die unterschiedliche Position der Anzeigen diesen Effekt erzielen.

**Aussage 7: Die Information, die bereitgestellt wurde, war einfach zu verstehen.**

Durch den identischen Informationsgehalt der Anzeige gibt es keinen Effekt. Beide Anzeigen bekommen nahezu volle Zustimmung.

**Aussage 8: Die Anordnung der Information war klar und unmissverständlich.**

Die Ergebnisse dieser Aussage zeigen keinen Effekt der Anzeige. Im kHUD ist die Anordnung ohnehin durch die Objekte in der Szenerie vorgegeben. Beide Anzeigen werden gut bis sehr gut bewertet.

**Aussage 9: In der Anzeige (kHUD/Kombi) wurden alle nötigen Informationen zur Bewältigung der Fahraufgabe angezeigt.**

Tendenziell bewerteten die Probanden das kHUD bezüglich Vollständigkeit besser. Prinzipiell unterschieden sich die Anzeigen in der Aussagekraft – Objekt erkannt / Objekt nicht erkannt – nicht. Das kHUD liefert zusätzlich noch die Information, welches Objekt erkannt ist. Beide Anzeigen werden gut bewertet.

**Aussage 10: Die Anzeige (kHUD/Kombi) hat mich von der Fahraufgabe abgelenkt.**

Tendenziell wurde das kHUD als weniger ablenkend bewertet, obwohl es immer im zentralen Sehbereich liegt. Die Blickabwendung von der Szenerie zum Kombiinstrument wurde scheinbar etwas störender empfunden. Beide Anzeigen wurden als wenig ablenkend bewertet.

- E: Das kHUD hilft, Fehlfunktionen zu erkennen.
- E: Das kHUD erhöht das Systemverständnis.
- E: Das kHUD wird während der Fehlfunktion mehr beachtet als das Kombiinstrument.

- E: Der Informationsgehalt beider Anzeigen wird sehr gut verstanden.
- E: Beide Anzeigen wurden als wenig ablenkend bewertet.

### 5.3.1.3 Automationsvertrauen

Abbildung 5-3 zeigt das Automationsvertrauen der Probanden vor und nach beiden Fehlfunktionen (FF). Beide Bewertungen wurden über eine siebenstufige Likert-Skala mit den Extrema „überhaupt nicht vertraut“ (1) bis „sehr stark vertraut“ (7) nach der Versuchsfahrt abgefragt. Es wurde eine einfaktorische Varianzanalyse mit Messwiederholung bei einem Signifikanzniveau von 5 % gerechnet.

Die Daten zeigen keinen Einfluss der Anzeige ( $F_A(1,40)=2.206$ ,  $p=.145$ ,  $\eta^2=.052$ ) und auch keinen Interaktionseffekt ( $F_{A*FF}(1,40)=.005$ ,  $p=.941$ ,  $\eta^2=.000$ ). Durch das Erleben der zwei Fehlfunktionen nimmt in beiden Gruppen das Vertrauen signifikant ab ( $F_{FF}(1,40)=29.152$ ,  $p<.001$ ,  $\eta^2=.422$ ).

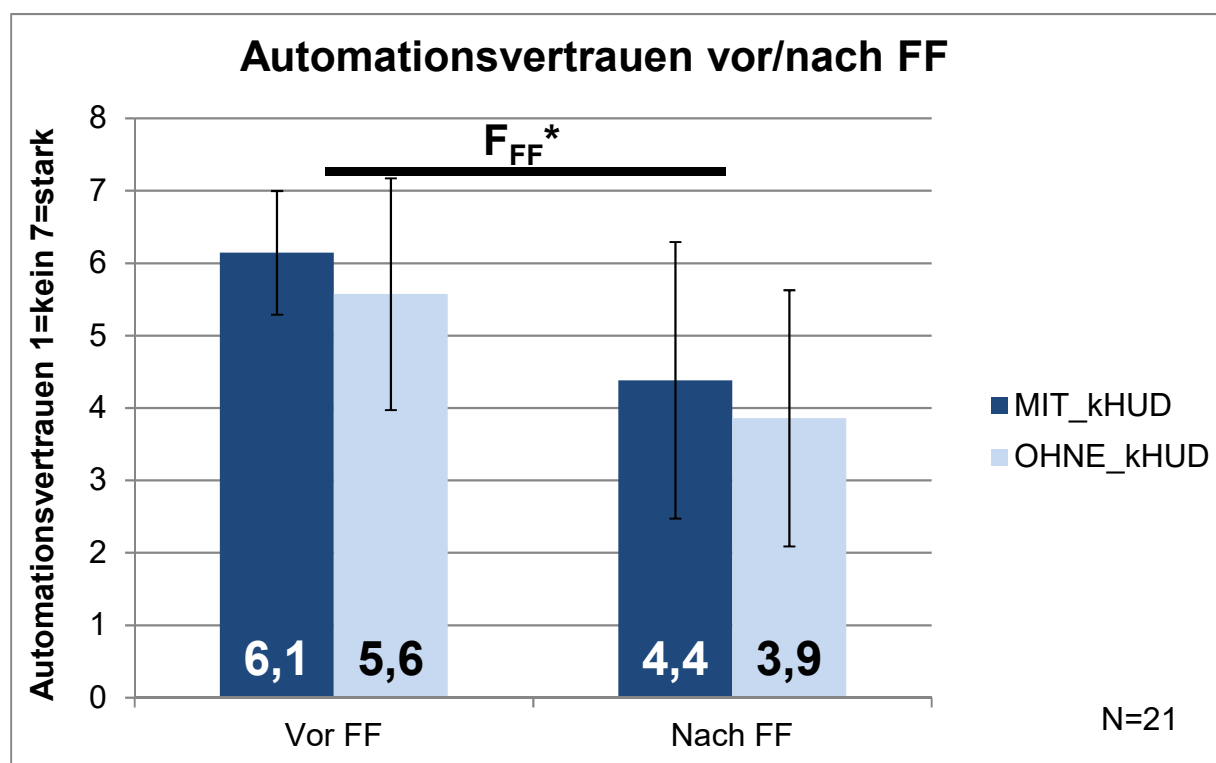


Abbildung 5-3: Automationsvertrauen der Probanden vor und nach beiden Fehlfunktionen (FF) von 1=kein Vertrauen bis 7=starkes Vertrauen.

Ob bereits nach der ersten Fehlfunktion ein Vertrauensverlust vorlag und wie groß er war, kann durch die subjektive Befragung am Ende der gesamten Versuchsfahrt nicht geklärt werden. Vermutlich gab es schon nach der ersten Fehlfunktion einen Vertrauensverlust. Hinweise dazu liefert die starke Reduzierung der maximalen

Blickdauer bei Normalfahrt vor und nach der ersten Fehlfunktion (siehe weiter unten Kapitel 5.3.4.4).

- ➔ E: Die Anzeige hat keinen Einfluss auf das Automationsvertrauen.
- ➔ E: Durch das Erleben von zwei Fehlfunktionen sinkt das Automationsvertrauen für MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD stark.

### 5.3.1.4 Wahrgenommene Kritikalität

Abbildung 5-4 zeigt, wie kritisch die Probanden beider Gruppen beide Fehlfunktionen einschätzten. Die Bewertungen wurden über eine zwanzigstufige Likert-Skala mit den Extrema „überhaupt nicht kritisch“ (1) bis „extrem kritisch“ (20) unmittelbar nach dem Erleben der Fehlfunktionen vom Versuchsleiter über das Mikrofon abgefragt. Es wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung bei einem Signifikanzniveau von 5 % gerechnet.

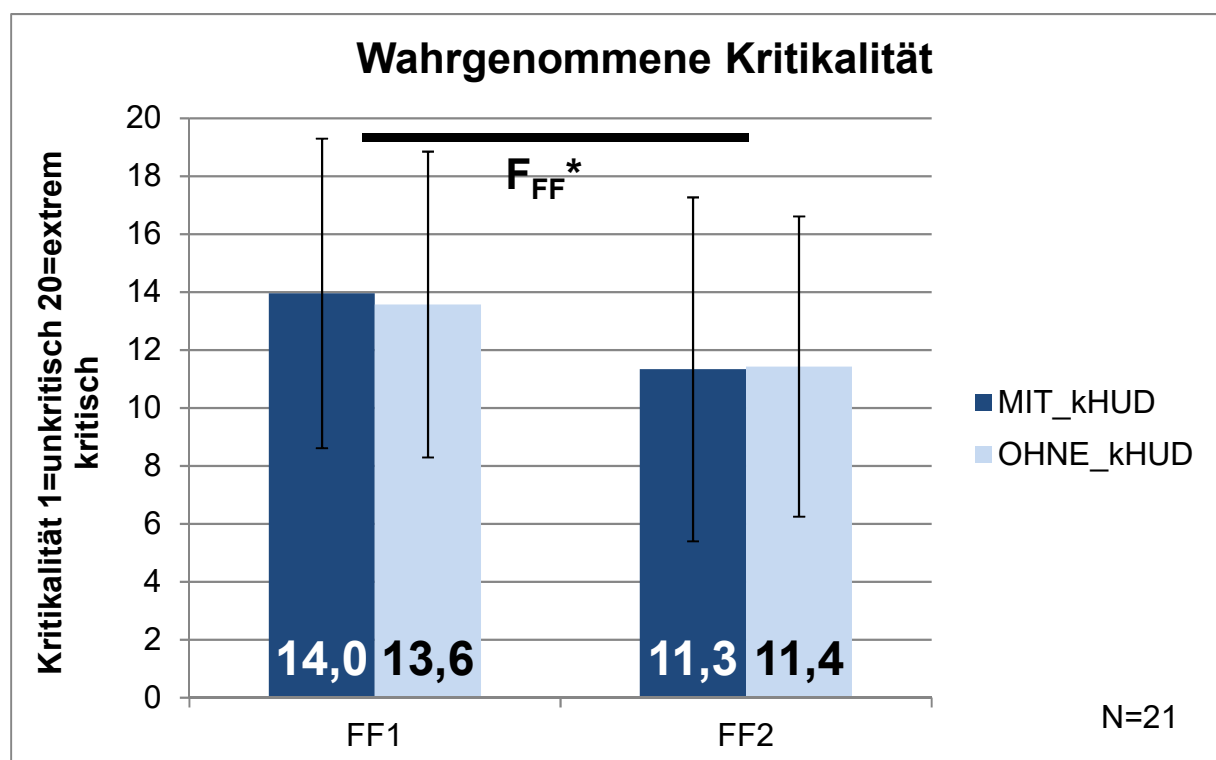


Abbildung 5-4: Bewertung der Kritikalität der beiden Fehlfunktionen (FF) von 1=nicht kritisch bis 20=extrem kritisch.

Die Daten zeigen keinen Einfluss der Anzeige ( $F_A(1,40)=.012$ ,  $p=.915$ ,  $\eta^2=.000$ ) und auch keinen Interaktionseffekt ( $F_{A*FF}(1,40)=.053$ ,  $p=.819$ ,  $\eta^2=.001$ ). Die zweite Fehlfunktion wird in beiden Gruppen signifikant weniger kritisch eingeschätzt ( $F_{FF}(1,40)=5.316$ ,  $p<.026$ ,  $\eta^2=.117$ ). Alle Bewertungen weisen eine große Varianz auf.

Die weniger kritische Bewertung der FF2 ist vermutlich eine Folge des niedrigeren Automationsvertrauens nach FF1 (Kapitel 5.3.1.3), das ein aufmerksames Blickverhalten durch verkürzte maximale Blickdauern bedingt (Kapitel 5.3.4.4) und damit einen Lerneffekt in den Übernahmezeiten erzeugt (Kapitel 5.3.2.3). FF2 wird von den Probanden schneller entschärft und erscheint deswegen weniger kritisch, obwohl beide Fehlfunktionen identisch waren.

- E: Die Anzeige hat keinen Einfluss auf die Kritikalität.
- E: FF2 wird von beiden Gruppen weniger kritisch bewertet als FF1.

### **5.3.1.5 Zusammenfassung der subjektiven Daten**

Das kHUD hat keinen Einfluss auf die Beanspruchung, das Automationsvertrauen und das Kritikalitätsempfinden der Fahrer. Das kHUD hilft in der vorhandenen Konfiguration Fehlfunktionen (Fehlerkennungen) zu erkennen und erhöht das Systemverständnis. Das kHUD wurde nach Angaben der Fahrer mittelmäßig während der Fehlfunktion beachtet, während das Kombiinstrument wenig beachtet wurde. Das kHUD und das Kombiinstrument wurden als wenig ablenkend bewertet und ihr Informationsgehalt wurde sehr gut verstanden.

### **5.3.2 Übernahmekenngrößen bei Fehlfunktion (FF)**

Einzelne Ergebnisse aus diesem Kapitel sind bereits in der Vorveröffentlichung Weißgerber & Bengler, 2017 erschienen.

#### **5.3.2.1 Häufigkeit der Kollisionen**

Abbildung 5-5 zeigt die Häufigkeit der Kollisionen in den verschiedenen Versuchsbedingungen. Ungefähr 10–20 % der Probanden in beiden Gruppen und Fehlfunktionen konnten eine Kollision nicht verhindern.

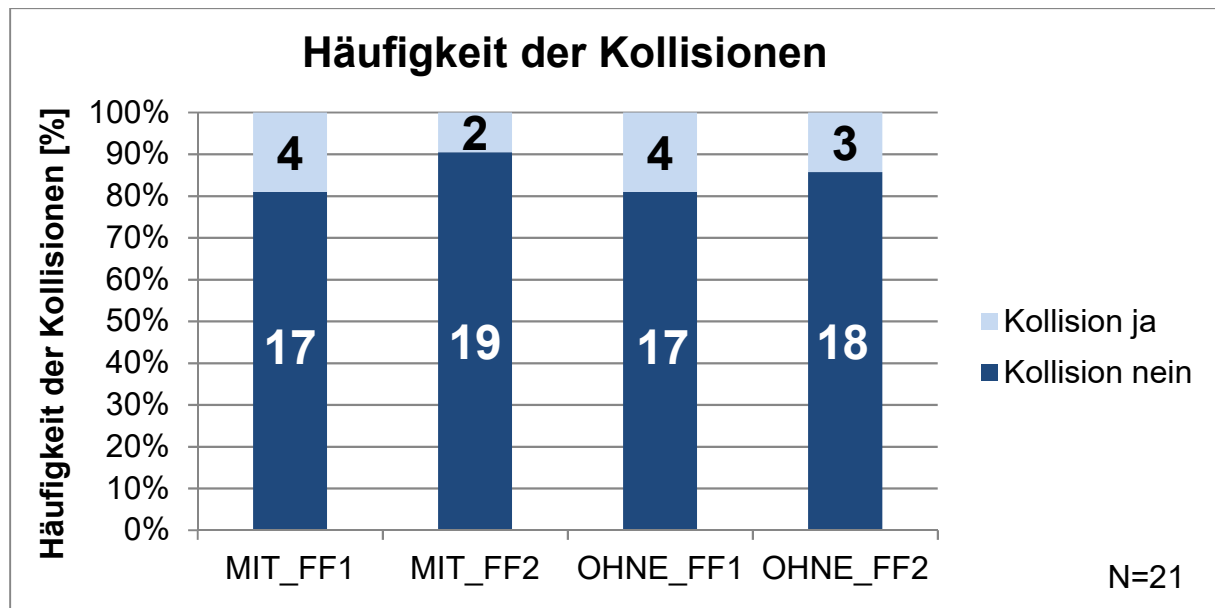


Abbildung 5-5: Häufigkeit der Kollisionen in Prozent und Absolutwerten, aufgeteilt nach der Art der Anzeige (MIT und OHNE kHUD) und der Fehlfunktion (FF1 und FF2).

Ein McNemar-Test mit der Edwards-Korrektur von 1.0 zeigt bei beiden Gruppen mit  $p_{MIT}=.500$  und  $p_{OHNE}=1.00$  keinen Unterschied in der Kollisionshäufigkeit bezüglich der Wiederholung der Fehlfunktion. Ein exakter Test nach Fisher zeigt bei beiden Fehlfunktionen  $p_{FF1}=1.000$  und  $p_{FF2}=1.000$  keinen Unterschied in der Kollisionshäufigkeit zwischen den Gruppen. Damit haben weder die Art der Anzeige noch die Wiederholung der Fehlfunktion einen Einfluss auf die Häufigkeit der verursachten Kollisionen.

Mit einer sehr großen Zeitlücke von 2.2 Sekunden und einem Zeitbudget von 6.6 Sekunden (Kapitel 5.1.1.4) war beabsichtigt, keine Kollisionen zu provozieren, da sie die Stichprobengröße für die weitere Auswertung reduzieren. Deshalb ist es sehr beängstigend, dass unabhängig von der Art der Anzeige bei Erstkontakt einer Fehlfunktion (siehe Abbildung 5-5 MIT\_FF1 und OHNE\_FF1) jeweils fast 20 % der Probanden eine Kollision verursacht haben.

- ➔ E: Art der Anzeige und Wiederholung der Fehlfunktion haben keinen signifikanten Einfluss auf die Häufigkeit der Kollisionen.
- ➔ E+F: Es wird weiterhin ein Lerneffekt in der Kollisionshäufigkeit unabhängig von der Art der Anzeige vermutet, der beforscht werden sollte.
- ➔ E: Fast 20 % der Probanden verursachten eine Kollision bei Erstkontakt mit einer Fehlfunktion der Automation.

- M: Um die geplante Stichprobengröße (N=20) einhalten zu können, muss bei dieser Art von Szenario die Probandenanzahl um 10–20 % erhöht werden, um bei der weiteren Auswertung der Probanden ohne Kollision noch eine Aussage treffen zu können.

### 5.3.2.2 Fahrstreifenwechsel und Absicherung

Tabelle 5-3 zeigt die Anzahl der Fahrstreifenwechsel (FSW) für alle Versuchsbedingungen. Die Anzahl der Probanden, die den FSW durch einen Blick in den linken Außenspiegel oder Schulterblick abgesichert und geblinkt haben ist ebenso aufgeführt. Die Anzahl der FSW darf nicht gleichgesetzt werden mit der Verteilung der Eingriffsarten (siehe Kapitel 3.1), die nur die erste Handlungsumsetzung nach Auslösen der Fehlfunktion beschreiben. Probanden, die zuerst gebremst haben und nach über einer Sekunde einen FSW durchgeführt haben, sind bei den FSW berücksichtigt, bei der Eingriffsart aber als „Bremsler“ aufgeführt. Andersherum führte nicht jeder Lenkeingriff zu einem FSW. Durch die Art des Szenarios sind wenig FSW durchgeführt worden. Deswegen ist eine statistische Auswertung wenig aussagekräftig. Der FSW wird in allen Bedingungen nicht zu 100 % durch einen Blick in den Außenspiegel abgesichert. Ebenso verhält sich die Ankündigung des FSW durch Blinken. Schulterblicke werden fast gar nicht zur Absicherung genutzt.

*Tabelle 5-3: Anzahl der Fahrstreifenwechsel (FSW) und Anzahl der Probanden mit Blicken in den linken Außenspiegel, Schulterblicke und Blinken in den Versuchsbedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für Fehlfunktion 1 (FF1) und Fehlfunktion 2 (FF2).*

Anzahl [-]	FSW	SpieLinks	Schulter	Blinken
MIT_FF1	3	1	0	2
MIT_FF2	4	3	0	3
OHNE_FF1	5	2	1	3
OHNE_FF2	4	3	0	4

Auf eine negative Auswirkung der kontaktanalogen Anzeige auf das Absicherungsverhalten bei einem FSW deuten die Zahlen nicht hin. Sie belegen aber, dass nicht alle FSW abgesichert werden.

- E: Anzeige und Wiederholung haben keinen Einfluss auf das Absicherungsverhalten bei Fahrstreifenwechsel.
- E: In diesem Szenario wurden die Fahrstreifenwechsel generell mangelhaft abgesichert.

### 5.3.2.3 Übernahmezeit

Abbildung 5-6 zeigt die mittlere Übernahmezeit mit Standardabweichung für die Versuchsbedingungen. Eine Übernahme ist in der Querführung für einen Lenkwinkel über  $2^\circ$  und in der Längsführung für einen Bremsdruck über 25 % definiert (Gold et al., 2013). Zur statistischen Berechnung wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung mit dem Faktor Anzeige ( $F_A$ ) für MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD und die Messwiederholung der Fehlfunktion ( $F_{FF}$ ) für FF1 und FF2 mit einem Signifikanzniveau von 5 % verwendet.

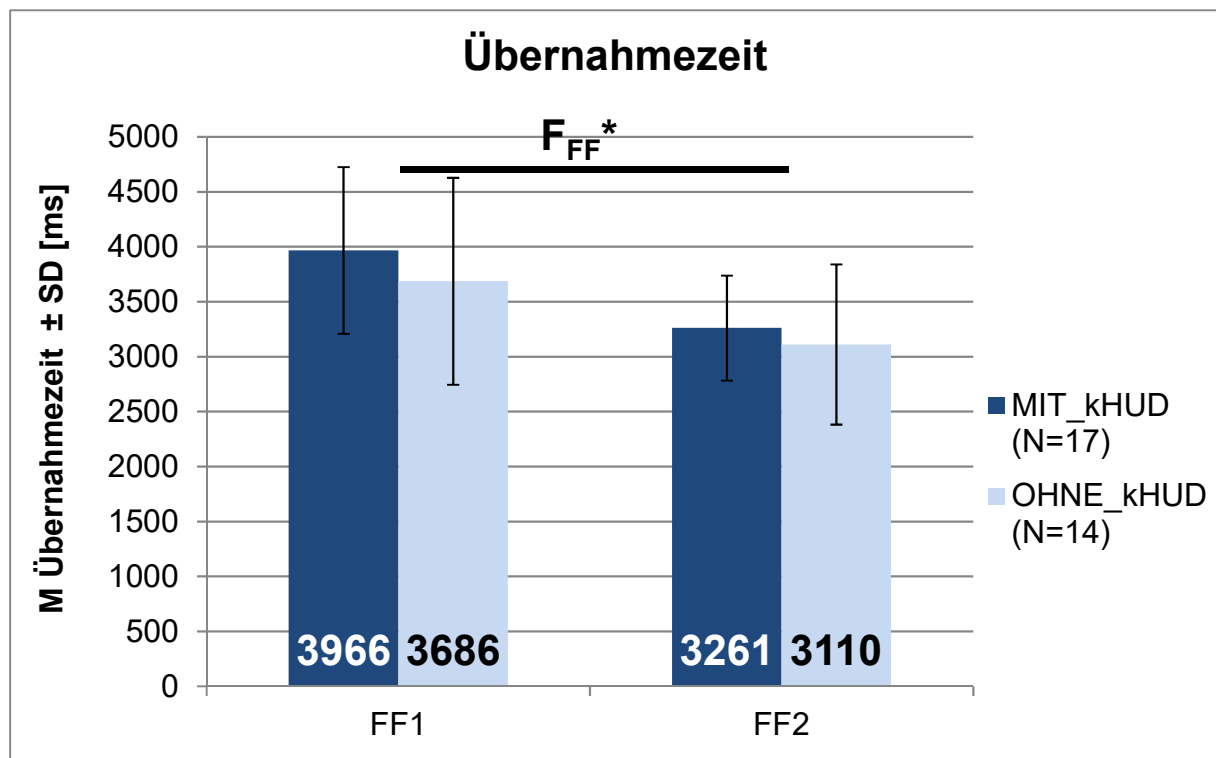


Abbildung 5-6: Mittlere Übernahmezeit mit Standardabweichung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für Fehlfunktion 1 (FF1) und Fehlfunktion 2 (FF2).

Die Art der Anzeige hat keinen Einfluss auf die Übernahmezeit ( $F_A(1,29)=0.912$ ,  $p=.348$ ,  $\eta^2=.030$ ). Eine Interaktion zwischen Anzeige und Fehlfunktion ist nicht zu erkennen ( $F_{FF*A}(1,29)=0.168$ ,  $p=.685$ ,  $\eta^2=.006$ ). Es ist ein großer Innersubjekteffekt bei der Wiederholung der Fehlfunktion nachzuweisen ( $F_{FF}(1,29)=16.714$ ,  $p<.001$ ,  $\eta^2=.366$ ). Durch den Lerneffekt verkürzen sich die Übernahmezeiten für MIT\_kHUD um 705 ms und für OHNE\_kHUD um 576 ms von FF1 zu FF2. In FF2 werden bereits Übernahmezeiten erzeugt, die fast an die Obergrenze von Übernahmezeiten an kontrollierten Systemgrenzen erzeugt werden (siehe Kapitel 3.2). Geringere

Standardabweichungen bei FF2 im Vergleich zu FF1 zeigen, dass die Probanden sich in der Übernahmezeit angeglichener haben. Dies gilt besonders für die Gruppe MIT\_FF2.

- E: Die Art der Anzeige hat keinen signifikanten Einfluss auf die Übernahmezeit.
- E: Die Übernahmezeit nimmt bei Wiederholung der Fehlfunktion signifikant ab.
- E: Da kein Interaktionseffekt vorliegt, nimmt die Übernahmezeit für beide Gruppen ab.
- E: Die Übernahmezeiten der Probanden gleichen sich bei der zweiten Fehlfunktion an. Das gilt besonders für die Gruppe MIT\_FF2.

#### **5.3.2.4 TTCmin**

Abbildung 5-7 zeigt die mittlere minimale Time To Collision (TTCmin) mit Standardabweichung. Der Faktor Anzeige hat keinen Einfluss auf die TTCmin ( $F_A(1,29)=0.216$ ,  $p=.646$ ,  $\eta^2=.007$ ). Es gibt keine Interaktion zwischen Anzeige und Fehlfunktion ( $F_{FF*A}(1,29)=0.140$ ,  $p=.711$ ,  $\eta^2=.005$ ). Es gibt einen signifikanten Innersubjekteffekt bei der Wiederholung der Fehlfunktion ( $F_{FF}(1,29)=13.028$ ,  $p=.001$ ,  $\eta^2=.310$ ).

Durch die Wiederholung der Fehlfunktion vergrößert sich die TTC (MIT\_kHUD 0.762 s; OHNE\_kHUD 0.619 s); dies belegt einen deutlichen Lerneffekt. Der Lerneffekt kann für beide Gruppen angenommen werden, da kein Interaktionseffekt besteht. Ähnlich wie bei der Übernahmezeit (Kapitel 5.3.2.3) ist die Standardabweichung der TTCmin bei MIT\_FF2 am geringsten. Bei OHNE\_FF2 variiert die TTCmin stark.

Die TTCmin und die subjektive Probandenbewertung aus Kapitel 5.3.1.4, wie kritisch die Fehlfunktionen waren, korrelieren für beide Fehlfunktionen (FF1:  $r=-.193$ ,  $p=.273$ ; FF2:  $r=-.036$ ,  $p=.830$ ) nicht. Eine kleine TTCmin wurde demnach nicht als kritisch eingestuft. Eventuell ist das bedingt durch ein unterschiedliches Risikoempfinden der Probanden.



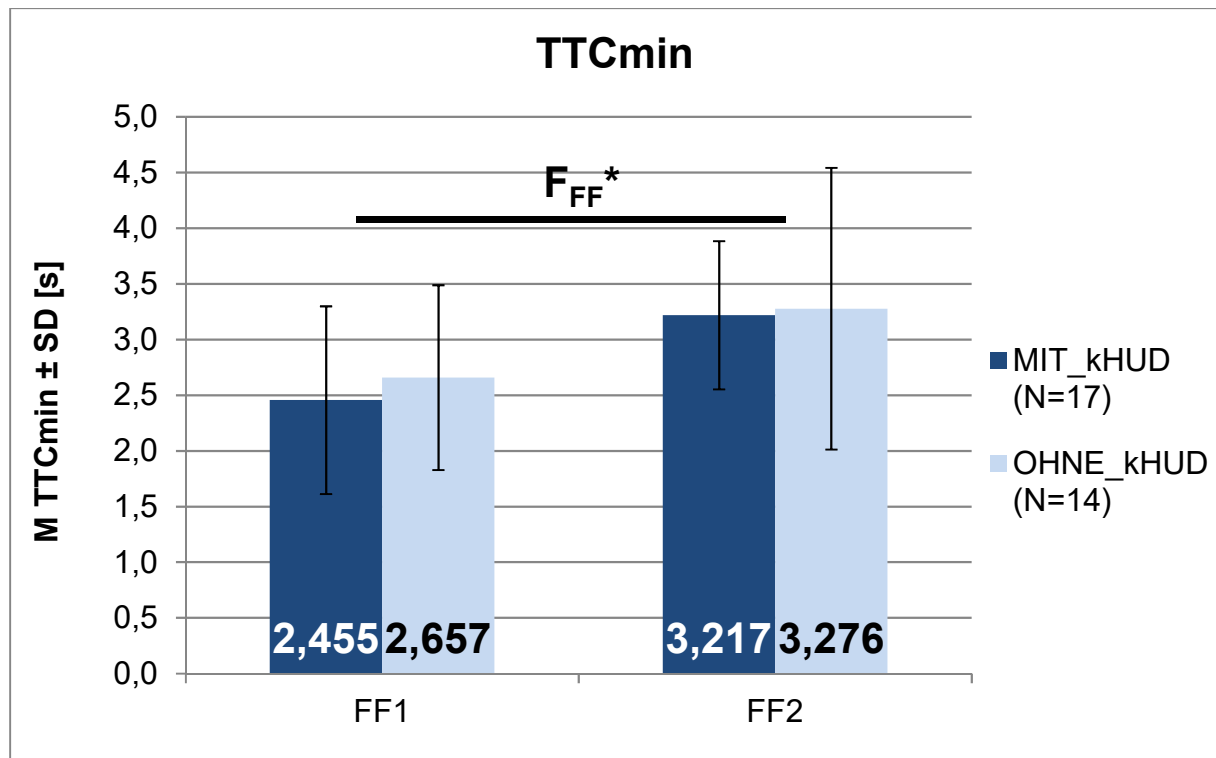


Abbildung 5-7: Mittlere minimale Time To Collision (TTCmin) mit Standardabweichung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für Fehlfunktion 1 (FF1) und Fehlfunktion 2 (FF2).

- ➔ E: Die Art der Anzeige hat keinen signifikanten Einfluss auf die TTCmin.
- ➔ E: Die TTCmin nimmt bei Wiederholung der Fehlfunktion signifikant zu.
- ➔ E: Da kein Interaktionseffekt vorliegt, nimmt die TTCmin für beide Gruppen zu.
- ➔ E: Die TTCmin der Probanden gleicht sich bei MIT\_FF2 an. Wohingegen die Gruppe OHNE\_FF2 eine sehr starke Streuung aufweist.

### 5.3.2.5 TTCmin-Zeitpunkt

Abbildung 5-8 zeigt den mittleren Zeitpunkt der TTCmin nach Eintritt der Fehlfunktion. Der Faktor Anzeige hat keinen Einfluss auf den Zeitpunkt der TTCmin ( $F_{A(1,29)}=0.233$ ,  $p=.633$ ,  $\eta^2=.008$ ). Es gibt keine Interaktion zwischen Anzeige und Fehlfunktion ( $F_{A*FF(1,29)}=1.540$ ,  $p=.225$ ,  $\eta^2=.050$ ). Es gibt einen signifikanten Innersubjekteffekt bei der Wiederholung der Fehlfunktion ( $F_{FF(1,29)}=16.450$ ,  $p<.001$ ,  $\eta^2=.362$ ).

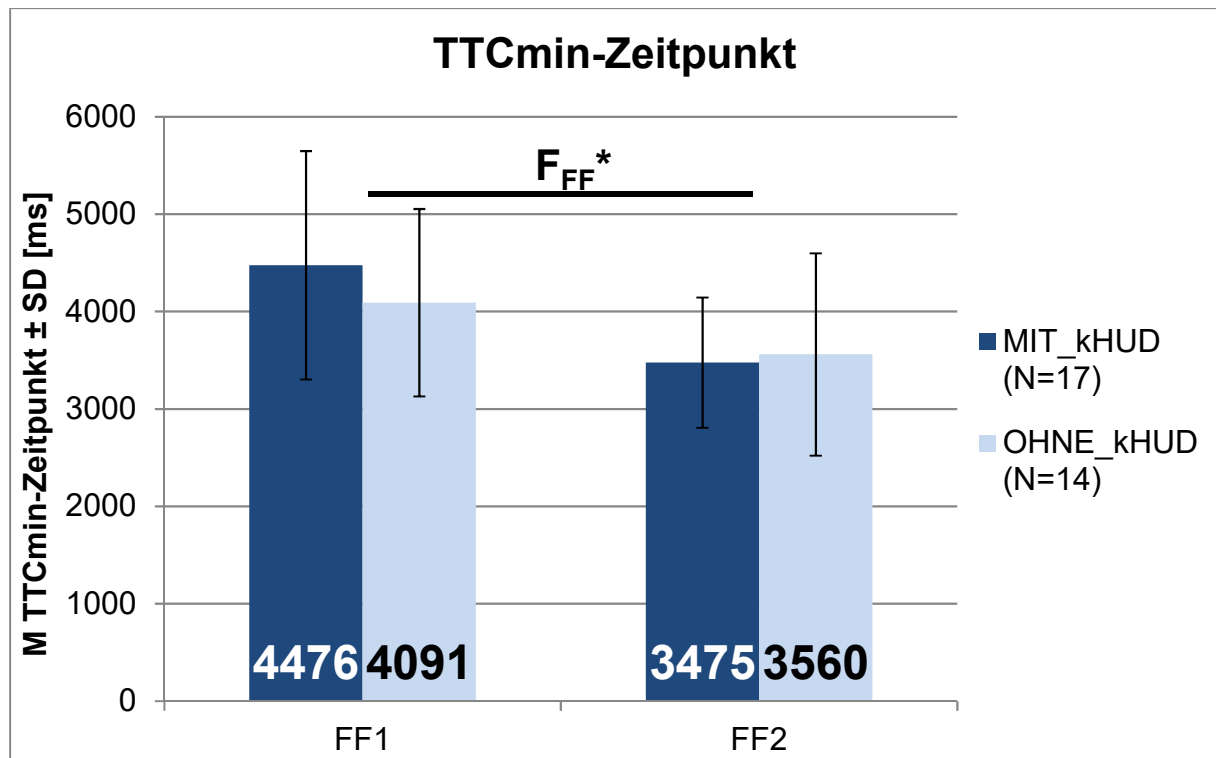


Abbildung 5-8: Mittlerer Zeitpunkt der TTCmin mit Standardabweichung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für Fehlfunktion 1 (FF1) und Fehlfunktion 2 (FF2).

Da die TTCmin und der Zeitpunkt der TTCmin stark korrelieren (FF1:  $r=-.887$ ,  $p<.001$ ; FF2:  $r=-.943$ ,  $p<.001$ ), wäre die Besprechung einer der beiden Größen ausreichend. Allerdings wird der Zeitpunkt der TTCmin für eine bessere Visualisierung des Blickverlaufs im Übernahmeprozess und zur Bestimmung des Blickintervalls benötigt (siehe Kapitel 5.3.3.2). Die Übernahmezeit und der Zeitpunkt der TTCmin liegen sehr nah zusammen, da in diesem Manöver durch Bremsen eine schnelle Entschärfung der Situation möglich war.

- ➔ E: Der Zeitpunkt der TTCmin liefert ähnliche Ergebnisse wie die TTCmin.
- ➔ E: Übernahmezeit und TTCmin liegen wegen des Bremsmanövers sehr nah zusammen.
- ➔ M: Der Zeitpunkt der TTCmin kann behilflich sein, Blickverläufe in kritischen Situationen besser einzuordnen und aussagekräftige Blickintervalle festzulegen.

### 5.3.2.6 Maximale Verzögerung longitudinal

Abbildung 5-9 zeigt die mittlere maximale Verzögerung in Längsrichtung für die Versuchsbedingungen. Die Art der Anzeige hat keinen signifikanten Einfluss auf die maximale Verzögerung ( $F_A(1,29)=0.344$ ,  $p=.562$ ,  $\eta^2=.012$ ). Eine Interaktion zwischen Anzeige und Fehlfunktion ist nicht zu erkennen ( $F_{FF*A}(1,29)=0.462$ ,  $p=.502$ ,  $\eta^2=.016$ ). Es ist kein Innersubjekteffekt bei der Wiederholung der Fehlfunktion nachzuweisen ( $F_{FF}(1, 29)=0.908$ ,  $p=.348$ ,  $\eta^2=.030$ ).

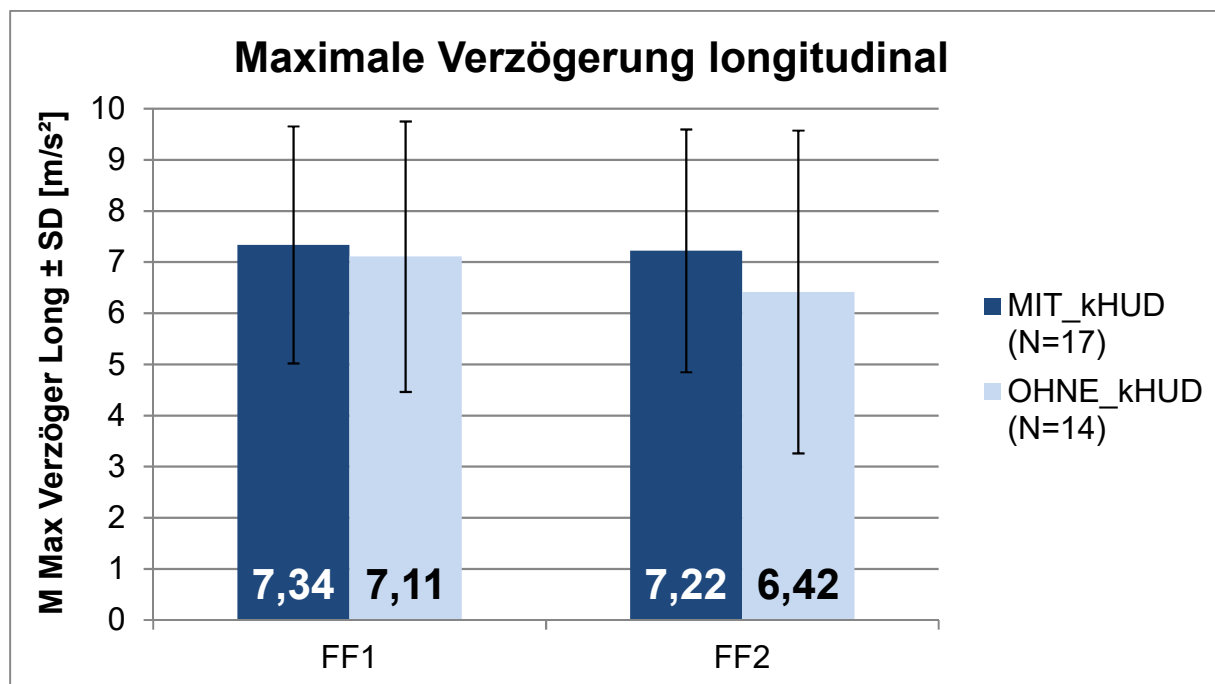


Abbildung 5-9: Mittlere maximale Verzögerung longitudinal mit Standardabweichung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für Fehlfunktion 1 (FF1) und Fehlfunktion 2 (FF2).

Die Durchschnittswerte liegen mit einer Verzögerung um die 7 m/s<sup>2</sup> sehr hoch und verdeutlichen, dass das Szenario hauptsächlich durch die Längsverzögerung gelöst wurde. Die Bremseinstellungen des jeweiligen Fahrsimulators werden diese Größe sicherlich beeinflussen. Alle maximalen Längsverzögerungen weisen eine hohe Standardabweichung auf.

- ➔ E: Die Art der Anzeige hat keinen signifikanten Einfluss auf die maximale Längsverzögerung.
- ➔ E: Bei Wiederholung der Fehlfunktion ändert sich die maximale Längsverzögerung nicht.

### 5.3.2.7 Maximale Beschleunigung lateral

Abbildung 5-10 zeigt die mittlere maximale Beschleunigung in Querrichtung nach links für alle Versuchsbedingungen. Die Art der Anzeige hat keinen Einfluss auf die maximale Beschleunigung links ( $F_A(1,29)=0.139$ ,  $p=.712$ ,  $\eta^2=.005$ ). Eine Interaktion zwischen Anzeige und Fehlfunktion ist nicht zu erkennen ( $F_{FF*A}(1,29)=0.650$ ,  $p=.427$ ,  $\eta^2=.022$ ). Es ist kein Innersubjekteffekt bei der Wiederholung der Fehlfunktion nachzuweisen ( $F_{FF}(1,29)=.147$ ,  $p=.704$ ,  $\eta^2=.005$ ).

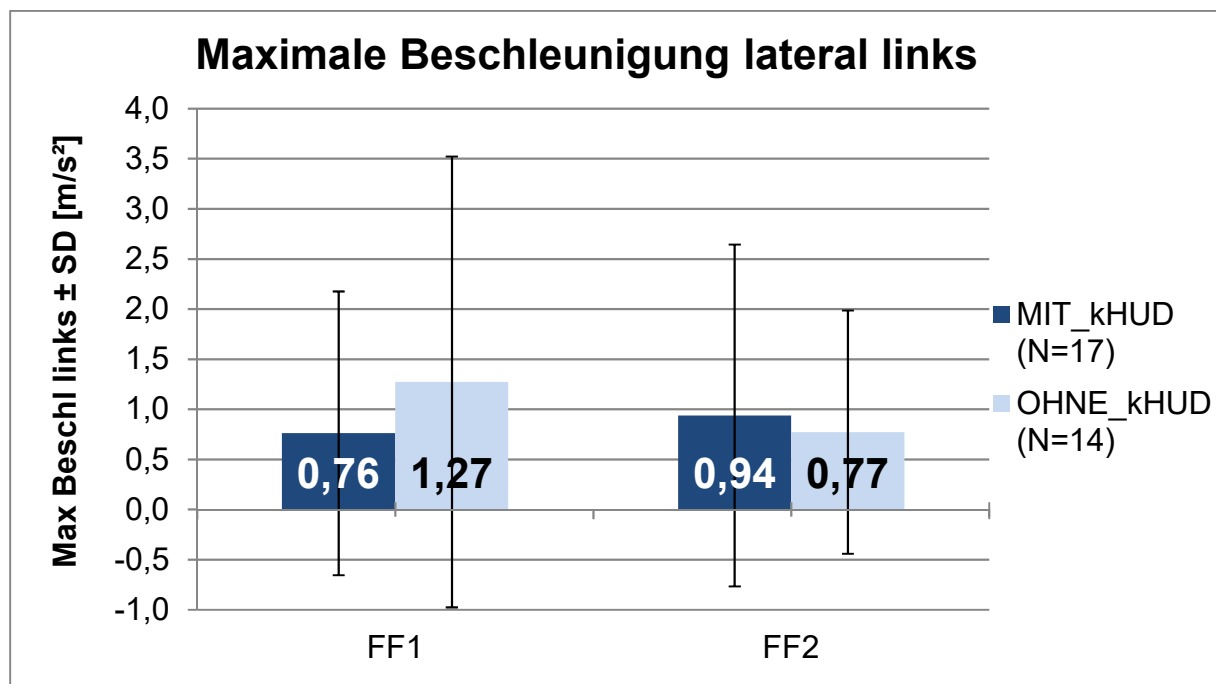


Abbildung 5-10: Mittlere maximale Beschleunigung lateral links mit Standardabweichung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für Fehlfunktion 1 (FF1) und Fehlfunktion 2 (FF2).

Abbildung 5-11 zeigt die mittlere maximale Beschleunigung in Querrichtung nach rechts für alle Versuchsbedingungen. Die Art der Anzeige hat keinen Einfluss auf die maximale Beschleunigung rechts ( $F_A(1,29)=0.655$ ,  $p=.425$ ,  $\eta^2=.022$ ). Eine Interaktion zwischen Anzeige und Fehlfunktion ist nicht zu erkennen ( $F_{FF*A}(1,29)=0.393$ ,  $p=.536$ ,  $\eta^2=.013$ ). Es ist kein Innersubjekteffekt bei der Wiederholung der Fehlfunktion nachzuweisen ( $F_{FF}(1,29)=.330$ ,  $p=.570$ ,  $\eta^2=.011$ ).

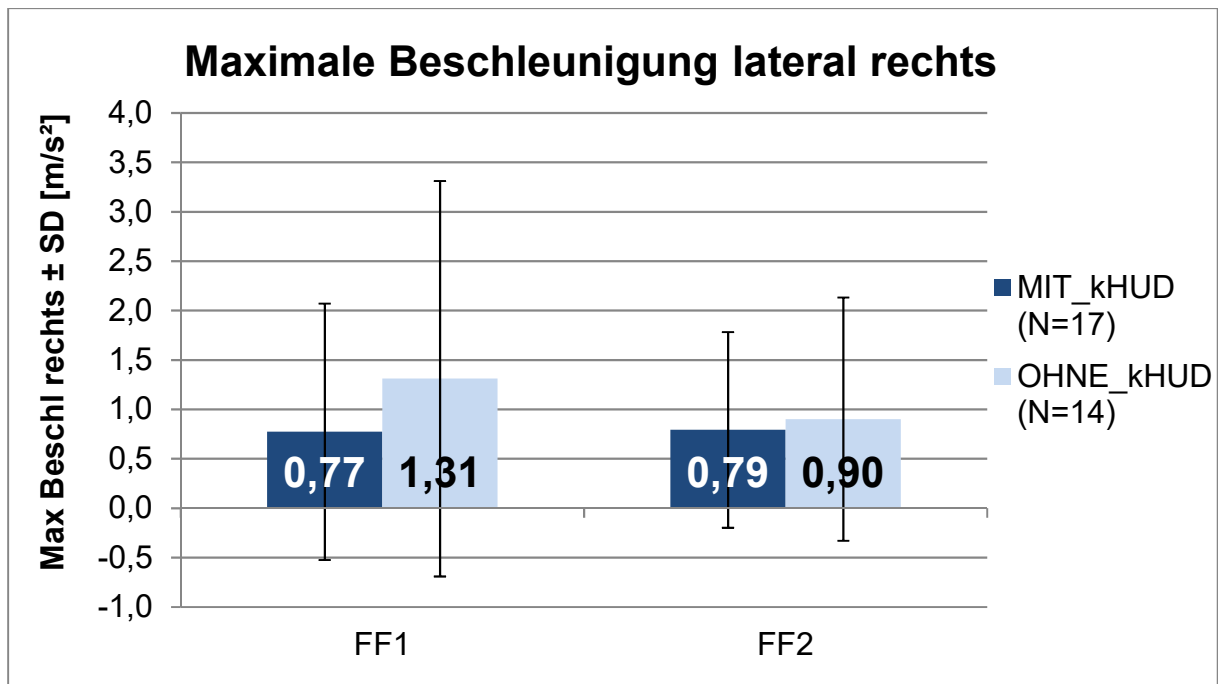


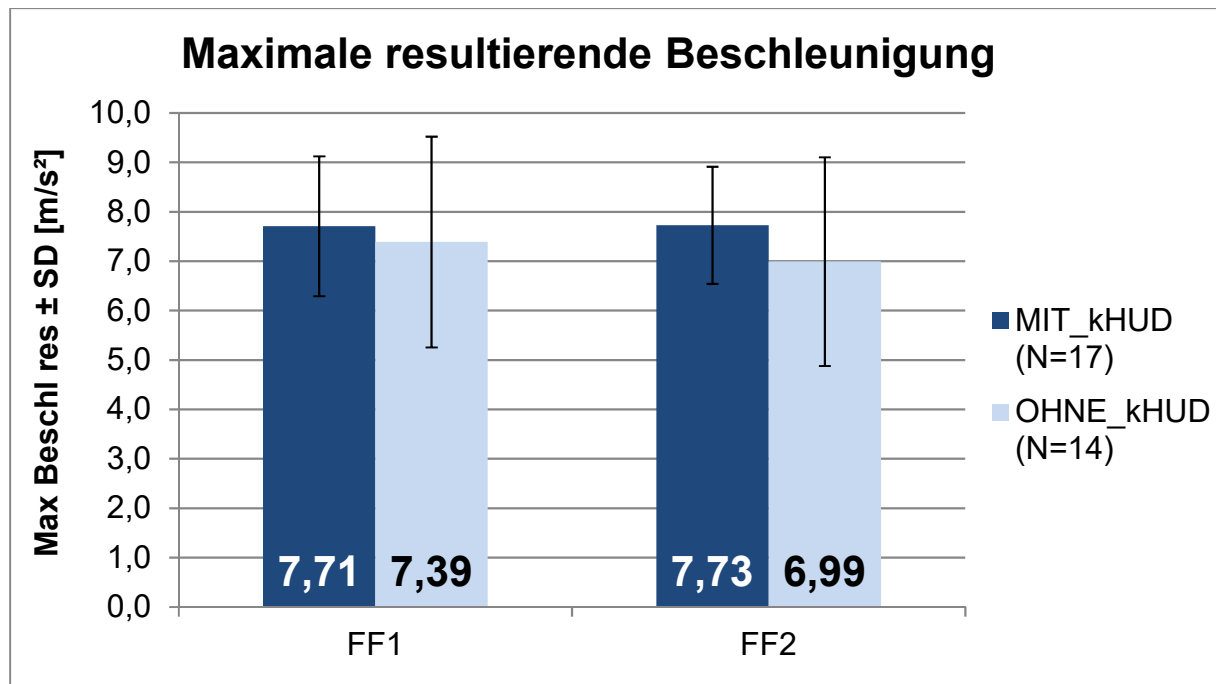
Abbildung 5-11: Mittlere maximale Beschleunigung lateral rechts mit Standardabweichung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für Fehlfunktion 1 (FF1) und Fehlfunktion 2 (FF2).

Alle maximalen Querbeschleunigungen weisen eine hohe Standardabweichung auf. In diesem Szenario kann es daran liegen, dass nur wenige Probanden einen Fahrstreifenwechsel durchgeführt haben. Die Mittelwerte sind im Vergleich zur longitudinalen Verzögerung sehr gering und verdeutlichen die Manöverwahl.

- ➔ E: Die Art der Anzeige hat keinen signifikanten Einfluss auf die maximale Querbeschleunigung.
- ➔ E: Die Wiederholung der Fehlfunktion hat keinen Einfluss auf die maximale Querbeschleunigung.

### 5.3.2.8 Maximale resultierende Beschleunigung

Abbildung 5-12 zeigt die mittlere maximale resultierende Beschleunigung für alle Versuchsbedingungen. Die Art der Anzeige hat keinen Einfluss auf die maximale resultierende Beschleunigung ( $F_A(1,29)=0.719$ ,  $p=.403$ ,  $\eta^2=.024$ ). Eine Interaktion zwischen Anzeige und Fehlfunktion ist nicht zu erkennen ( $F_{FF*A}(1,29)=1.597$ ,  $p=.216$ ,  $\eta^2=.052$ ). Es ist kein Innersubjekteffekt bei der Wiederholung der Fehlfunktion nachzuweisen ( $F_{FF}(1,29)=1.311$ ,  $p=.261$ ,  $\eta^2=.043$ ).



*Abbildung 5-12: Mittlere maximale resultierende Beschleunigung mit Standardabweichung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für Fehlfunktion 1 (FF1) und Fehlfunktion 2 (FF2).*

Die maximale resultierende Beschleunigung und die maximale Längsverzögerung zeigen vergleichbare Mittelwerte. Das Manöver wurde also durch die Längsverzögerung dominiert.

- ➔ E: Die Art der Anzeige hat keinen signifikanten Einfluss auf die maximale resultierende Beschleunigung.
- ➔ E: Die Wiederholung der Fehlfunktion hat keinen Einfluss auf die maximale resultierende Beschleunigung.

### 5.3.2.9 Zusammenfassung Übernahmekenngrößen

Die Art der Anzeige hat keinen Einfluss auf die Kollisionshäufigkeit. Ein Lerneffekt konnte aufgrund der Häufigkeitsverteilung nicht nachgewiesen werden. Obwohl ein großes Zeitbudget von 6.6 Sekunden gewählt wurde, verursachten fast 20 % der Probanden bei erstmaligem Erleben einer Fehlfunktion eine Kollision.

Die Art der Anzeige hat keinen Einfluss auf das Absicherungsverhalten bei einem Fahrstreifenwechsel. Die aufgrund des Szenarios wenigen Fahrstreifenwechsel wurden generell schlecht abgesichert.

Die Art der Anzeige hat keinen signifikanten Einfluss auf die Übernahmezeit. Unabhängig von der Art der Anzeige gibt es einen deutlichen Lerneffekt zwischen erster und zweiter Fehlfunktion.

Die Art der Anzeige hat keinen signifikanten Einfluss auf die TTCmin und den Zeitpunkt der TTCmin. Es gibt einen deutlichen Lerneffekt unabhängig von der Art der Anzeige zwischen erster und zweiter Fehlfunktion. Der Zeitpunkt der TTCmin kann als bedeutender eingeschätzt werden, wenn es um die Analyse von Handlungsverläufen im Übernahmeprozess geht. Übernahmezeit und TTCmin liegen wegen des Bremsmanövers sehr nah zusammen.

Weder die Art der Anzeige noch die Wiederholung der Fehlfunktionen haben einen Einfluss auf die maximale Längsverzögerung, die Querschleunigung oder die resultierende Beschleunigung. Diese Variablen sind sehr stark szenarioabhängig. Sie haben wenig Aussagekraft, wenn Fahrer eine Manöverauswahl treffen können.

Die Übernahmezeit ist als Startpunkt des vom Fahrer ausgeführten Manövers zu sehen, während die TTCmin als Ergebnis verstanden werden kann. Die Qualität der Manöverausführung wird durch die Beschleunigungen beschrieben. Die Übernahmezeit und die TTCmin zeigen einen Lerneffekt, der in den Beschleunigungen nicht zu sehen ist. Da sich die Qualität der Manöverausführung nicht verbesserte, ist die größere TTCmin in einer kürzeren Übernahmezeit begründet. Die gewonnene Zeit durch eine frühere Übernahme wird in die Sicherheit einer größeren TTCmin investiert und nicht in einen komfortableren Übernahmeprozess durch geringere Beschleunigungen.

Der Lerneffekt belegt, dass in FF1 wissensbasiert und in FF2 regelbasiert gehandelt wird (Kapitel 2.2). Die Information der fehlenden kontaktanalogen Markierung des vorausfahrenden Fahrzeugs wird in FF2 schneller verarbeitet, da der Stimulus aus FF1 mittlerweile bekannt ist (Kapitel 2.3).

### **5.3.3 Blickkenngößen bei Fehlfunktion (FF)**

Zur Ergänzung der Übernahmekenngößen werden in den folgenden Kapiteln Blickverläufe und Blickkenngößen analysiert. Da es sich um eine händische Auswertung handelt, bei der jeder einzelne Frame erfasst wurde, liegt die Pupillenerkennung bei 100 %. Die Markererkennung wurde nicht erfasst. Sie ist nur bei automatisierten Auswertungen relevant.

Die detaillierte Blickanalyse erlaubt die Unterteilung in die AOIs „Spiegel links“ (SpieLinks), „Spiegel rechts“ (SpieRechts), „Innenspiegel“ (InnenSpie) und „Tacho“ (Tacho). Das AOI „Fahrzeuginnenraum“ (FzgInnen) betrifft häufig Blicke zum Druckknopf auf der Lenkradspeiche, um die Automation wieder zu aktivieren. Die Frontsicht des Fahrers ist unterteilt in die AOIs „Fahrzeug voraus“ (FzgVor) im eigenen Fahrstreifen und „Szenerie“ (Szenerie). Blicke in das AOI Szenerie betreffen hauptsächlich entweder das vorausfahrende Fahrzeug auf dem rechten Nebenfahrstreifen oder Blicke in den Gegenverkehr. Ab Kapitel 5.3.4 sind in der automatisierten Auswertung die AOIs FzgVor und Szenerie zu einem AOI Szenerie zusammengefasst.

### **5.3.3.1 Blick voraus**

Abbildung 5-13 zeigt die Anzahl der Probanden mit Blick voraus auf das vorausfahrende Fahrzeug zum Zeitpunkt der Fehlfunktion. Der Nachweis der Blickzuwendung der Probandengruppe MIT\_kHUD ist an dieser Stelle wichtig, da sonst zwei Fahrten OHNE\_kHUD verglichen worden wären.

Ein McNemar-Test zeigt bei beiden Gruppen mit  $p_{MIT}=.625$  und  $p_{OHNE}=1.000$  keinen Unterschied in der Blickhäufigkeit bezüglich der Wiederholung der Fehlfunktion. Ein exakter Test nach Fisher zeigt bei beiden Fehlfunktionen  $p_{FF1}=.505$  und  $p_{FF2}=.277$  keinen Unterschied in der Blickhäufigkeit zwischen den Gruppen. Damit haben weder die Art der Anzeige noch die Wiederholung der Fehlfunktion einen Einfluss auf die Häufigkeit der Blickzuwendungen.

Die Blickhäufigkeit zeigt, dass ca. 75 % der Probanden MIT\_kHUD auf das vorausfahrende Fahrzeug geblickt haben und damit die Möglichkeit hatten, das Verschwinden der Klammer zu bemerken. Zwei Probanden in der Bedingung MIT\_FF1 und drei Probanden in der Bedingung MIT\_FF2 blickten maximal 200 ms nach Auslösen der Fehlfunktion wieder voraus. Jeweils ein Proband blickte in den linken Außenspiegel und den Gegenverkehr und drei Probanden auf ein auf dem rechten Fahrstreifen vorausfahrendes Fahrzeug. Mit großer Wahrscheinlichkeit haben sie das Ausblenden der Klammer bemerkt und deshalb innerhalb der 200 ms wieder auf das vorausfahrende Fahrzeug geblickt. Damit würde sich die Anzahl der Probanden, die das Ausblenden der Klammer am vorausfahrenden Fahrzeug wahrgenommen haben können, nochmals erhöhen.



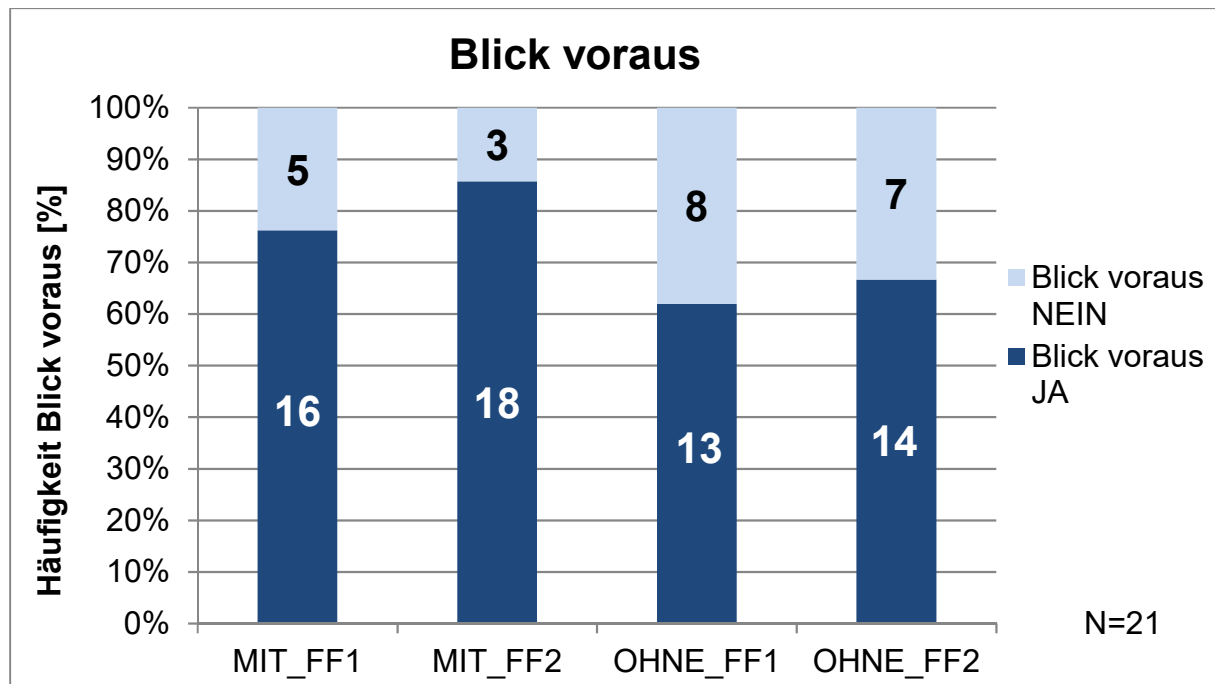


Abbildung 5-13: Häufigkeit des Blicks voraus auf das vorausfahrende Fahrzeug zum Zeitpunkt der Fehlfunktion.

Weder die Art der Anzeige noch die Wiederholung der Fehlfunktion haben einen Einfluss auf die Häufigkeit, mit der die Probanden zum Zeitpunkt der Fehlfunktion den Blick auf das vorausfahrende Fahrzeug gerichtet hatten. Viel wichtiger ist hier der Nachweis, dass 16 Probanden (ca. 75 %) in der Bedingung MIT\_FF1 und 18 Probanden (ca. 85 %) in der Bedingung MIT\_FF2 die Klammer am vorausfahrenden Fahrzeug wahrgenommen haben können. Die Anzahl der Probanden erhöht sich auf 18 (ca. 85 %) und 21 (100 %), wenn Probanden, die innerhalb von maximal 200 ms wieder vorausblickten, dazugerechnet werden.

### 5.3.3.2 Blicksequenz Zeitintervall 8 Sekunden

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die Blickverläufe der Studie geben und ein geeignetes Zeitintervall festlegen, um weitere Blickkenngößen auszuwerten. Die Abbildung 5-14 bis Abbildung 5-17 zeigen die Blickzuwendung der Fahrer auf die einzelnen AOs in einem Zeitintervall von 8 Sekunden, das mit der Fehlfunktion beginnt. Das Zeitintervall von 8 Sekunden ist so gewählt, weil jeder Proband in diesem Zeitraum die Situation bewältigt und die Automation wieder aktiviert hat. Ein Zeitframe entspricht 40 ms. Als Blickzuwendungen sind die Verweildauern auf die AOs und die Blickübergangszeit aufgeführt, die ab Kapitel 5.3.3.3 statistisch betrachtet werden. Zur besseren Orientierung sind in den Abbildungen noch die Mittelwerte der

Übernahmezeit (Raute) aus Kapitel 5.3.2.3 und des Zeitpunkts der TTCmin (Kreuz) aus Kapitel 5.3.2.5 mit den jeweiligen Standardabweichungen, das Zeitbudget von 6.6 Sekunden und das 50 %-Zeitbudget mit 3.3 Sekunden angetragen.

Um die Blickdaten möglichst unverfälscht interpretieren zu können, muss ein geeignetes Zeitintervall festgelegt werden. Bei Versuchen mit einem stehenden Hindernis werden die Übernahmekenngrößen üblicherweise von der Übernahmeaufforderung bis zum Passieren des stehenden Objektes ausgewertet (Lorenz et al., 2014). Bei diesen Daten ist das meist unproblematisch, da Zeitspannen und Maximalwerte ermittelt werden, die während des kritischsten Moments des Manövers entstehen. Zwischen dem kritischsten Moment, also dem Zeitpunkt der minimalen TTC und dem Passieren des stehenden Objektes werden in aller Regel keine Maximalwerte bei Beschleunigungen mehr erzeugt. Zur Auswertung von Blickdaten ist das Zeitintervall zwischen Systemgrenze und stehendem Objekt fraglich, da die Fahrer die Übernahmesituation zu unterschiedlichen Zeitpunkten lösen. Nach dem kritischsten Zeitpunkt werden sie ein anderes Blickverhalten haben als davor, aber das stehende Objekt noch nicht passiert haben. In diesem Versuch kommt erschwerend hinzu, dass kein stehendes Objekt als ortsbezogenes Intervallende vorhanden ist. Ein ortsbezogenes Intervallende scheint generell nicht geeignet. Hier besteht methodischer Handlungsbedarf.

Zunächst werden die folgenden vier Abbildungen diskutiert und danach wird ein geeignetes Zeitintervall festgelegt: In Abbildung 5-14 ist für die Bedingung MIT\_FF1 zu sehen, dass bei Auslösen der Fehlfunktion nur wenige Fahrer das vorausfahrende Fahrzeug nicht angeblickt haben (siehe Kapitel 5.3.3.1). Die dazugehörigen Blickübergänge sind im oberen Bereich der Abbildung zu sehen. Ab der Hälfte des Zeitbudgets bei 3.3 Sekunden wird die Fahrzeugführung übernommen. Die Informationsaufnahme, die Informationsverarbeitung und die Entscheidungsfindung sind weitestgehend abgeschlossen. Es folgt die Handlungsumsetzung und die Überwindung der TTCmin. Ab diesem Zeitpunkt bauen sich langsam Blickzuwendungen auf, die nicht dem vorausfahrenden Fahrzeug gelten. Blicke in die Szenerie stammen meist von Fahrern, die einen Fahrstreifenwechsel durchgeführt haben und nun den Blick auf den eigenen Fahrstreifen richten. Insgesamt finden wenig Blickwechsel statt und das vorausfahrende Fahrzeug ist das dominierende AOI.

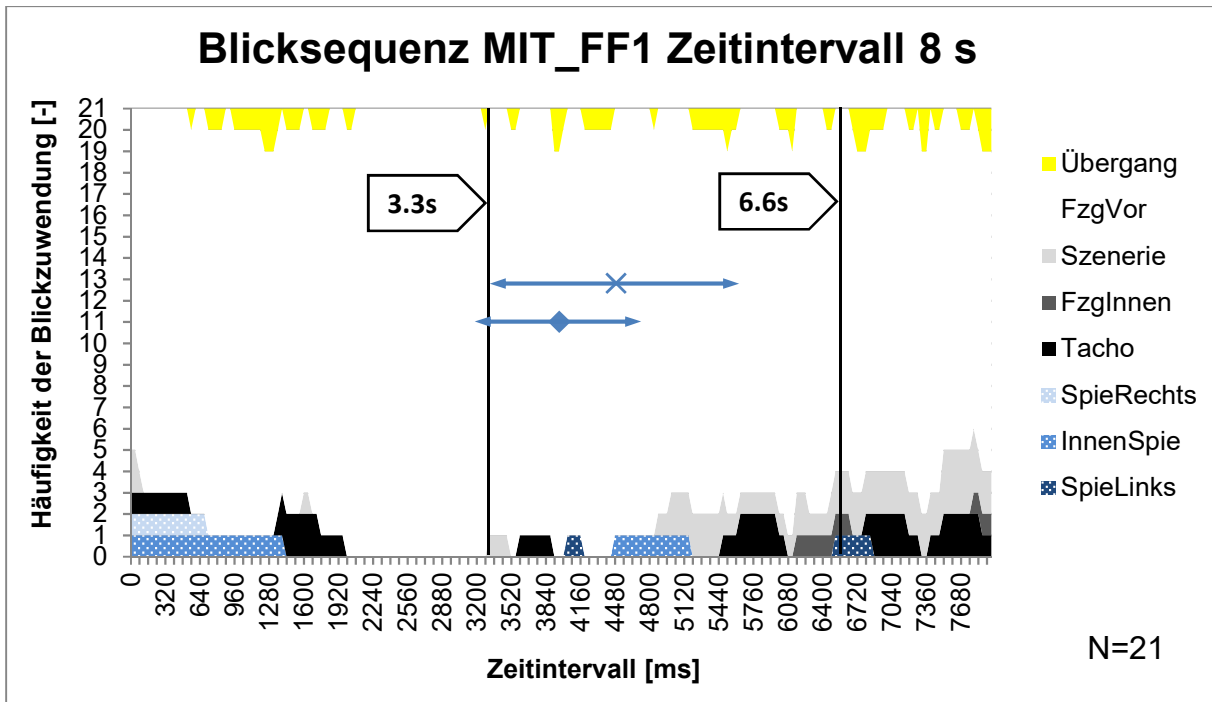


Abbildung 5-14: Blickzuwendungen in der Bedingung MIT\_FF1 auf die unterschiedlichen AOIs in einem Zeitintervall von 8 Sekunden, beginnend mit der Fehlfunktion. Angetragen sind das Zeitbudget mit 6.6 Sekunden und die Hälfte des Zeitbudgets mit 3.3 Sekunden. Die blaue Raute markiert den Mittelwert der Übernahmezeit=◆, das blaue Kreuz den Mittelwert des Zeitpunkts der TTCmin=X und die blauen Pfeile die jeweilige Standardabweichung.

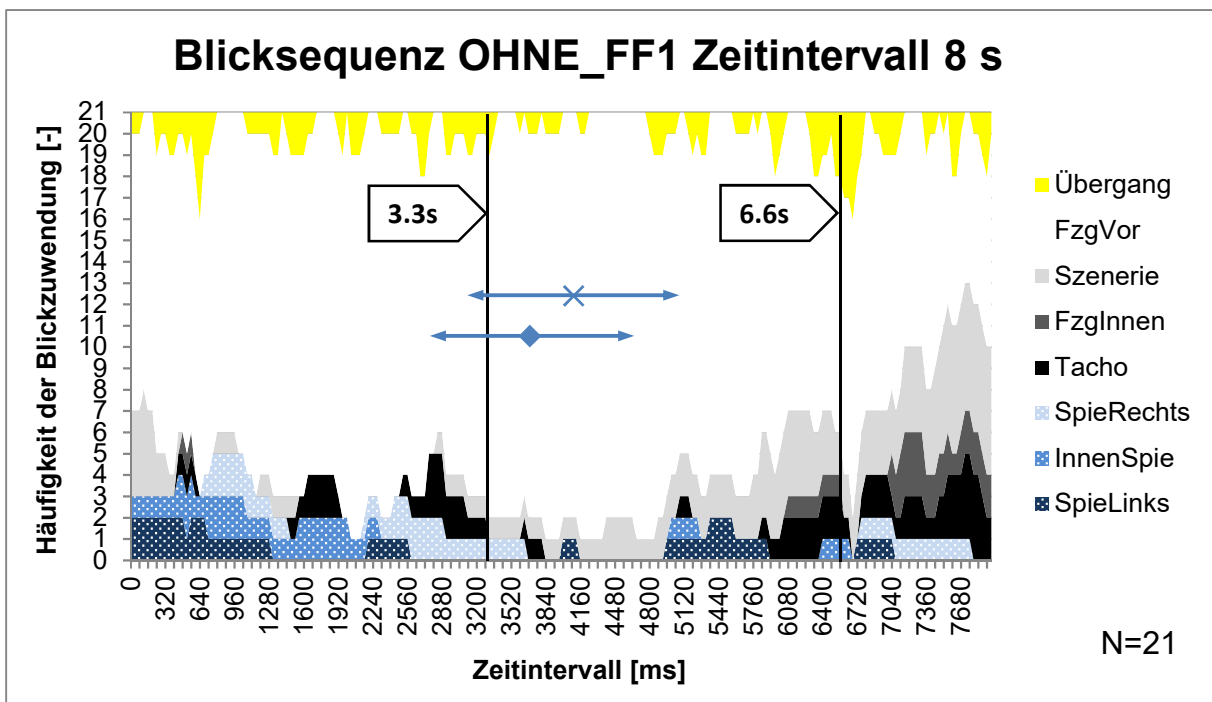


Abbildung 5-15: Blickzuwendungen in der Bedingung OHNE\_FF1 auf die unterschiedlichen AOIs in einem Zeitintervall von 8 Sekunden, beginnend mit der Fehlfunktion. Angetragen sind das Zeitbudget mit 6.6 Sekunden und die Hälfte des Zeitbudgets mit 3.3 Sekunden. Die blaue Raute markiert den Mittelwert der

*Übernahmezeit=◆, das blaue Kreuz den Mittelwert des Zeitpunkts der TTCmin=X und die blauen Pfeile die jeweilige Standardabweichung.*

Die Abbildung 5-15 zeigt die Blicksequenz für die Bedingung OHNE\_FF1. Wie in Kapitel 5.3.3.1 besprochen, blicken einige Fahrer zum Zeitpunkt der Fehlfunktion nicht auf das vorausfahrende Fahrzeug. Ab 3.3 Sekunden gibt es ein Maximum bei der Blickzuwendung auf das vorausfahrende Fahrzeug. Das Maximum tritt etwas später und nicht so eindeutig wie bei MIT\_FF1 in Abbildung 5-14 auf und deckt sich mit der Übernahmezeit und dem Zeitpunkt der TTCmin. Gegen Ende des Intervalls wenden sich die Blicke vermehrt diversen AOIs zu. Blicke in die Szenerie gelten entweder dem neuen Fahrstreifen oder dem Gegenverkehr. Blicke in das Fahrzeuginnere richten sich fast ausschließlich auf den Knopf an der Lenkradspeiche zur erneuten Aktivierung der Automation. Im Tacho wird die Aktivierung überprüft. Vermehrte Blickübergänge zeigen eine höhere Blickwechselaktivität als in der vorhergehenden Abbildung MIT\_FF1.

Die Abbildung 5-16 zeigt die Blicksequenz für die Bedingung MIT\_FF2. Von Anfang an dominiert das AOI FzgVor; das erschwert die Lokalisierung eines Maximums. Durch Lerneffekte finden die Übernahme (siehe Kapitel 5.3.2.3) und der Zeitpunkt der TTCmin früher statt. Bis die kritische Situation nach ca. 4.5 Sekunden gelöst ist, gibt es nahezu keine Blickaktivität. Danach werden wieder allmählich die AOIs Szenerie, Tacho und Fahrzeuginnenraum angeblickt.

Die Abbildung 5-17 zeigt die Blicksequenz für die Bedingung OHNE\_FF2. Die Blicksequenz ähnelt der der Bedingung OHNE\_FF1 in Abbildung 5-15. Im Bereich von 3.3 Sekunden ist wieder eine zeitweise Fokussierung auf das vorausfahrende Fahrzeug zu erkennen. Nachdem die Übernahme stattgefunden hat und der kritischste Moment der TTCmin vorbei ist, steigt wieder die Blickzuwendung zu den AOIs Szenerie, Tacho und Fahrzeuginnenraum.

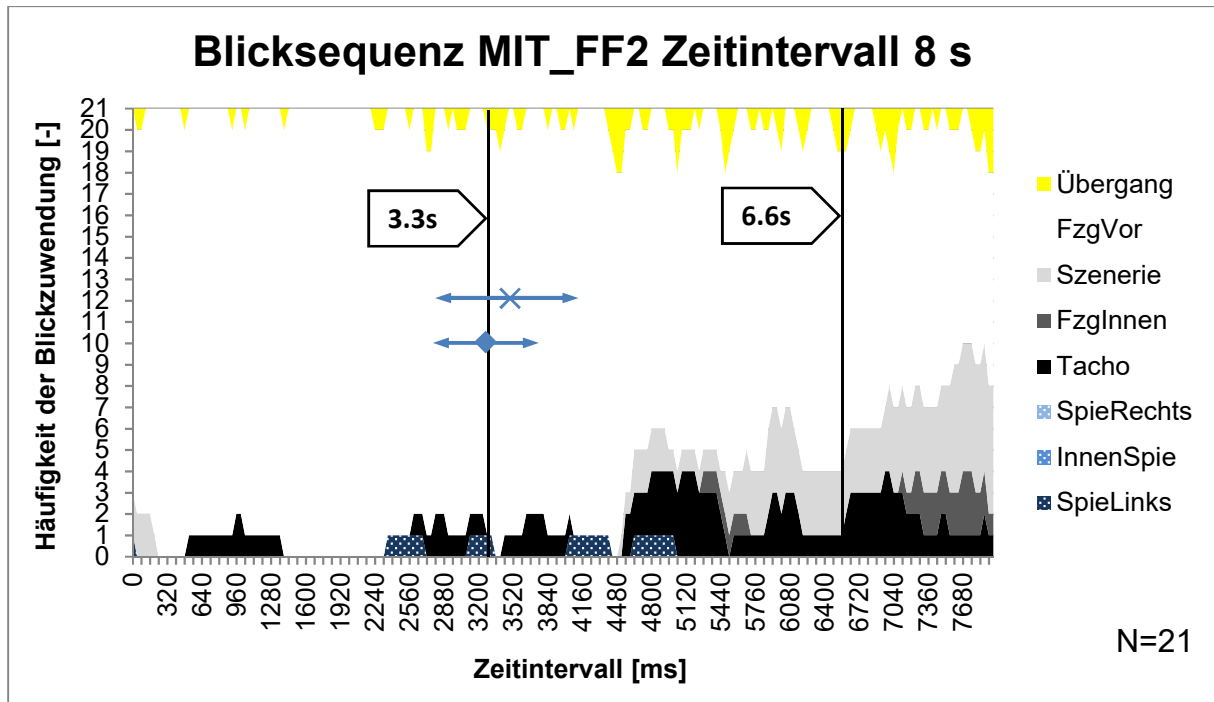


Abbildung 5-16: Blickzuwendungen in der Bedingung MIT\_FF2 auf die unterschiedlichen AOIs in einem Zeitintervall von 8 Sekunden, beginnend mit der Fehlfunktion. Angetragen sind das Zeitbudget mit 6.6 Sekunden und die Hälfte des Zeitbudgets mit 3.3 Sekunden. Die blaue Raute markiert den Mittelwert der Übernahmezeit= $\blacklozenge$ , das blaue Kreuz den Mittelwert des Zeitpunkts der TTCmin= $\times$  und die blauen Pfeile die jeweilige Standardabweichung.

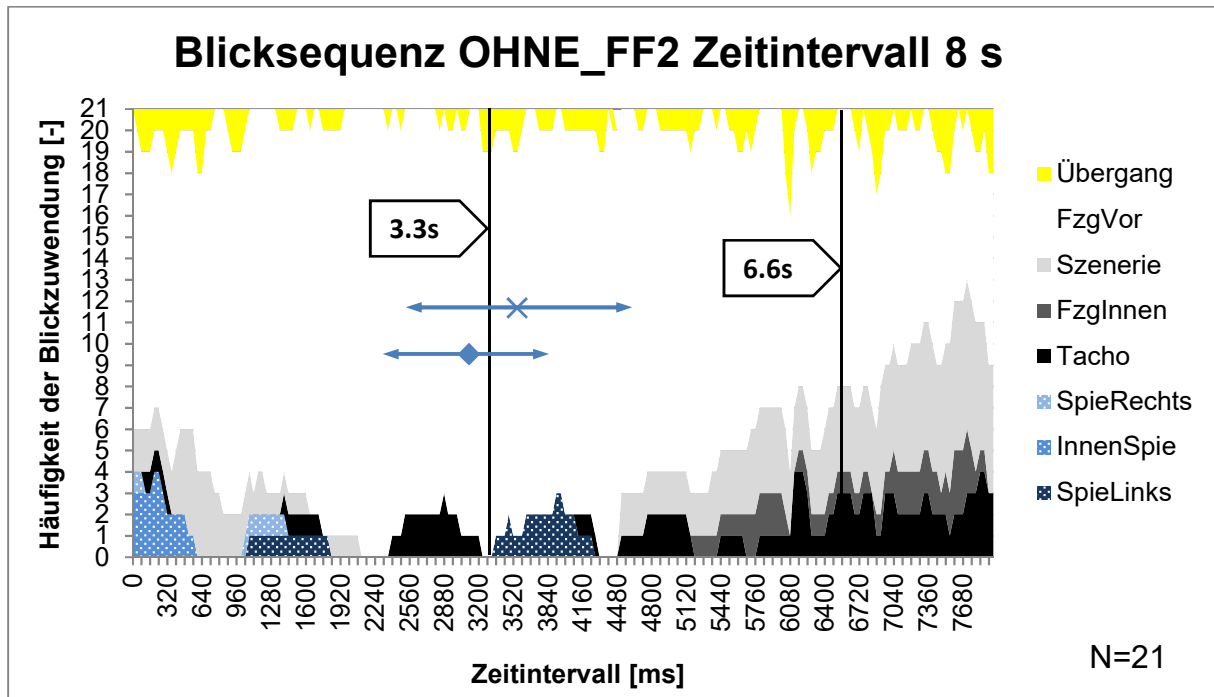


Abbildung 5-17: Blickzuwendungen in der Bedingung OHNE\_FF2 auf die unterschiedlichen AOIs in einem Zeitintervall von 8 Sekunden, beginnend mit der Fehlfunktion. Angetragen sind das Zeitbudget mit 6.6 Sekunden und die Hälfte des Zeitbudgets mit 3.3 Sekunden. Die blaue Raute markiert den Mittelwert der

*Übernahmezeit=◆, das blaue Kreuz den Mittelwert des Zeitpunkts der TTCmin=X und die blauen Pfeile die jeweilige Standardabweichung.*

Die Blickverläufe von OHNE\_FF1 und OHNE\_FF2 ähneln sich stark über die gesamte Intervalllänge von 8 Sekunden – abgesehen von einem vorgezogenen Blickmaximum auf das vorausfahrende Fahrzeug bei OHNE\_FF2, das zum Lerneffekt einer schnelleren Übernahme passt. Die Blickverläufe von MIT\_FF1 und MIT\_FF2 ähneln sich im Anfangsbereich durch eine andauernd hohe Blickzuwendung zum vorausfahrenden Fahrzeug. Ein eindeutiger Zeitbereich des Maximums ist nicht bestimmbar. Für alle vier Bedingungen ist ab spätestens 5 Sekunden eine Blickzunahme auf diverse AOIs festzustellen. Eine quantitative Bewertung findet in den folgenden Kapiteln statt.

Anhand der vorausgehenden Abbildungen soll ein sinnvolles Zeitintervall ermittelt werden. Zur Orientierung sind das Zeitbudget von 6.6 Sekunden und die Hälfte des Zeitbudgets von 3.3 Sekunden angetragen. Im Bereich von der Fehlfunktion bis 3.3 Sekunden haben die Informationsaufnahme, -verarbeitung und die Handlungsentscheidung stattgefunden. Bei einigen Fahrern hat die Handlungsumsetzung bereits begonnen. Das zweite Teilintervall von 3.3 Sekunden bis 6.6 Sekunden ist dominiert von der Handlungsumsetzung. Die Übernahme findet statt und der kritischste Moment der TTCmin wird von den Fahrern überwunden. Die Blickaktivität steigt durch Blickzuwendungen auf AOIs, die nicht das bis dahin kritische Kollisionsobjekt betreffen. Dieser Vorgang setzt in allen Versuchsbedingungen ungefähr 5 Sekunden nach der Fehlfunktion ein. Ab der 6.6-Sekunden-Grenze ist das vorausfahrende Fahrzeug entweder für einige Fahrer nicht mehr im Sichtbereich oder kein relevantes Objekt mehr. Ihre Aufmerksamkeit gehört jetzt der erneuten Aktivierung der Automation.

Das Blickverhalten im ersten Teilintervall ist am aussagekräftigsten für die Phase der Informationsaufnahme bis zur Handlungsentscheidung und wird deswegen im Folgenden als Betrachtungsintervall zur Blickauswertung verwendet. Gold (2016) ermittelte unter anderem das Zeitbudget als guten Prädiktor für die Modellierung einer Übernahme. Aus diesem Grund scheint eine Verknüpfung des Intervallendes mit dem Zeitbudget sinnvoll. Da Fahrer die Aufgabenschwierigkeit selbst bestimmen, indem sie sich bei einem größeren Zeitbudget mehr Zeit für die Handlungsdurchführung nehmen (Fuller, 2005), zeigt sich auch hier eine Verbindung von Zeitbudget und

Übernahmezeit. Das Betrachtungsintervall wird vom Auftreten der Fehlfunktion bis zur 50 %-Zeitbudget-Grenze festgelegt, wie es bereits in den Abbildungen eingetragen ist. Es scheint sinnvoll, eine methodische Präzisierung als Richtlinie aufzunehmen, die nicht nur die Dokumentation der Betrachtungsintervalle fordert, sondern auch die Bestimmung geeigneter Intervallgrenzen in Bezug auf Übernahme-situationen regelt.

- E: Für diese Studie wird ein Betrachtungsintervall vom Auslösen der Fehlfunktion bis zum 50 %-Zeitbudget der möglichen Kollision ausgewertet.
- M: Richtlinien über aussagekräftige Betrachtungsintervalle bei Übernahme-situationen müssen festgelegt werden.
- F: Varianten zur Festlegung sinnvoller Betrachtungsintervalle sollten in weiteren Studien geklärt werden.

### **5.3.3.3 Prozentuale Verweildauer bei Fehlfunktion (FF)**

Da während des betrachteten Zeitintervalls nur ein Fahrer in das AOI FzgLInnen geblickt hat, ist dieses AOI nur in den statistischen Ergebnissen der Tabellen aufgeführt und nicht in den Abbildungen als Balkendiagramm dargestellt. Ab Kapitel 5.3.4 ist das AOI FzgLInnen für die Normalfahrt auch grafisch abgebildet.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verweildauer auf die AOIs. Der Blickübergang hat per Definition weder ein festes AOI, noch ist er eine Zeit, in der Information aufgenommen wird. Aus Platzgründen ist er in die Abbildungen dennoch eingereiht.

Abbildung 5-18 zeigt die prozentuale Verweildauer im Zeitintervall 3.3 Sekunden für alle Versuchsbedingungen. In Tabelle 5-4 sind die statistischen Testergebnisse aufgeführt, die in Abbildung 5-18 grafisch übertragen wurden.

MIT\_kHUD blickten die Fahrer signifikant kürzer in die Szenerie. Blicke in die Szenerie betrafen das vorausfahrende Fahrzeug auf dem rechten Nachbarfahrstreifen und den Gegenverkehr. Diese Blickzuwendungen waren für die erfolgreiche Lösung der Situation nicht wichtig. Tendenziell wurde MIT\_kHUD kürzer in den linken und den rechten Außenspiegel geblickt. Solange die Fahrer keinen Fahrstreifenwechsel planten, sind beide AOIs uninteressant. Bei einem Fahrstreifenwechsel ist das AOI SpieLinks als sehr wichtig einzustufen. MIT\_kHUD wurde signifikant länger auf das vorausfahrende Fahrzeug geblickt. Die kontaktanaloge Anzeige zeigt hier eine fokussierende Wirkung auf das regelrelevante Objekt. Die geringeren Standardabweichungen der Gruppe MIT\_kHUD gegenüber der Gruppe OHNE\_kHUD

deuten auf ein einheitlicheres Blickverhalten auf das AOI FzgVor hin. MIT\_kHUD waren die Übergangszeiten signifikant kürzer als OHNE\_kHUD.

Die Messwiederholung zeigt nur bezüglich des AOI SpieRechts die Tendenz, in der zweiten Fehlfunktion weniger angeblickt zu werden.

Das AOI Tacho wird bei beiden Gruppen und in beiden Fehlfunktionen gleichbleibend wenig Aufmerksamkeit (ca. 2–3 %) geschenkt. Von der Fehlfunktion bis zur Entscheidungsfindung beziehen in beiden Gruppen nur wenige Fahrer Information aus dem Tacho.

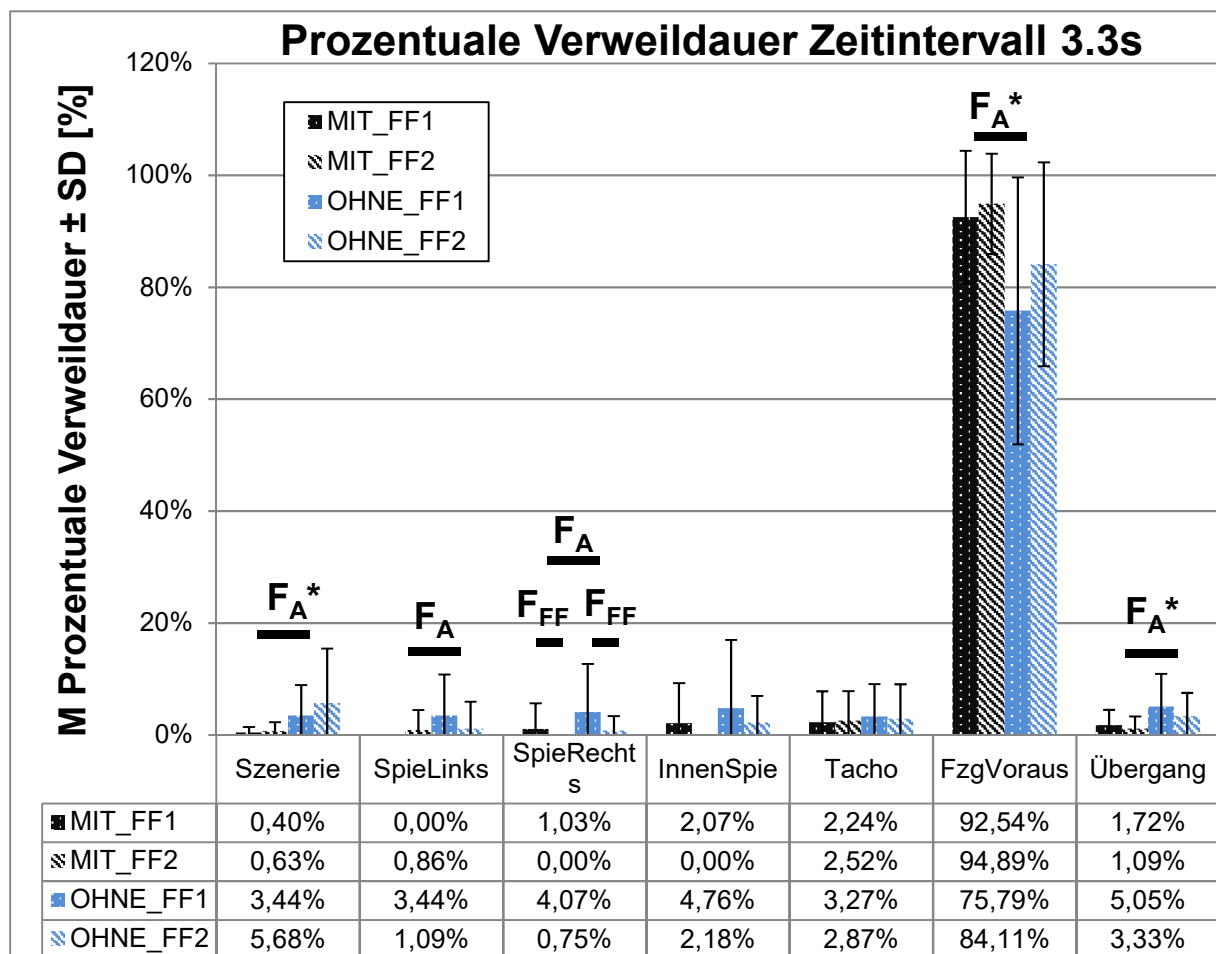


Abbildung 5-18: Prozentuale Verweildauer mit Standardabweichung auf die unterschiedlichen AOIs für die Gruppen MIT\_kHUD (N=21) und OHNE\_kHUD (N=21) und die Messwiederholung FF1 und FF2. Die Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.



*Tabelle 5-4: Statistische Ergebnisse der prozentualen Verweildauer für den Innersubjektfaktor Fehlfunktion=FF, die Interaktion=A\*FF und den Zwischensubjektfaktor Anzeige=A.*

Szenerie	Spieliinks
$F_{FF}(1,40)=1.639, p=.208, \eta^2=.039$	$F_{FF}(1,40)=.465, p=.499, \eta^2=.011$
$F_{A*FF}(1,40)=1.079, p=.305, \eta^2=.026$	$F_{A*FF}(1,40)=2.100, p=.155, \eta^2=.050$
$F_A(1,40)=7.244, p=.010, \eta^2=.153$	$F_A(1,40)=3.259, p=.079, \eta^2=.075$
Spierechts	InnenSpie
$F_{FF}(1,40)=3.466, p=.070, \eta^2=.080$	$F_{FF}(1,40)=1.765, p=.191, \eta^2=.042$
$F_{A*FF}(1,40)=.944, p=.337, \eta^2=.023$	$F_{A*FF}(1,40)=.018, p=.893, \eta^2=.000$
$F_A(1,40)=2.954, p=.093, \eta^2=.069$	$F_A(1,40)=2.302, p=.137, \eta^2=.054$
Tacho	FzgVor
$F_{FF}(1,40)=.004, p=.953, \eta^2=.000$	$F_{FF}(1,40)=2.742, p=.106, \eta^2=.064$
$F_{A*FF}(1,40)=.088, p=.768, \eta^2=.002$	$F_{A*FF}(1,40)=.880, p=.354, \eta^2=.022$
$F_A(1,40)=.261, p=.613, \eta^2=.006$	$F_A(1,40)=10.631, p=.002, \eta^2=.210$
Fzginnen	Übergang
$F_{FF}(1,40)=1.000, p=.323, \eta^2=.024$	$F_{FF}(1,40)=1.653, p=.206, \eta^2=.040$
$F_{A*FF}(1,40)=1.000, p=.323, \eta^2=.024$	$F_{A*FF}(1,40)=.304, p=.585, \eta^2=.008$
$F_A(1,40)=1.000, p=.323, \eta^2=.024$	$F_A(1,40)=10.288, p=.003, \eta^2=.205$

- ➔ E: MIT\_kHUD wird prozentual länger auf das vorausfahrende Fahrzeug geblickt als OHNE\_kHUD.
- ➔ E: MIT\_kHUD ist die prozentuale Blickübergangszeit kürzer als OHNE\_kHUD.
- ➔ E: MIT\_kHUD wird prozentual kürzer in das AOI Szenerie geblickt.
- ➔ E: Die prozentuale Verweildauer auf das AOI Tacho ist unbeeinflusst und in allen Bedingungen sehr gering.
- ➔ E: MIT\_kHUD wird tendenziell prozentual kürzer in die AOIs Spieliinks und Spierechts geblickt.
- ➔ E: Es sind keine Lerneffekte durch Wiederholung nachzuweisen.

#### 5.3.3.4 Blickhäufigkeit bei Fehlfunktion (FF)

Abbildung 5-19 zeigt die Blickhäufigkeit im Zeitintervall 3.3 Sekunden für alle Versuchsbedingungen. In Tabelle 5-5 sind die statistischen Testergebnisse aufgeführt, die in Abbildung 5-19 grafisch übertragen wurden.

MIT\_kHUD wurde tendenziell seltener in die Szenerie und auf das vorausfahrende Fahrzeug geblickt als OHNE\_kHUD. MIT\_kHUD wurde signifikant seltener auf die AOIs Spierechts und InnenSpie geblickt. Der rechte Außenspiegel ist für die Lösung der Situation ein unwichtiges AOI. Der Innenspiegel ist nicht so wichtig wie der linke Außenspiegel, gibt aber trotzdem Information über den rückwärtigen Verkehr.

MIT\_kHUD gab es signifikant weniger Übergänge als OHNE\_kHUD. Fahrer MIT\_kHUD zeigen ein statischeres Blickverhalten mit deutlich weniger Blickwechseln, wie es qualitativ auch die Blickverläufe in Kapitel 5.3.3.2 zeigten. Die hohe Standardabweichung in der Gruppe MIT\_kHUD wird von der Gruppe OHNE\_kHUD fast um ein Zweifaches überschritten. Die große Varianz in der Blickhäufigkeit der beiden Gruppen weist auf starke individuelle Unterschiede hin. Tendenziell gibt es einen Interaktionseffekt zwischen Anzeige und Fehlfunktion im AOI SpieLinks bezüglich der Blickhäufigkeit. Durch die geringe Anzahl an Fahrstreifenwechsel kann dieser Effekt zufallsbedingt sein. Die Blickhäufigkeit auf das AOI Tacho zeigt in keinem Faktor einen Einfluss.

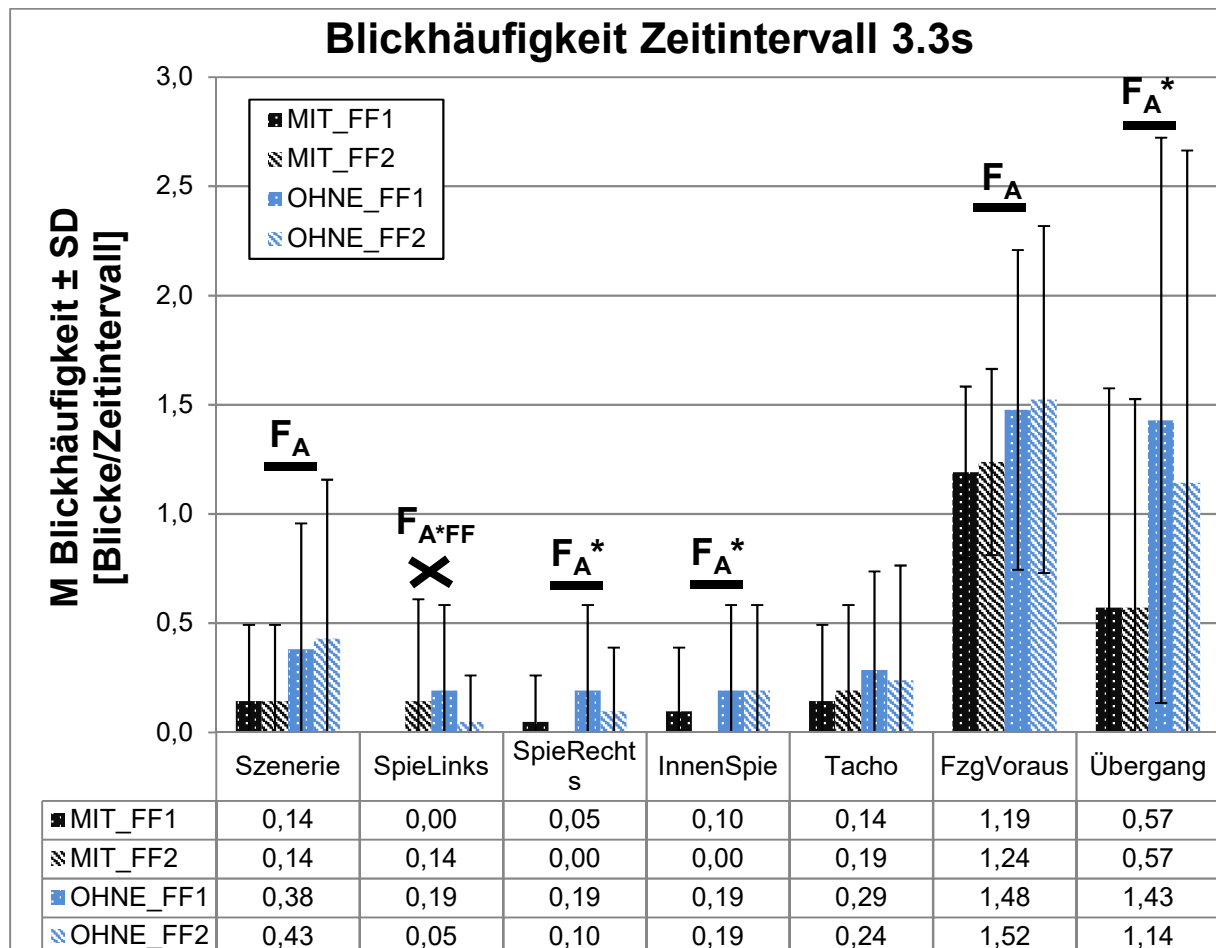


Abbildung 5-19: Blickhäufigkeit mit Standardabweichung auf die unterschiedlichen AOI für die Gruppen MIT\_kHUD (N=21) und OHNE\_kHUD (N=21) und die Messwiederholung FF1 und FF2. Die Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.

*Tabelle 5-5: Statistische Ergebnisse der Blickhäufigkeit für den Innersubjektfaktor Fehlfunktion=FF, die Interaktion=A\*FF und den Zwischensubjektfaktor Anzeige=A.*

Szenerie	SpieLinks
$F_{FF}(1,40)=.074, p=.788, \eta^2=.002$	$F_{FF}(1,40)=.000, p=1.000, \eta^2=.000$
$F_{A*FF}(1,40)=.074, p=.788, \eta^2=.002$	$F_{A*FF}(1,40)=3.750, p=.060, \eta^2=.086$
$F_A(1,40)=3.437, p=.071, \eta^2=.079$	$F_A(1,40)=.455, p=.504, \eta^2=.011$
SpieRechts	InnenSpie
$F_{FF}(1,40)=1.268, p=.267, \eta^2=.031$	$F_{FF}(1,40)=.388, p=.537, \eta^2=.010$
$F_{A*FF}(1,40)=.141, p=.709, \eta^2=.004$	$F_{A*FF}(1,40)=.388, p=.537, \eta^2=.010$
$F_A(1,40)=4.545, p=.039, \eta^2=.102$	$F_A(1,40)=5.070, p=.030, \eta^2=.112$
Tacho	FzgVor
$F_{FF}(1,40)=.000, p=1.000, \eta^2=.000$	$F_{FF}(1,40)=.137, p=.714, \eta^2=.003$
$F_{A*FF}(1,40)=.274, p=.604, \eta^2=.007$	$F_{A*FF}(1,40)=.000, p=1.000, \eta^2=.000$
$F_A(1,40)=.851, p=.362, \eta^2=.021$	$F_A(1,40)=3.902, p=.055, \eta^2=.089$
FzgInnen	Übergang
$F_{FF}(1,40)=1.000, p=.323, \eta^2=.024$	$F_{FF}(1,40)=.317, p=.577, \eta^2=.008$
$F_{A*FF}(1,40)=1.000, p=.323, \eta^2=.024$	$F_{A*FF}(1,40)=.429, p=.317, \eta^2=.008$
$F_A(1,40)=1.000, p=.323, \eta^2=.024$	$F_A(1,40)=6.135, p=.018, \eta^2=.133$

- ➔ E: MIT\_kHUD wird tendenziell seltener in die AOIs Szenerie und FzgVor geblickt.
- ➔ E: MIT\_kHUD gibt es seltener Blickübergänge.
- ➔ E: Die Häufigkeit der Blickübergänge weist eine sehr hohe Varianz auf.
- ➔ E: MIT\_kHUD werden die AOIs SpieRechts und InnenSpie seltener angeblickt.
- ➔ E: Die Blickhäufigkeit auf das AOI Tacho ist unbeeinflusst.
- ➔ E: Es sind keine Lerneffekte durch Wiederholung nachzuweisen.

### 5.3.3.5 Mittlere Verweildauer bei Fehlfunktion (FF)

Abbildung 5-20 zeigt die mittlere Verweildauer im Zeitintervall 3.3 Sekunden für alle Versuchsbedingungen. In Tabelle 5-6 sind die statistischen Testergebnisse aufgeführt, die in Abbildung 5-20 grafisch übertragen wurden.

MIT\_kHUD wird signifikant kürzer auf das unwichtige AOI Szenerie geblickt. Die signifikant geringere prozentuale Verweildauer (Abbildung 5-18) lässt sich hauptsächlich durch diesen Effekt erklären, der durch eine tendenziell geringere Blickhäufigkeit MIT\_kHUD (Abbildung 5-19) unterstützt wird.

MIT\_kHUD wird signifikant kürzer auf das AOI SpieLinks geblickt als OHNE\_kHUD. Bei der prozentualen Verweildauer ist dieser Effekt in der Tendenz zu erkennen. Ein ähnlicher Effekt wiederholt sich für die prozentuale Blickdauer in der unten folgenden Normalfahrt (siehe Kapitel 5.3.4.1).

In der Tendenz wird MIT\_kHUD kürzer auf das unwichtige AOI SpieRechts geblickt als OHNE\_kHUD. Der Effekt wird durch die geringere Blickhäufigkeit (siehe Abbildung 5-19) dominiert.

MIT\_kHUD wird signifikant länger auf das AOI FzgVor geblickt als OHNE\_kHUD. Die größere prozentuale Verweildauer ist dadurch zu erklären.

MIT\_kHUD sind die Übergänge signifikant kürzer als OHNE\_kHUD. Die Standardabweichung ist in allen Bedingungen sehr gering. Der Effekt deckt sich mit der prozentualen Verweildauer in den Übergängen.

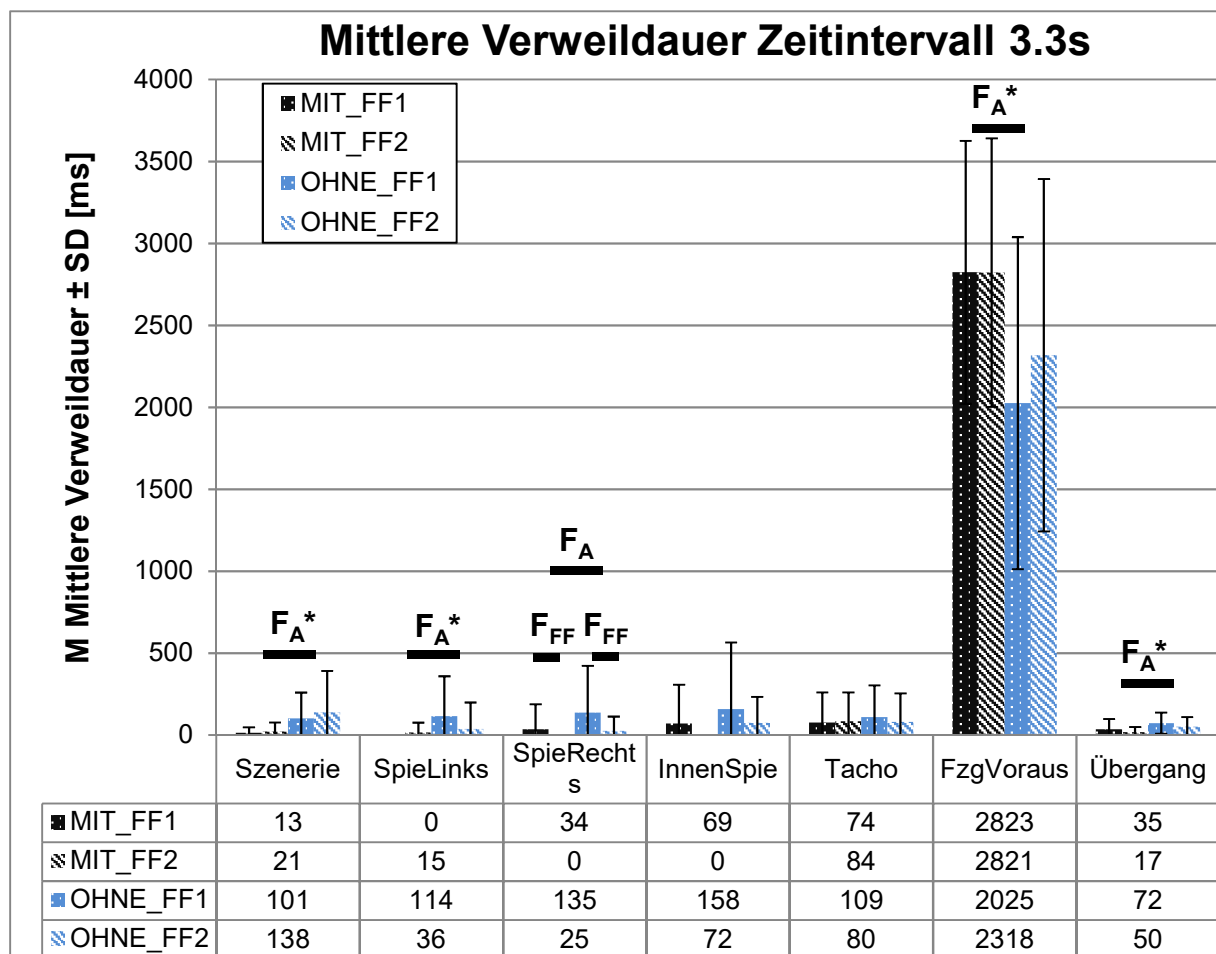


Abbildung 5-20: Mittlere Verweildauer mit Standardabweichung auf die unterschiedlichen AOIs für die Gruppen MIT\_kHUD (N=21) und OHNE\_kHUD (N=21) und die Messwiederholung FF1 und FF2. Die Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.

In der Tendenz wird das unwichtige AOI SpieRechts bei FF2 kürzer angeblickt als in FF1. Bei Normalfahrt zeichnet sich dieser Effekt deutlich ab. Im Betrachtungsintervall der Fehlfunktion sind in keiner der Blickkenngößen nennenswerte Veränderungen

zwischen FF1 und FF2 zu vermerken. Das Blickverhalten in der Informationsaufnahme und -verarbeitungsphase der Fahrer zur Lösung der Situationen scheint sich für die jeweiligen Gruppen etabliert zu haben.

Auch bei der mittleren Verweildauer zeigt sich kein Einfluss der Anzeige oder der Wiederholung auf das AOI Tacho.

*Tabelle 5-6: Statistische Ergebnisse der mittleren Verweildauer für den Innersubjektfaktor Fehlfunktion=FF, die Interaktion=A\*FF und den Zwischensubjektfaktor Anzeige=A.*

Szenerie	SpieLinks
$F_{FF}(1,40)=.677, p=.415, \eta^2=.017$	$F_{FF}(1,40)=.809, p=.374, \eta^2=.020$
$F_{A*FF}(1,40)=.295, p=.590, \eta^2=.007$	$F_{A*FF}(1,40)=1.784, p=.189, \eta^2=.043$
$F_A(1,40)=6.615, p=.014, \eta^2=.142$	$F_A(1,40)=4.509, p=.040, \eta^2=.101$
SpieRechts	InnenSpie
$F_{FF}(1,40)=3.503, p=.069, \eta^2=.081$	$F_{FF}(1,40)=1.764, p=.192, \eta^2=.042$
$F_{A*FF}(1,40)=.970, p=.331, \eta^2=.024$	$F_{A*FF}(1,40)=.022, p=.883, \eta^2=.001$
$F_A(1,40)=2.975, p=.092, \eta^2=.069$	$F_A(1,40)=2.339, p=.134, \eta^2=.055$
Tacho	FzgVor
$F_{FF}(1,40)=.056, p=.814, \eta^2=.001$	$F_{FF}(1,40)=.615, p=.438, \eta^2=.015$
$F_{A*FF}(1,40)=.225, p=.638, \eta^2=.006$	$F_{A*FF}(1,40)=.631, p=.432, \eta^2=.016$
$F_A(1,40)=.136, p=.715, \eta^2=.003$	$F_A(1,40)=7.979, p=.007, \eta^2=.166$
FzgInnen	Übergang
$F_{FF}(1,40)=1.000, p=.323, \eta^2=.024$	$F_{FF}(1,40)=2.326, p=.135, \eta^2=.055$
$F_{A*FF}(1,40)=1.000, p=.323, \eta^2=.024$	$F_{A*FF}(1,40)=.029, p=.867, \eta^2=.001$
$F_A(1,40)=1.000, p=.323, \eta^2=.024$	$F_A(1,40)=7.907, p=.008, \eta^2=.165$

- ➔ E: MIT\_kHUD ist die mittlere Verweildauer auf das AOI Szenerie kürzer.
- ➔ E: MIT\_kHUD ist die mittlere Verweildauer auf das AOI SpieLinks kürzer.
- ➔ E: MIT\_kHUD ist die mittlere Verweildauer auf das AOI FzgVor länger.
- ➔ E: MIT\_kHUD sind die mittleren Übergangszeiten kürzer.
- ➔ E: Die mittlere Verweildauer auf das AOI Tacho ist von der Art der Anzeige unbeeinflusst.
- ➔ E: Es sind keine Lerneffekte durch Wiederholung nachzuweisen.

### 5.3.3.6 Zusammenfassung Blickkenngrößen bei Fehlfunktion (FF)

MIT\_kHUD wird prozentual länger auf das AOI **FzgVor** geblickt. Dieser Effekt kommt ausschließlich aus einer längeren mittleren Verweildauer. Die Blickhäufigkeit ist tendenziell gegenläufig. MIT\_kHUD sind die Varianzen in diesen Größen sehr gering, was für die Aussagekraft der Daten spricht. Die kontaktanaloge Anzeige hat in der

zeitkritischen Übernahmephase eine fokussierende Wirkung auf die Fahrer. Das AOI FzgVor dominiert in diesem Zeitintervall mit 75–95 % Blickanteil.

→ E: MIT\_kHUD wird prozentual und im Mittel länger auf das wichtige AOI FzgVor geblickt.

→ E: Die kontaktanaloge Anzeige hat eine fokussierende Wirkung.

MIT\_kHUD wird prozentual kürzer in das AOI **Szenerie** geblickt. Dieser Effekt kommt hauptsächlich aus einer kürzeren mittleren Verweildauer, unterstützt durch eine geringere Blickhäufigkeit. Das AOI Szenerie betrifft unwichtige Bereiche, wie das vorausfahrende Fahrzeug auf dem Nachbarstreifen und den Gegenverkehr. MIT\_kHUD lässt sich ein Teil des Blickzuwachses im AOI FzgVor durch die Reduzierung im AOI Szenerie erklären.

→ E: MIT\_kHUD wird prozentual und im Mittel kürzer auf das unwichtige AOI Szenerie geblickt.

→ E: MIT\_kHUD verschiebt sich der Blickanteil von der Szenerie zum vorausfahrenden Fahrzeug.

MIT\_kHUD ist die mittlere Verweildauer auf das AOI **SpieLinks** kürzer. Zusammen mit der Tendenz zu einer kürzeren prozentualen Verweildauer kann dahinter der Effekt vermutet werden, dass durch eine kontaktanaloge Anzeige die Absicherungsblicke vernachlässigt werden. Dazu passte auch vorwegnehmend die geringere Blickhäufigkeit der Blickübergänge MIT\_kHUD (siehe unten). Es muss berücksichtigt werden, dass das Zeitintervall einen sehr kurzen Zeitraum abdeckt. Fahrer, die zuerst bremsen und danach einen Fahrstreifenwechsel durchführten, fallen mit ihren Absicherungsblicken aus dem Zeitintervall. In Kapitel 5.3.2.2 zur Absicherung des Fahrstreifenwechsels sind längere Zeithorizonte berücksichtigt. Sie geben keine Hinweise auf eine negative Auswirkung der kontaktanalogen Anzeige auf das Absicherungsverhalten.

→ E: Das AOI SpieLinks hat in diesem Zeitintervall keine Aussagekraft.

Das AOI **Tacho** zeigt in keiner Blickkenngroße einen Einfluss der Anzeige. Es wird in dieser kurzen und kritischen Phase generell wenig Information aus dem Tacho bezogen. Die Situation erfordert eine Informationsaufnahme außerhalb des Fahrzeugs. Der Systemzustand ist für die Gruppe OHNE\_kHUD scheinbar nicht relevant, wenn es um die Vermeidung einer Kollision geht.

→ E: Das AOI Tacho zeigt in keiner Blickkenngroße einen Einfluss der Anzeige.

→ E: In dieser Phase des Übernahmeprozesses ist der Tacho kein wichtiger Informationsgeber für die Fahrer.

MIT\_kHUD sind die **Übergangszeiten** prozentual und im Mittel kürzer und seltener als OHNE\_kHUD. MIT\_kHUD werden deutlich weniger Blickwechsel vollzogen. Spiegelblicke und unwichtige Blicke in die Szenerie werden vermieden. Die Blickhäufigkeit variiert MIT\_kHUD stark und OHNE\_kHUD extrem. Hier zeichnen sich innerhalb der Gruppen unterschiedliche Präferenzen in der persönlichen Blickstrategie ab. MIT\_kHUD wird die eingesparte Übergangszeit in das AOI FzgVor investiert.

→ E: MIT\_kHUD finden weniger Blickwechsel statt.

Bis auf eine tendenziell geringere Verweildauer auf das AOI **SpieRechts** finden keine Lernprozesse zwischen FF1 und FF2 statt. Scheinbar ist in FF1 die Blickverteilung so weit optimiert, dass bei einem wiederholten Erleben der Fehlfunktion keine Anpassungen gemacht werden müssen. Die Wahl des Szenarios spielt hier sicherlich eine wichtige Rolle. Der Fokus liegt klar auf dem vorausfahrenden Fahrzeug. Seitlicher Verkehr war zu vernachlässigen, da ein Fahrstreifenwechsel nicht erforderlich war.

→ E: Das Blickverhalten der Fahrer ist soweit optimiert, dass keine nennenswerten Anpassungen im Blickverhalten zwischen FF1 und FF2 vorgenommen werden.

### **5.3.4 Blickkenngrößen bei Normalfahrt (NF)**

Nachdem das Blickverhalten im zeitkritischen Intervall unmittelbar nach der Fehlfunktion analysiert wurde, wird nun das langfristige Blickverhalten während der Normalfahrt auf Gefährdungspotenzial untersucht. Unter Normalfahrt wird in diesem Kontext verstanden, dass keine Fehlfunktion und keine Systemgrenze vorliegen. Für die Analyse der Normalfahrt werden ein Zeitintervall von ca. 9.5 Minuten vor der ersten Fehlfunktion und ein Zeitintervall von ca. 4 Minuten zwischen erster und zweiter Fehlfunktion betrachtet. Diese zwei Intervalle werden mit NF1 und NF2 bezeichnet und sind, wie FF1 und FF2, die Messwiederholung.

Die Ergebnisse wurden automatisiert ausgewertet und sind in ihrer Auflösung eingeschränkt. Deswegen gibt es hier kein AOI FzgVor, sondern nur das AOI Szenerie, in dem das vorausfahrende Fahrzeug enthalten ist. Es kann nicht unterschieden werden, ob in die Szenerie geblickt wird oder die kontaktanaloge Anzeige angeblickt wird. Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass in den folgenden Kapiteln Blickdauern und keine Verweildauern dokumentiert sind. Die Blickdauern enthalten bereits die Übergangszeiten, die deswegen nicht aufgeführt sind.

Um die Validität der Blickerfassung zu dokumentieren, sind in Tabelle 5-7 die mittleren Erkennungsraten von Pupille (Eye Index) und Marker (Marker Index) mit Standardabweichung dargestellt. Die Erkennungsraten liegen für die Pupille durchgehend bei knapp über 94 % und für die Marker bei ca. 98 %. Es fehlen Vergleichswerte zur Einordnung der Erkennungsqualität, da sie in Veröffentlichungen über Blickkennwerte nicht angegeben werden. Beide Erkennungsraten werden für diese Zeitintervalle als sehr gut eingeschätzt – unter der Berücksichtigung, dass die Pupillenerkennung durch Blinzeln der Probanden nie 100 % erreichen kann.

*Tabelle 5-7: Mittelwert (M) der Erkennungsrate der Pupille (Eye Index) und der Marker (Marker Index) mit Standardabweichung (SD) für die Bedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD in den Zeitintervallen der Normalfahrt NF1 und NF2.*

	M Eye Index	M Marker Index	SD Eye Index	SD Marker Index
MIT_NF1	94,49%	98,67%	4,13%	1,22%
MIT_NF2	94,15%	98,84%	4,23%	1,06%
OHNE_NF1	94,66%	97,69%	3,67%	2,32%
OHNE_NF2	94,43%	98,11%	2,99%	2,00%

Die prozentuale Blickdauer wird der absoluten Blickdauer vorgezogen, da sie zumindest von der Intervalllänge unabhängig ist. Die prozentuale Blickdauer auf die einzelnen AOIs in NF1 und NF2 wird aber weiterhin durch die Manöver beeinflusst. Deswegen ist in Tabelle 5-8 die Anzahl der Manöver für das entsprechende Zeitintervall aufgeführt, um die anschließenden statistischen Tests ausreichend interpretieren zu können.

*Tabelle 5-8: Art und Anzahl der Manöver in den Zeitintervallen der Normalfahrt NF1 (9.5 Minuten) und NF2 (4 Minuten).*

Manöver in NF1 (9.5 min)	Anzahl	Manöver in NF2 (4 min)	Anzahl
Fahrstreifenwechsel links	4	Fahrstreifenwechsel links	1
Fahrstreifenwechsel rechts	3	Fahrstreifenwechsel rechts	1
Geschwindigkeitswechsel	7	Geschwindigkeitswechsel	3

In den AOIs SpieLinks und SpieRechts sind nicht nur die Spiegel, sondern auch die gesamte Seitenscheibe enthalten. Es wird nicht zwischen Spiegelblick und Schulterblick unterschieden.

➔ M: Erkennungsraten von Pupille und Marker sollten zukünftig in Veröffentlichungen angegeben werden.



#### **5.3.4.1 Prozentuale Blickdauer bei Normalfahrt (NF)**

Abbildung 5-21 zeigt die prozentuale Blickdauer für die zwei Zeitintervalle NF1 und NF2. In Tabelle 5-9 sind die statistischen Testergebnisse aufgeführt, die in Abbildung 5-21 grafisch übertragen wurden.

In dem AOI Szenerie ist ein signifikanter Einfluss der Anzeige zu erkennen. In beiden Zeitintervallen wurde in der Bedingung MIT\_kHUD ungefähr 7 % länger in die vorausliegende Szenerie geblickt. Auch wenn das automatisierte Verfahren des Blickerfassungssystems keine exakte Bestimmung zulässt, kann dieser Effekt der kontaktanalogen Anzeige zugeschrieben werden. Weißgerber et al. (2012b) konnten diesen Effekt bei der kontaktanalogen Markierung von Geschwindigkeitsschildern bereits nachweisen. Die Blickdaten während der Fehlfunktion in Kapitel 5.3.3 belegen den Effekt eindeutig.

In dem AOI SpieLinks ist ein signifikanter Einfluss der Anzeige zu erkennen. Die Gruppe MIT\_kHUD blickte 2–3 % kürzer in den linken Außenspiegel als die Gruppe OHNE\_kHUD. In der Tendenz ist ein ähnliches Verhalten bei dem AOI InnenSpie zu erkennen. Hier wurde unter der Bedingung MIT\_kHUD 1.5–2 % kürzer in den Innenspiegel geblickt.

Die längere Blickdauer der Gruppe MIT\_kHUD auf die Szenerie lässt sich zum einen durch die signifikant kürzere Blickdauer auf den linken Außenspiegel und zum anderen durch die tendenziell kürzere Blickdauer auf den Innenspiegel begründen. Die Blickdauer auf den rechten Außenspiegel und den Tacho zeigen keinen Einfluss der Anzeige und können nicht zur Klärung der Differenz der Blickdauer auf das AOI Szenerie beitragen.

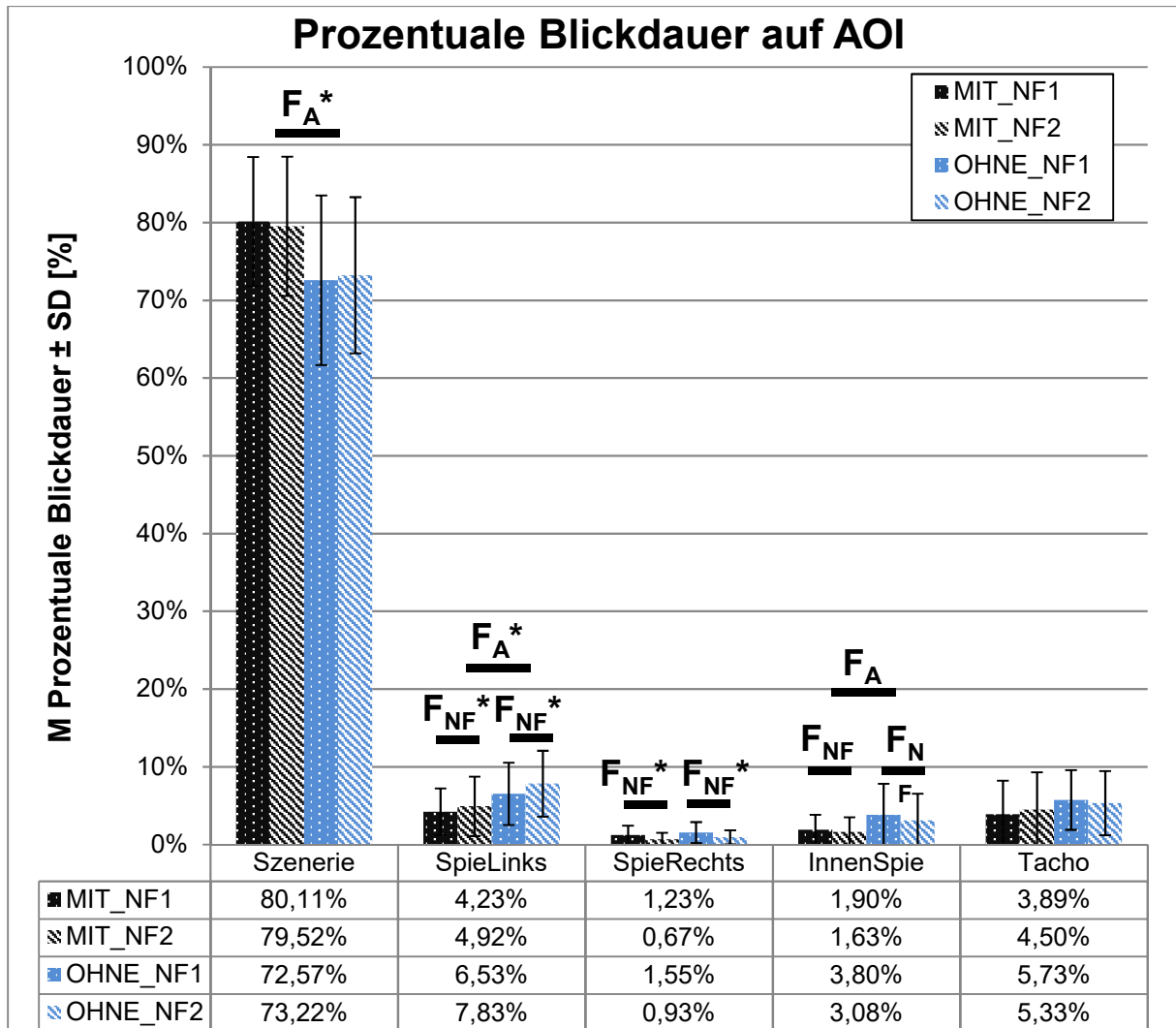


Abbildung 5-21: Prozentuale Blickdauer auf die unterschiedlichen AOIs für die Gruppen MIT\_kHUD (N=21) und OHNE\_kHUD (N=21) und die Messwiederholung NF1 und NF2. Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 5-9: Statistische Ergebnisse der prozentualen Blickdauer für den Innersubjektfaktor Normalfahrt=NF, die Interaktion=A\*NF und den Zwischensubjektfaktor Anzeige=A.

Szenerie	SpielLinks
$F_{NF}(1,40)=.002, p=.963, \eta^2=.000$	$F_{NF}(1,40)=6.274, p=.016, \eta^2=.136$
$F_{A*NF}(1,40)=.869, p=.357, \eta^2=.021$	$F_{A*NF}(1,40)=.595, p=.445, \eta^2=.015$
$F_A(1,40)=5.737, p=.021, \eta^2=.125$	$F_A(1,40)=5.604, p=.023, \eta^2=.123$
SpielRechts	InnenSpie
$F_{NF}(1,40)=14.001, p=.001, \eta^2=.259$	$F_{NF}(1,40)=3.946, p=.054, \eta^2=.090$
$F_{A*NF}(1,40)=.036, p=.850, \eta^2=.001$	$F_{A*NF}(1,40)=.839, p=.365, \eta^2=.021$
$F_A(1,40)=.967, p=.331, \eta^2=.024$	$F_A(1,40)=3.592, p=.065, \eta^2=.082$
Tacho	
$F_{NF}(1,40)=.092, p=.763, \eta^2=.002$	
$F_{A*NF}(1,40)=2.244, p=.142, \eta^2=.053$	
$F_A(1,40)=1.089, p=.303, \eta^2=.026$	

Die kontaktanaloge Anzeige verursacht beim Fahrer eine Fokussierung auf die vorausliegende Szenerie, in der die Anzeigeelemente positioniert sind. Gleichzeitig reduziert der Fahrer teilweise die Blickdauer in die Spiegel und damit auf die rückwärtige bzw. seitliche Szenerie. Bei allen durchzuführenden Fahrstreifenwechseln waren die Zielfahrstreifen frei. Eine Aussage zu mangelndem Absicherungsverhalten kann hier nicht getroffen werden, muss aber weiterhin beobachtet werden.

Es ist ein signifikanter Innersubjekteffekt zwischen den Zeitintervallen NF1 und NF2 im AOI SpieLinks zu erkennen. Hier wurde in NF2 – nach dem Erleben der ersten Fehlfunktion – länger in den linken Außenspiegel geblickt als bei NF1, obwohl in NF1 vier und in NF2 nur ein Fahrstreifenwechsel nach links stattgefunden hat (siehe Tabelle 5-8). In beiden Gruppen haben die Probanden ihre Blickstrategie angepasst und den linken Außenspiegel nach der ersten Fehlfunktion als wichtigere Informationsquelle eingestuft.

Im AOI SpieRechts ist ein gegenläufiger Effekt zu erkennen. Hier wurde in NF2 signifikant kürzer in den rechten Außenspiegel geblickt als bei NF1. Das deckt sich mit der geringeren Manöveranzahl bei den Fahrstreifenwechseln nach rechts in Tabelle 5-8. Gleichzeitig wurde auch bei der prozentualen Verweildauer bei Fehlfunktion von FF1 zu FF2 eine tendenzielle Verkürzung der Blickzeit in das AOI SpieRechts festgestellt (siehe Kapitel 5.3.3.3). Hier kann eine Blickoptimierung als Lernprozess unterstellt werden.

Im AOI InnenSpie ist der tendenzielle Effekt zu erkennen, dass in NF2 weniger lang in den Innenspiegel geblickt wird als bei NF1.

Bezüglich der Informationsaufnahme aus den Rückspiegeln findet ein blickstrategischer Optimierungsprozess in kleinem Maße statt. Dieser Prozess ist nicht strikt an die erlebten Manöver gebunden, wie das Blickverhalten auf das AOI SpieLinks zeigt.

Das AOI Tacho zeigt weder einen Einfluss der Anzeige noch der Wiederholung. Im Durchschnitt wurden ungefähr 4 % der Zeit in den Tacho geblickt. Hier kann abgeleitet werden, dass die Information im Tacho manöverunabhängig und auch unabhängig von einer zusätzlichen kontaktanalogen Anzeige abgefragt wird. Trotz der identischen Information in Tacho und kHUD (siehe Kapitel 5.1.1.2) wird bei der Gruppe MIT\_kHUD der Tacho unverändert als wichtiger Informationsgeber genutzt. Eventuell wird die Information der kontaktanalogen Anzeige im Tacho bestätigt. Allerdings gilt einschränkend, dass durch die automatisierte Auswertung nicht im Detail bestimmt

werden kann, welche Information aus dem Tacho bezogen wurde. Der Tacho lieferte zusätzlich noch Information über Drehzahl und Benzinverbrauch, die für die Fahraufgabe unwichtig waren.

- E: MIT\_kHUD wird länger in das AOI Szenerie geblickt.
- E: MIT\_kHUD wird kürzer in das AOI SpieLinks geblickt.
- E: MIT\_kHUD wird tendenziell kürzer in das AOI InnenSpie geblickt.
- E: In NF2 wird länger in das AOI SpieLinks geblickt.
- E: In NF2 wird kürzer in das AOI SpieRechts geblickt.
- E: In NF2 wird tendenziell kürzer in das AOI InnenSpie geblickt.
- E: Das AOI Tacho wird weder durch die Anzeige noch die Wiederholung beeinflusst.
- E: Der Tacho wird in beiden Bedingungen als Informationsgeber genutzt.

#### **5.3.4.2 Blickhäufigkeit bei Normalfahrt (NF)**

Abbildung 5-22 zeigt die Blickhäufigkeit für die zwei Zeitintervalle NF1 und NF2. In Tabelle 5-10 sind die statistischen Testergebnisse aufgeführt, die in Abbildung 5-22 grafisch übertragen wurden.

MIT\_kHUD wurde signifikant seltener in das AOI SpieLinks geblickt. In der Tendenz wurde MIT\_kHUD seltener in das AOI InnenSpie geblickt. Diese Ergebnisse können die Unterschiede in der prozentualen Blickdauer in Kapitel 5.3.4.1 gut erklären. Die längere Blickdauer ergibt sich aus der größeren Blickhäufigkeit.

Die Messwiederholung zeigt, dass bei NF2 tendenziell häufiger auf das AOI Szenerie geblickt wurde. Die sehr große Standardabweichung der Blickhäufigkeit im Vergleich zur deutlich kleineren Standardabweichung bei der prozentualen Blickdauer weist darauf hin, dass die Probanden unterschiedliches Blickverhalten hatten. Bei NF2 wird signifikant seltener in das AOI SpieRechts geblickt. Die kürzere prozentuale Blickdauer resultiert aus den geringeren Blickzuwendungen zum AOI SpieRechts. Das AOI Tacho zeigt keine Unterschiede in der Blickhäufigkeit.

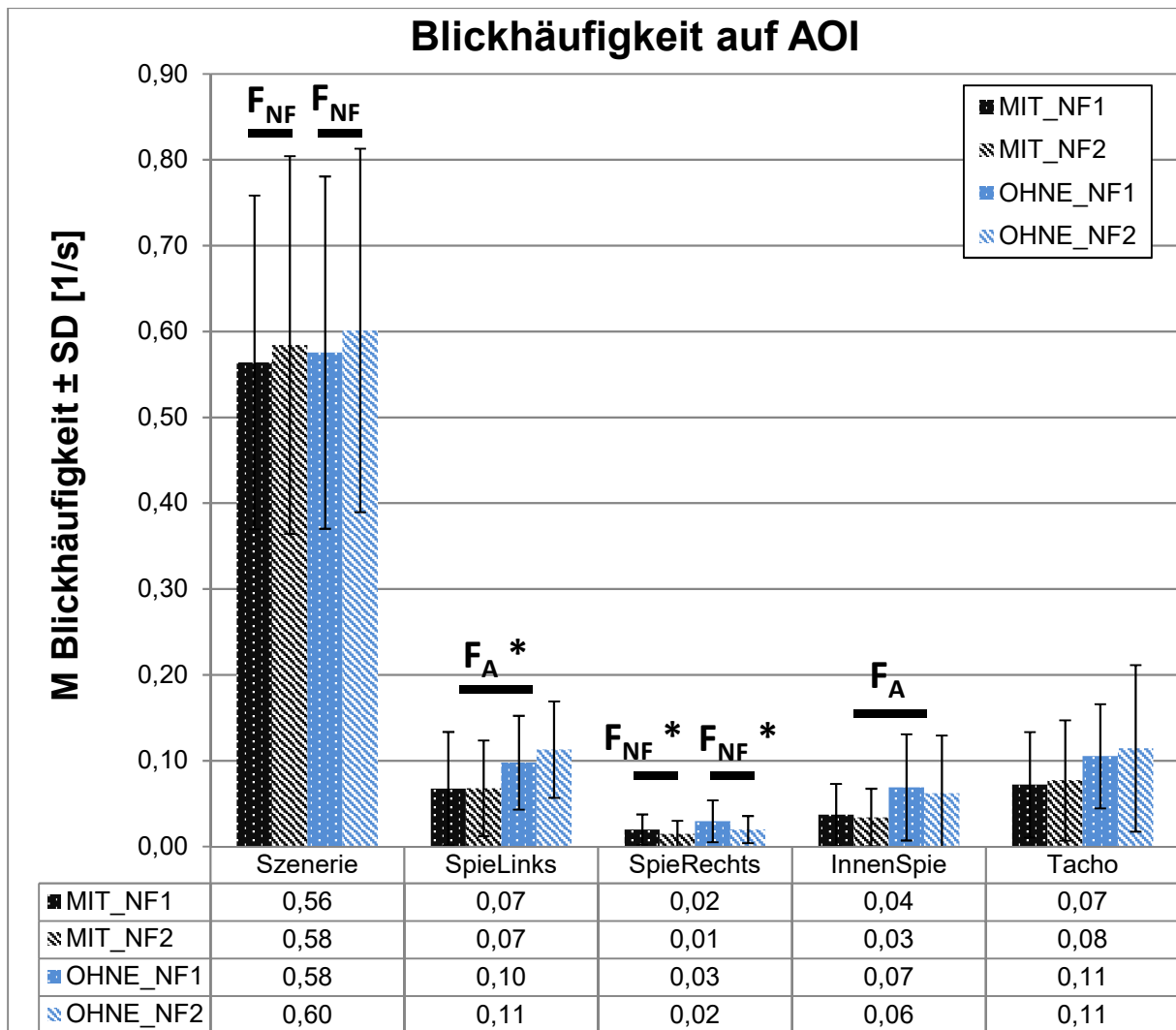


Abbildung 5-22: Blickhäufigkeit auf die unterschiedlichen AOIs für die Gruppen MIT\_kHUD (N=21) und OHNE\_kHUD (N=21) und die Messwiederholung NF1 und NF2. Die Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 5-10: Statistische Ergebnisse der Blickhäufigkeit für den Innersubjektfaktor Normalfahrt=NF, die Interaktion=A\*NF und den Zwischensubjektfaktor Anzeige=A.

Szenerie	SpielLinks
$F_{NF}(1,40)=3.136, p=.084, \eta^2=.073$	$F_{NF}(1,40)=1.906, p=.175, \eta^2=.045$
$F_{A*NF}(1,40)=.045, p=.833, \eta^2=.001$	$F_{A*NF}(1,40)=1.725, p=.197, \eta^2=.041$
$F_A(1,40)=.051, p=.822, \eta^2=.001$	$F_A(1,40)=4.868, p=.033, \eta^2=.108$
SpielRechts	InnenSpie
$F_{NF}(1,40)=7.117, p=.011, \eta^2=.151$	$F_{NF}(1,40)=1.563, p=.219, \eta^2=.038$
$F_{A*NF}(1,40)=.750, p=.392, \eta^2=.018$	$F_{A*NF}(1,40)=.250, p=.620, \eta^2=.006$
$F_A(1,40)=2.089, p=.156, \eta^2=.050$	$F_A(1,40)=3.727, p=.061, \eta^2=.085$
Tacho	
$F_{NF}(1,40)=1.042, p=.313, \eta^2=.025$	
$F_{A*NF}(1,40)=.084, p=.773, \eta^2=.002$	
$F_A(1,40)=2.654, p=.111, \eta^2=.062$	

- E: MIT\_kHUD wird seltener auf das AOI SpieLinks geblickt.
- E: MIT\_kHUD wird tendenziell seltener auf das AOI InnenSpie geblickt.
- E: Bei NF2 wird tendenziell häufiger auf das AOI Szenerie geblickt.
- E: Bei NF2 wird seltener auf das AOI SpieRechts geblickt.
- E: Das AOI Tacho zeigt keine Unterschiede in der Blickhäufigkeit.

#### **5.3.4.3 Mittlere Blickdauer bei Normalfahrt (NF)**

Abbildung 5-23 zeigt die mittlere Blickdauer auf die AOIs für die Zeitintervalle NF1 und NF2. In Tabelle 5-11 sind die statistischen Testergebnisse aufgeführt, die in Abbildung 5-23 grafisch übertragen wurden.

In keinem AOI ist ein Einfluss der Anzeige nachzuweisen. Die mittlere Blickdauer auf das AOI Szenerie zeigt wie die Blickhäufigkeit in Kapitel 5.3.4.2 eine große Standardabweichung, anders als bei der prozentualen Blickdauer. Damit kann bestätigt werden, dass die Fahrer unabhängig von den Versuchsbedingungen im Blickverhalten stark variieren. Es wird sowohl häufiger und kürzer als auch seltener und länger in die Szenerie geblickt. In der prozentualen Blickdauer ist das unterschiedliche Blickverhalten nicht mehr zu unterscheiden.

Die kürzere prozentuale Blickdauer im AOI SpieLinks der Gruppe MIT\_kHUD resultiert aus der signifikant niedrigeren Blickhäufigkeit. Die mittlere Blickdauer zeigt keine Unterschiede. Dasselbe trifft auf das AOI InnenSpie in der Tendenz zu.

Dass bei dem AOI SpieLinks in NF2 eine größere prozentuale Blickdauer vorliegt, ergibt sich weder aus der Blickhäufigkeit noch aus der mittleren Blickdauer eindeutig. Das AOI SpieRechts zeigte in NF2 eine signifikant niedrigere prozentuale Blickdauer. Das ergibt sich durch die signifikant niedrigere Blickhäufigkeit und eine tendenziell niedrigere mittlere Blickdauer.

Das AOI InnenSpie wird in NF2 tendenziell prozentual kürzer angeblickt, bedingt durch die signifikant niedrigere mittlere Blickdauer.

Das AOI Tacho bleibt in der mittleren Blickdauer in allen Versuchsbedingungen unbeeinflusst.

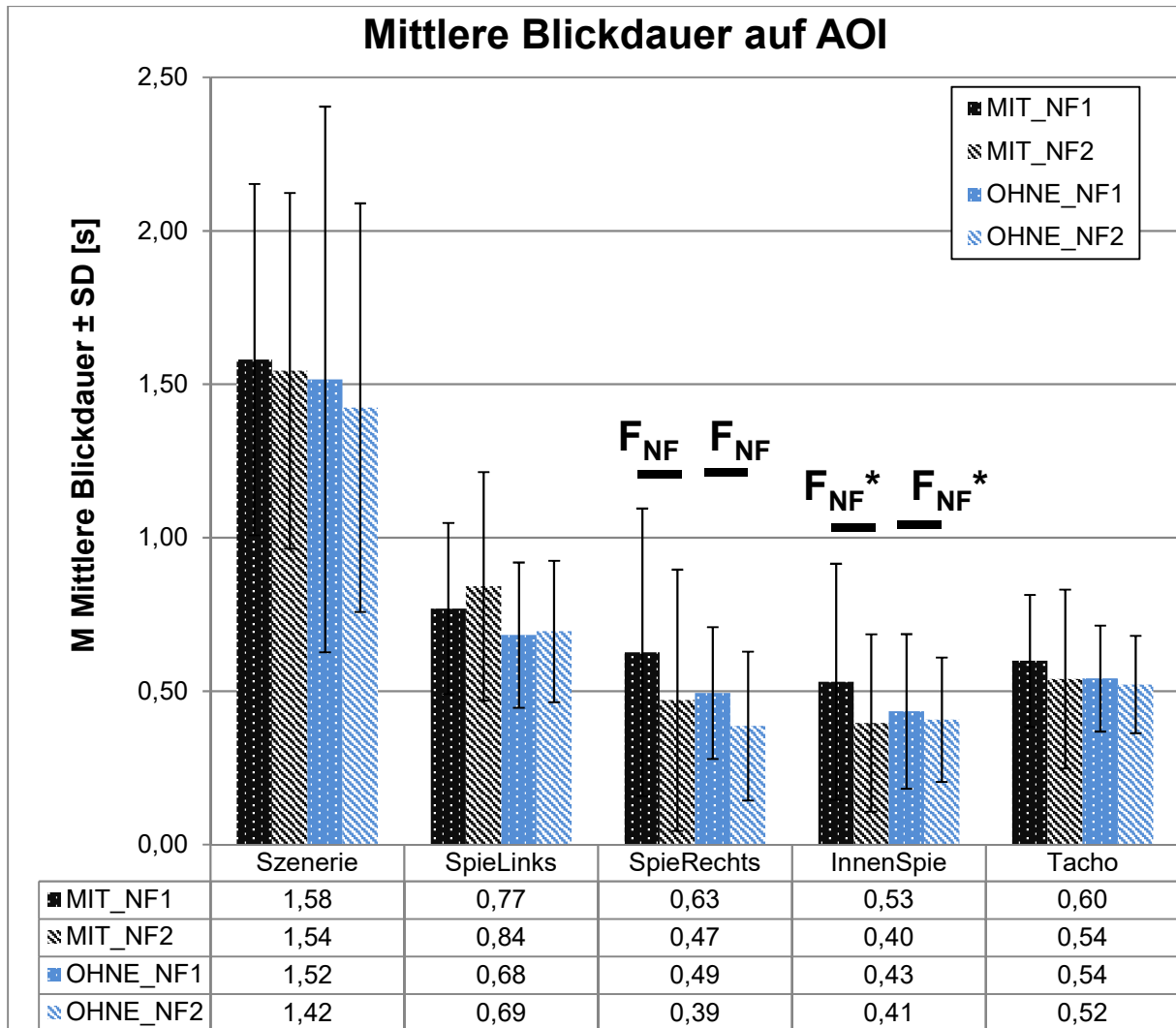


Abbildung 5-23: Mittlere Blickdauer auf die unterschiedlichen AOIs für die Gruppen MIT\_kHUD (N=21) und OHNE\_kHUD (N=21) und die Messwiederholung NF1 und NF2. Die Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 5-11: Statistische Ergebnisse der mittleren Blickdauer für den Innersubjektfaktor Normalfahrt=NF, die Interaktion=A\*NF und den Zwischensubjektfaktor Anzeige=A.

Szenerie	SpielLinks
$F_{NF}(1,40)=1.518, p=.225, \eta^2=.037$	$F_{NF}(1,40)=1.387, p=.246, \eta^2=.034$
$F_{A*NF}(1,40)=.289, p=.594, \eta^2=.007$	$F_{A*NF}(1,40)=.701, p=.407, \eta^2=.017$
$F_A(1,40)=.199, p=.658, \eta^2=.005$	$F_A(1,40)=2.115, p=.154, \eta^2=.050$
SpielRechts	InnenSpie
$F_{NF}(1,40)=3.779, p=.059, \eta^2=.086$	$F_{NF}(1,40)=4.785, p=.035, \eta^2=.107$
$F_{A*NF}(1,40)=.132, p=.718, \eta^2=.003$	$F_{A*NF}(1,40)=2.106, p=.155, \eta^2=.050$
$F_A(1,40)=1.580, p=.216, \eta^2=.038$	$F_A(1,40)=.277, p=.601, \eta^2=.007$
Tacho	
$F_{NF}(1,40)=.902, p=.348, \eta^2=.022$	
$F_{A*NF}(1,40)=.228, p=.636, \eta^2=.006$	
$F_A(1,40)=.526, p=.473, \eta^2=.013$	

- E: Das kHUD hat keinen Einfluss auf die mittlere Blickdauer in die AOIs.
- E: Das Blickverhalten beider Gruppen auf das AOI Szenerie variiert sehr stark zwischen kurzen häufigen und langen seltenen Blicken.
- E: Die kürzere prozentuale Blickdauer auf die AOIs SpieLinks und InnenSpie in der Gruppe MIT\_kHUD resultiert aus der niedrigeren Blickhäufigkeit.
- E: Bei NF2 wird signifikant prozentual kürzer in das AOI SpieLinks geblickt.
- E: Bei NF2 wird signifikant prozentual kürzer und signifikant seltener in das AOI SpieRechts geblickt.
- E: In NF2 ist die mittlere Blickdauer auf das AOI Innenspiegel signifikant kürzer.
- E: Das AOI Tacho ist unbeeinflusst.

#### **5.3.4.4 Maximale Blickdauer bei Normalfahrt (NF)**

Abbildung 5-24 zeigt die maximale Blickdauer auf die AOIs für die Zeitintervalle NF1 und NF2. In Tabelle 5-12 sind die statistischen Testergebnisse aufgeführt, die in Abbildung 5-24 grafisch übertragen wurden.

In keinem AOI ist ein Einfluss der Anzeige auf die maximale Blickdauer erkennbar. Obwohl die kontaktanaloge Anzeige die prozentuale Blickdauer auf die Szenerie erhöht, wird dies nicht durch extrem lange Blicke verursacht. Allerdings ist die Varianz in der Stichprobe sehr hoch. Hier zeigt sich wieder das unterschiedliche Blickverhalten der Fahrer. Sehr große Blickdauern auf das AOI Szenerie sind nicht zwingend als kritisch einzustufen. Die Varianzen der Spiegelblicke und im AOI Tacho sind als gering einzuschätzen und zeigen sehr schön ein einheitliches Blickverhalten, das als wenig gefährdend eingestuft werden kann. Information über den seitlichen und rückwärtigen Verkehr und aus dem Tacho werden zügig abgefragt.

Jedes AOI weist in NF2 eine signifikant geringere maximale Blickdauer auf als in NF1. Diese Veränderung kann auf das wiederholte Erleben der Fehlfunktion zurückgeführt werden. Die Fahrer sind sich bewusst, dass Fehlfunktionen auftreten können, und vermeiden extrem lange Blicke, indem sie die Information aus den unterschiedlichen AOIs zügig aufnehmen. Der Lerneffekt im Blickverhalten passt zum Vertrauensverlust in die Automation nach dem Erleben der ersten Fehlfunktion (siehe Kapitel 5.3.1.3).



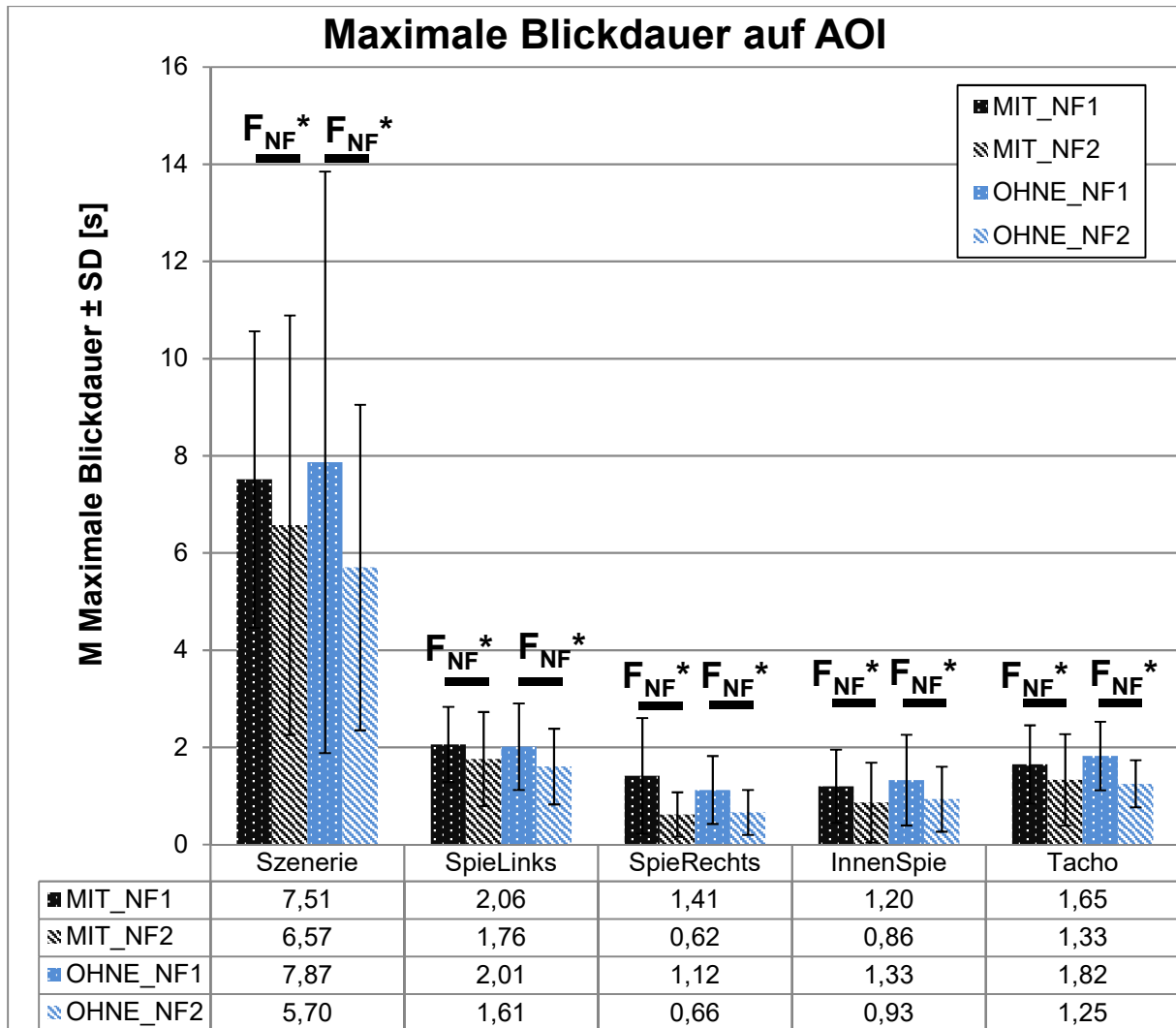


Abbildung 5-24: Maximale Blickdauer auf die unterschiedlichen AOIs für die Gruppen MIT\_kHUD (N=21) und OHNE\_kHUD (N=21) und die Messwiederholung NF1 und NF2. Die Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 5-12: Statistische Ergebnisse der maximalen Blickdauer für den Innersubjektfaktor Normalfahrt=NF, die Interaktion=A\*NF und den Zwischensubjektfaktor Anzeige=A.

Szenerie	SpielLinks
$F_{NF}(1,40)=7.937, p=.007, \eta^2=.166$	$F_{NF}(1,40)=8.054, p=.007, \eta^2=.168$
$F_{A*NF}(1,40)=1.234, p=.273, \eta^2=.030$	$F_{A*NF}(1,40)=.190, p=.665, \eta^2=.005$
$F_A(1,40)=.045, p=.833, \eta^2=.001$	$F_A(1,40)=.191, p=.664, \eta^2=.005$
SpielRechts	InnenSpie
$F_{NF}(1,40)=17.122, p=.000, \eta^2=.300$	$F_{NF}(1,40)=17.831, p=.000, \eta^2=.308$
$F_{A*NF}(1,40)=1.200, p=.280, \eta^2=.029$	$F_{A*NF}(1,40)=.109, p=.743, \eta^2=.003$
$F_A(1,40)=.467, p=.498, \eta^2=.012$	$F_A(1,40)=.183, p=.671, \eta^2=.005$
Tacho	
$F_{NF}(1,40)=21.505, p=.000, \eta^2=.350$	
$F_{A*NF}(1,40)=1.763, p=.192, \eta^2=.042$	
$F_A(1,40)=.047, p=.830, \eta^2=.001$	

- E: Die Anzeige hat in keinem AOI einen Einfluss auf die maximale Blickdauer.
- E: Die maximale Blickdauer kann für beide Gruppen als unkritisch eingestuft werden.
- E: In NF2 ist die maximale Blickdauer auf alle AOIs signifikant kürzer als in NF1.
- E: Durch die erlebte Fehlfunktion und dem daraus entstehenden Verlust an Automationsvertrauen werden die maximalen Blickzuwendungen in beiden Gruppen kürzer.

#### **5.3.4.5 Horizontales Blickverhalten bei Normalfahrt (NF)**

Damböck (2013) stellte bei Fahrten ohne Nebenaufgabe fest, dass die Fahrer im teilautomatisierten Modus mit und ohne Hände am Lenkrad einen größeren horizontalen Blickwinkel hatten als in der manuellen Bedingung. Er führt einen größeren Blickwinkel auf eine niedrigere Beanspruchung des Fahrers zurück. Dabei beruft er sich auf eine Literaturstudie von Drummond (1989) und auf Mayhew & Simpson (1996), die bei erfahrenen Fahrern einen größeren horizontalen Blickwinkel feststellten als bei Fahranfängern, die nach Gregersen (1994) besonders im ersten Jahr nach Erhalt der Fahrerlaubnisprüfung überfordert sind.

Abbildung 5-25 zeigt das horizontale Blickverhalten für die Zeitintervalle NF1 und NF2. In Tabelle 5-13 sind die statistischen Testergebnisse aufgeführt, die in Abbildung 5-25 grafisch übertragen wurden.

Der Innersubjektfaktor NF hat durch das Erleben der Fehlfunktion keine Auswirkung auf das Scanningverhalten der Fahrer. MIT\_kHUD ist der horizontale Blickwinkel im Mittel um  $12^{\circ}$ – $16^{\circ}$  signifikant kleiner als OHNE\_kHUD. Die Fahrer MIT\_kHUD fokussieren stärker den zentralen Bereich mit der kontaktanalogen Anzeige. Die Fahrer OHNE\_kHUD beziehen ihre Information aus einem größeren horizontalen Blickwinkel. Es kann nicht belegt werden, ob die periphere Information für die Fahraufgabe relevante Inhalte lieferte und deswegen als besseres Blickverhalten interpretiert werden kann. Eventuell resultiert der größere horizontale Blickwinkel aus den häufigeren Spiegelblicken (siehe Kapitel 5.3.4.2).

Zur Einschätzung der Daten werden Vergleichswerte herangezogen. Crundall & Underwood (1998) ermittelten auf einem „dual carriageway“ – vergleichbar mit einer Autobahn – für Fahranfänger (M  $45.9^{\circ}$ , SD  $24.2^{\circ}$ ) und für erfahrene Fahrer (M  $82.4^{\circ}$ , SD  $49.2^{\circ}$ ) den mittleren horizontalen Blickwinkel mit Standardabweichung. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass sowohl die Gruppe OHNE\_kHUD als auch die

Gruppe MIT\_kHUD hinsichtlich des horizontalen Blickverhaltens zu den erfahrenen Fahrern gezählt werden kann (siehe Kapitel 5.1.3).

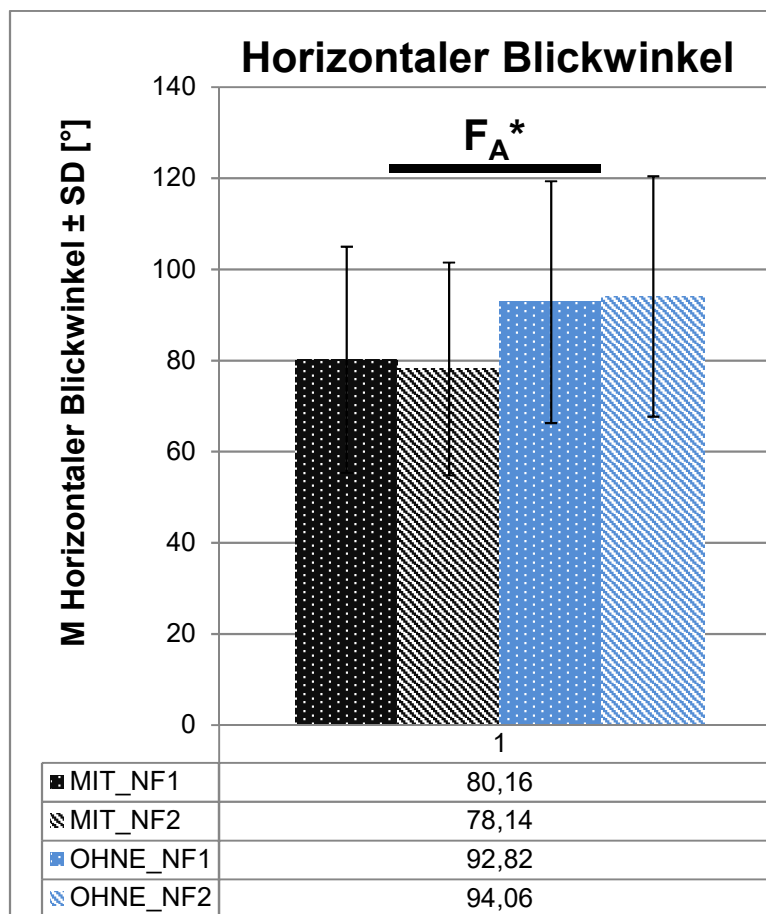


Abbildung 5-25: Horizontaler Blickwinkel mit Standardabweichung für die Gruppen MIT\_kHUD (N=21) und OHNE\_kHUD (N=21) und die Messwiederholung NF1 und NF2. Die Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 5-13: Statistische Ergebnisse des horizontalen Blickverhaltens für den Innersubjektfaktor Normalfahrt=NF, die Interaktion=A\*NF und den Zwischensubjektfaktor Anzeige=A.

Horizontales Blickverhalten
$F_{NF}(1,40)=.079, p=.780, \eta^2=.002$
$F_{A*NF}(1,40)=.608, p=.440, \eta^2=.015$
$F_A(1,40)=4.073, p=.050, \eta^2=.095$

Unterschiede im horizontalen Blickverhalten geben Aufschluss über die Beanspruchung der Fahrer. Fokussiertes Blickverhalten mit einem kleinen horizontalen Blickwinkel weist auf eine hohe Beanspruchung hin. Der NASA-TLX als Maß für die Beanspruchung zeigte keinen Unterschied zwischen den Gruppen (siehe Kapitel 5.3.1.1). Der Einfluss des Zwischensubjektfaktors Anzeige kann damit

eindeutig dem kHUD zugeschrieben werden. Der Zusammenhang zwischen Beanspruchung und horizontalem Blickverhalten ist für Versuche zu kontaktanalogen Anzeigen entkoppelt.

- E: Der Innersubjektfaktor durch wiederholtes Erleben der Fehlfunktion hat keinen Einfluss auf das horizontale Blickverhalten.
- E: MIT\_kHUD ist der horizontale Blickwinkel signifikant kleiner als OHNE\_kHUD.
- E: Beide Gruppen sind mit ihrem Blickverhalten als erfahrene Fahrer einzustufen, die keinen Unterschied in der Beanspruchung aufweisen.
- M: Die Blickhäufigkeit auf die Spiegel beeinflusst wahrscheinlich das horizontale Blickverhalten.
- M: Für Studien mit Anzeigen im zentralen Sehbereich ist der Zusammenhang von Beanspruchung und horizontalem Blickverhalten nicht mehr gegeben.

#### 5.3.4.6 Zusammenfassung Blickkenngößen bei Normalfahrt (NF)

MIT\_kHUD wird im Schnitt 6–7 % länger auf das AOI **Szenerie** geblickt. Da die Szenerie und die kontaktanaloge Anzeige im selben AOI liegen, ist fraglich, ob tatsächlich das kHUD angeblickt wird. Die fokussierende Wirkung des kHUD ist bereits in Kapitel 5.3.3.3 belegt worden. Blickhäufigkeit und mittlere Blickdauer sind unbeeinflusst. Das Blickverhalten beider Gruppen auf das AOI Szenerie variiert sehr stark zwischen kurzen häufigen und langen seltenen Blicken.

- E: MIT\_kHUD wird prozentual länger auf das AOI Szenerie geblickt. Das kHUD hat eine fokussierende Wirkung.

MIT\_kHUD wird 1.5–3.5 % kürzer in das AOI **SpieLinks** geblickt; dies liegt in der geringeren Blickhäufigkeit begründet. Da diese Veränderung keine Auswirkung auf die Absicherung der Fahrstreifenwechsel während der Fehlfunktion hatte (siehe Kapitel 5.3.2.2), kann sie als unbedenklich eingestuft werden. In der Tendenz ist die Veränderung im AOI **InnenSpie** identisch.

- E: MIT\_kHUD wird seltener auf das AOI SpieLinks und tendenziell seltener auf das AOI InnenSpie geblickt.

Die mittlere Blickdauer bleibt unbeeinflusst von der Art der Anzeige. Die Fahrer verändern die Zeit der Informationsaufnahme aus den jeweiligen AOIs nicht aufgrund der Art der Anzeige. Das AOI **Tacho** bleibt über alle Kenngößen hinweg von der Art

der Anzeige unbeeinflusst. Die Fahrer zeigen ein homogenes Blickverhalten. Information aus dem Tacho wird regelmäßig und zügig abgefragt.

→ E: Das AOI Tacho wird in keiner Kenngröße durch die Art der Anzeige beeinflusst.

→ E: Der Tacho ist ein wichtiger Informationsgeber während der Normalfahrt.

Das Erleben einer Fehlfunktion verändert das Blickverhalten dahingehend, dass in NF2 prozentual länger auf das AOI SpieLinks und kürzer auf das AOI SpieRechts, bedingt durch eine geringere Blickhäufigkeit, geblickt wird. Die mittlere Blickdauer auf das AOI InnenSpie verkürzt sich. Nach der ersten Fehlfunktion finden teilweise signifikante Verschiebungen im Blickverhalten statt: Wichtigere AOIs werden stärker beachtet, unwichtige AOIs weniger. Der Tacho ist von dem Optimierungsverhalten nicht betroffen.

→ E: Von NF1 zu NF2 findet eine Blickoptimierung auf die Rückspiegel statt. Es wird stärker zwischen wichtiger und unwichtiger Information unterschieden.

Den deutlichsten Einfluss eines Lerneffekts zeigt die Kenngröße der maximalen Blickdauer. In allen AOIs ist bei NF2 die maximale Blickdauer signifikant niedriger. In allen AOIs außer dem AOI Szenerie ist die Standardabweichung sehr gering und zeigt das einheitliche Blickverhalten auf die rückwärtige Szenerie und den Tacho. Durch die Fehlfunktion haben die Fahrer die besonders langen Blickzuwendungen verkürzt, da das Vertrauen in die Automation gesunken ist. Die Art der Anzeige hat keinen Einfluss auf die maximale Blickdauer.

→ E: In allen AOIs ist bei NF2 die maximale Blickdauer signifikant niedriger.

→ M: Die maximale Blickdauer und das Automationsvertrauen scheinen stark zusammenzuhängen.

MIT\_kHUD ist der horizontale Blickwinkel signifikant kleiner. Das resultiert nicht aus einer größeren Beanspruchung, sondern wahrscheinlich durch Spiegel- und Schulterblicke. Bezogen auf Kilometerleistung und Führerscheinbesitz spiegeln die Blickwinkel das fahrerfahrene Probandenkollektiv wider.

→ E: MIT\_kHUD ist der horizontale Blickwinkel signifikant kleiner als OHNE\_kHUD.

→ M: Für Studien mit Anzeigen im zentralen Sehbereich ist der Zusammenhang von Beanspruchung und horizontalem Blickverhalten nicht mehr gegeben.

## 5.4 Hypothesenübersicht

Keine der subjektiven abhängigen Variablen zeigt einen Einfluss der Art der Anzeige (Tabelle 5-14). Dennoch sollten sie weiterhin zur Bewertung einer kontaktanalogen Anzeige erhoben werden. Durch die Erhebung der Beanspruchung und des horizontalen Blickwinkels konnte gezeigt werden, dass beide Größen bei Anzeige Konzepten im zentralen Sichtbereich entkoppelt sind. Die Verkürzung der maximalen Blickdauer spiegelte sich deutlich im Automationsvertrauen wider. Das Kritikalitätsempfinden der Probanden diente zur Qualitätskontrolle der Szenariogestaltung.

Die Übernahmekenngrößen zeigen keinen Einfluss der Anzeige auf das erstmalige oder wiederholte Erleben einer Fehlfunktion bei der Manöverdurchführung. Es können weder positive noch negative Effekte auf die Handlungszeiten oder die Handlungsqualität festgestellt werden. Für ein besseres Verständnis des Übernahmeprozesses ist der TTCmin-Zeitpunkt der TTCmin vorzuziehen, da sich die Aussagen der beiden Variablen entsprechen.

Im Blickverhalten sind sowohl im Zeitintervall der Fehlfunktion als auch im Normalbetrieb stimmige Einflüsse der Art der Anzeige in einzelnen AOs nachzuweisen: Die kontaktanaloge Anzeige zieht Aufmerksamkeit auf sich, die aus unwichtigen Bereichen der Szenerie und zum Teil aus den Rückspiegeln abgezogen wird. Die Veränderungen im Blickverhalten sind als geringfügig einzustufen, die keinen negativen Einfluss auf das Absicherungsverhalten, die maximale Blickabwendung von der Fahraufgabe oder die Qualität der Manöverdurchführung haben. Das Kombiinstrument wird in kritischen Situationen nahezu gar nicht beachtet. In unkritischen Situationen ist es unabhängig von der kontaktanalogen Anzeige ein wichtiger Informationsgeber für die Fahrer.

Tabelle 5-14: Hypothesen der Versuchsreihe „Fehlfunktion“ nach Kapiteln strukturiert. Ein Haken zeigt die angenommenen Hypothesen, ein Kreuz die verworfenen Hypothesen.

Subjektive Daten bei Fehlfunktion (FF) – Kapitel 5.3.1		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Beanspruchung nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Beanspruchung.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Automationsvertrauen nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Automationsvertrauen.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Kritikalitätsempfinden nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Kritikalitätsempfinden.	✗
Übernahmekenngrößen bei Fehlfunktion (FF) – Kapitel 5.3.2		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Häufigkeit der Kollisionen nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Häufigkeit der Kollisionen.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Absicherungsverhalten nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Absicherungsverhalten.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Übernahmezeit nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Übernahmezeit.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die TTCmin nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die TTCmin.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst den Zeitpunkt der TTCmin nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst den Zeitpunkt der TTCmin.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Verzögerung longitudinal nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Verzögerung longitudinal.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Beschleunigung lateral nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Beschleunigung lateral.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale resultierende Beschleunigung nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale resultierende Beschleunigung.	✗
Blickkenngrößen bei Fehlfunktion (FF) – Kapitel 5.3.3		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Verweildauer auf die AOIs nicht.	✗
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Verweildauer auf die AOIs.	✓
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs nicht.	✗
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs.	✓
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Verweildauer auf die AOIs nicht.	✗
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Verweildauer auf die AOIs.	✓
Blickkenngrößen bei Normalfahrt (NF) – Kapitel 5.3.4		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Blickdauer auf die AOIs nicht.	✗
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Blickdauer auf die AOIs.	✓
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs nicht.	✗
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs.	✓
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Blickdauer auf die AOIs nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Blickdauer auf die AOIs.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Blickdauer auf die AOIs nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Blickdauer auf die AOIs.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst den horizontalen Blickwinkel auf die AOIs nicht.	✗
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst den horizontalen Blickwinkel auf die AOIs.	✓

Die Schwierigkeit in diesem Versuchsaufbau lag in der Manöverwahl. Die Situation der Fehlfunktion konnte durch ein einfaches Bremsmanöver ohne erzwungenen Fahrstreifenwechsel gelöst werden. Dadurch wird die Aussagekraft einiger Variablen bei den Übernahmekenngrößen und besonders bei den Blickkenngrößen eingeschränkt. Für die Analyse von Handlungs- und Blickverlauf eines Übernahmeprozesses liefern Fahrstreifenwechsel einen größeren Beitrag, da die Fahrer mehr Aktionen durchführen müssen als bei einem Bremsmanöver. Dennoch sollten auch Bremsmanöver durch eine aussagekräftige Bewertungsmethodik abgesichert werden.

## **6 Simulatorstudie hochautomatisiert - Systemgrenze**

Diese Studie soll aufzeigen, ob kontaktanalog eingespielte Navigationshinweise an einer kontrollierten Systemgrenze das Übernahmeverhalten des Fahrers eines automatisierten Fahrzeugs beeinflussen. In der Baselinefahrt ohne kontaktanaloge Navigationshinweise mussten die Fahrer Richtungsschilder in der Szenerie ablesen. Die schlagwortartige Einordnung der Studie in den Grundlagenteil (Kapitel 2) lautet:

- System Kategorie A.
- Hochautomatisiert (Level 3).
- Navigationsebene.
- Übernahmeverhalten entspricht mindestens regelbasiertem Verhalten.

Die Daten dieses Versuchs wurden im Rahmen einer Diplomarbeit im Dezember 2012 von Johannes Dosch und mir erhoben. Die generierten Daten wurden für diese Arbeit neu ausgewertet und können deshalb von Dosch (2013) abweichen.

### **6.1 Methodik**

#### **6.1.1 Versuchsaufbau**

##### **6.1.1.1 Automationsumfang**

In Längsrichtung hatte die Automation die Funktionalität eines ACC-Systems. Es wurde entweder eine fest voreingestellte Zeitlücke von 1.5 Sekunden auf ein vorausfahrendes Fahrzeug eingeregelt oder die Geschwindigkeit durch eine Verkehrszeichenerkennung an die aktuelle Höchstgeschwindigkeit angepasst. Das Fahrzeug beschleunigte ab dem Verkehrszeichen und verzögerte 100 Meter vor dem Verkehrszeichen selbstständig, um auf der Höhe des Verkehrszeichens die



vorgeschriebene Geschwindigkeit zu haben. In Querrichtung wurde das Fahrzeug mit einem LKAS (Lane Keeping Assistant System) im Fahrstreifen gehalten. Die Position des Fahrzeugs im Fahrstreifen wurde dem Fahrer über ein aktives Lenkrad rückgemeldet. Hierbei wurde ein Lenkmoment auf das Lenkrad aufgeschaltet. Selbstständige Fahrstreifenwechsel durch die Automation waren nicht möglich, sondern mussten vom Fahrer selbst durchgeführt und abgesichert werden. Der Automationsumfang wurde bewusst ohne automatisierten Fahrstreifenwechsel gewählt, um eine Fahrerhandlung in der Übernahmesituation messen zu können. Die Automation wurde über den Check-Button am Lenkstockhebel des Blinkers aktiviert und deaktiviert. Eine Deaktivierung erfolgte über das Betätigen der Bremse und Überdrücken des Lenkmoments am Lenkrad. Das Lenkmoment war im Fahrstreifen mittenzentriert und der Momentenverlauf durch einen zum Fahrstreifenrand V-förmig ansteigenden Momentenbetrag charakterisiert.

#### **6.1.1.2 Anzeigekonzept im kHUD und Kombiinstrument**

Die Anzeigesymbole sind einfarbig gehalten. Auf eine Farbcodierung wurde verzichtet, weil die Position und die Form der Anzeigeelemente ausreichend Information über den Automationszustand transportieren. Als Farbe wurde ein leuchtendes Gelb gewählt, um bei jeder Hintergrundfarbe einen größtmöglichen Kontrast zu erzielen. Der Entwurf und eine detaillierte Prüfung dieses Anzeigekonzeptes auf ergonomische Anforderungen fand im Vorfeld statt (Weißgerber, 2011).

Das Anzeigekonzept wurde nicht über einen zusätzlichen Projektor realisiert, sondern direkt in die Simulationsumgebung implementiert. Dadurch waren die Anzeigesymbole gut manipulierbar und einfach an die Strecke anzupassen.

Das Anzeigekonzept in Abbildung 6-1 setzt sich aus drei Anzeigesymbolen zusammen, die den Systemzustand während der Fahrt bei aktivierter Automation visualisieren. Ein gelber quadratischer Rahmen (C) markiert das erkannte Verkehrsschild. Eine nach oben offene eckige Klammer (A) markiert das im erkannten Fahrstreifen vorausfahrende Fahrzeug. Eine Trajektorie (B) aus aneinandergereihten schmalen Pfeilen zeigt mittenzentriert den erkannten Fahrstreifen an. Ursprünglich bestand die Trajektorie aus einer gestrichelten Linie. Auf Anregung von Professor Winner (Winner, 2012) wurden daraus Pfeile gemacht, damit die Formcodierung von Fahrstreifenmarkierung und Trajektorie nicht zu Verwechslungen führt und auch für Baustellensituationen geeignet ist.

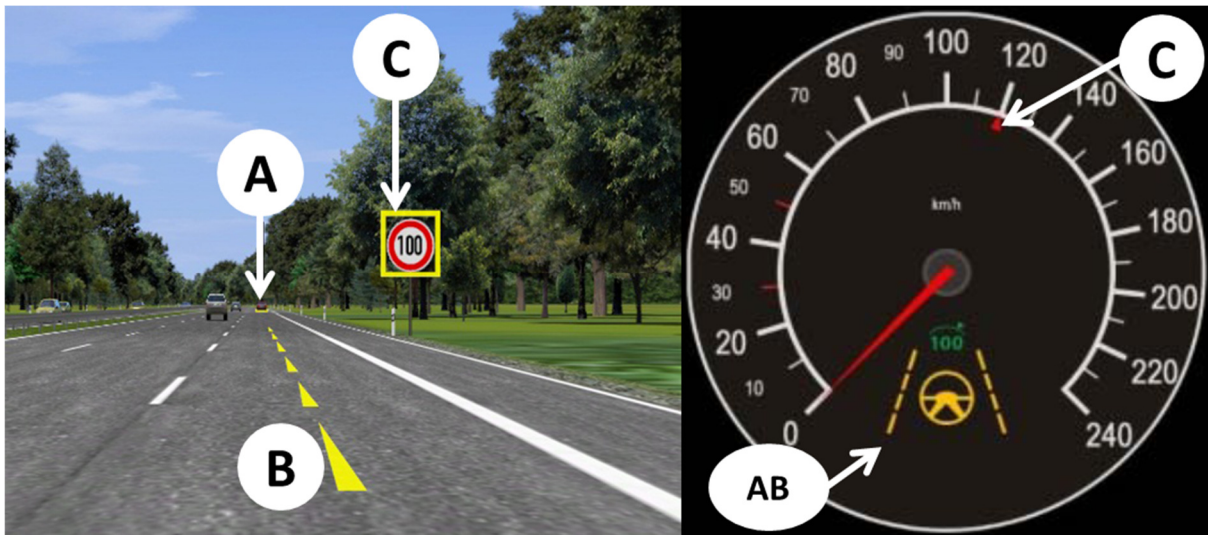


Abbildung 6-1: LINKS – Anzeigesymbole A) Klammer, B) Trajektorie und C) Rahmen im kHUD; RECHTS – Anzeigesymbole AB) Automation aktiviert und C) Pfeil im Kombiinstrument.

Im Kombiinstrument wurde dem Fahrer dauerhaft die Geschwindigkeit angezeigt, auf die durch die Verkehrsschilderkennung geregelt wurde. In Abbildung 6-1 zeigt ein kleines rotes Dreieck (C) die eingeregelt Richtgeschwindigkeit von 120 km/h an. Im unteren Bereich des Tachokranzes befindet sich ein Lenkradsymbol mit Fahrstreifenmarkierungen (AB). Leuchtet es gelb, ist die Automation aktiv. Ein graues Symbol bedeutet, dass die Automation aus ist. Die bis hier vorgestellten Anzeigenelemente sind für diese Studie nicht untersuchungsrelevant. Sie sind der Vollständigkeit halber hier trotzdem aufgeführt.

Die Auswirkung einzelner Anzeigesymbole wurde bereits bei der Fehlererkennung der Verkehrszeichenerkennung (Weißgerber et al., 2012b), der Falscherkennung von Baustellenmarkierungen (Weißgerber et al., 2012a) und bei der Falscherkennung von Fahrbahnmarkierungen (Damböck et al., 2012b) ermittelt.

Für diese Studie zu Systemgrenzen beim hochautomatisierten Fahren wurden zwei zusätzliche Anzeigen für die Übernahme-situation implementiert. Die Anzeigeelemente Wechselpfeil (D) und Systemgrenze-Balken (E) sind in Abbildung 6-2 zu sehen. Sie wurden eingeblendet, sobald die Automation eine Übernahmeaufforderung an den Fahrer ausgegeben hatte.

Der Systemgrenze-Balken zeigte dem Fahrer den geografischen Punkt in der Szenerie an, ab dem er die Fahraufgabe wieder vollständig selbst ausführen musste. Der Balken wurde durch ein quer im Fahrstreifen liegendes transparentes Rechteck mit einer Höhe

von 0.3 Metern visualisiert, damit er zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung vom Fahrer erkennbar war.

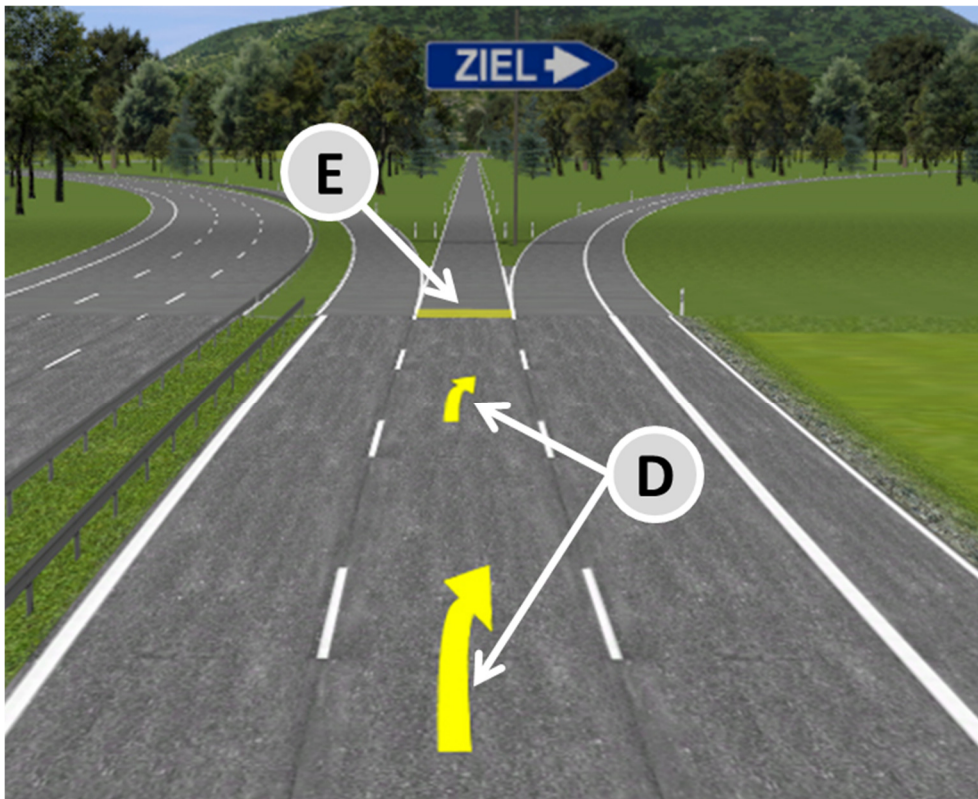


Abbildung 6-2: Anzeigesymbole D) Wechselfeile und E) Systemgrenze-Balken im kHUD.

Als Wechselfeile wurde der internationale Richtungspfeil für „Spurwechsel an endenden Fahrstreifen“ (Bundesministerium für Verkehr, 1993) verwendet. Der Richtungspfeil ist perspektivisch verzerrt, damit er auch aus großer Entfernung gut ablesbar ist. Es sind mehrere Pfeile im Sekundenabstand bezogen auf die Geschwindigkeit von 100 km/h nacheinander angeordnet. Der Fahrer bekommt durch die Wechselfeile eine Handlungsempfehlung auf der Navigationsebene, während der Systemgrenze-Balken eine Restriktion anzeigt.

### 6.1.1.3 Versuchsstrecke

Die folgende Streckenbeschreibung orientiert sich an dem Begriffsverständnis von Geyer et al. (2014). Die Versuchsstrecke wurde bereits für die Ermittlung von Übernahmezeiten bei hochautomatisierten Fahrten verwendet (Damböck, Farid, Tönert & Bengler, 2012a). Für diesen Versuch wurden nur Übernahmesituationen auf Navigations- und Führungsebene und die Zeitbudgets von 4 und 6 Sekunden

übernommen. Durch eine randomisierte Anordnung der sechs Übernahmesituationen wurden vier unterschiedliche Streckenvarianten erzeugt, die in permutierter Reihenfolge auf die Probanden verteilt wurden. Hierdurch sollten Lerneffekte ausgeglichen werden. Die Streckenvarianten hatten alle eine Gesamtlänge von ungefähr 45 Kilometer. Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h entspricht das einer durchschnittlichen Fahrzeit von ungefähr 30 Minuten. Die Szenerie war eine Autobahn mit drei Fahrstreifen in jede Richtung.

Es gibt sechs verschiedene Szenen, in denen eine Übernahme stattfindet (siehe Tabelle 6-1). Sie bestehen aus zwei unterschiedlichen Szenerien. In der Szenerie Autobahnkreuz (AK) teilt sich die Fahrbahn in drei unterschiedliche Richtungen auf (siehe Abbildung 6-2). Hier muss der Fahrer auf Navigationsebene handeln. In der Szenerie Fahrbahnverengung (FV) reduziert sich die Anzahl der Fahrstreifen auf zwei. Der Fahrer handelt hier auf der Führungsebene. Die dynamischen Elemente in der jeweiligen Szene stellt der umgebende Verkehr dar. Durch ihn ergibt sich die Ausprägung, dass der Zielfahrstreifen entweder besetzt oder frei ist. Die besetzten Fahrstreifen wurden eingebaut, um die Fahrer daran zu erinnern, dass Absicherungsblicke nötig sind. Das Zeitbudget variierte zwischen 4 und 6 Sekunden.

*Tabelle 6-1: Übersicht der Ausprägungen der Übernahmesituationen.*

Szenenbezeichnung	Szenerie	Zielfahrstreifen	Vorwarnzeit
AK rechts frei 4 s	Autobahnkreuz	rechts-frei	4 Sekunden
AK links frei 6 s	Autobahnkreuz	links-frei	6 Sekunden
AK links besetzt 6 s	Autobahnkreuz	links-besetzt	6 Sekunden
FV links frei 4 s	Fahrbahnverengung	links-frei	4 Sekunden
FV links frei 6 s	Fahrbahnverengung	links-frei	6 Sekunden
FV links besetzt 6 s	Fahrbahnverengung	links-besetzt	6 Sekunden

Für die Ergebnisdarstellung wurden nur die Daten der Szenen „AK links frei 6 s“ (Kurzbezeichnung Links6s) und „AK rechts frei 4 s“ (Kurzbezeichnung Rechts4s) ausgewertet, die im Folgenden näher beschrieben werden.

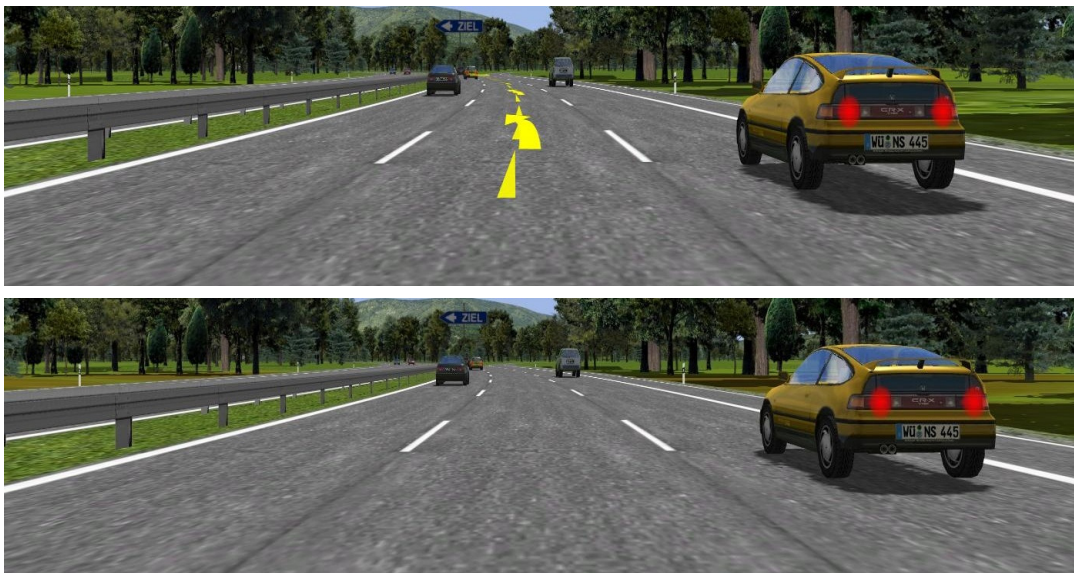
#### **6.1.1.4 Szenariobeschreibung Systemgrenze (SG)**

In der Szenerie Autobahnkreuz (Abbildung 6-2 in Kapitel 6.1.1.2) teilt sich die dreistreifige Autobahn in Einzelfahrstreifen auf. Das Ego-Fahrzeug fährt immer auf dem mittleren Fahrstreifen in die Szene ein. Ein blaues Pfeilschild „Ausfahrt von der

Autobahn“ (Zeichen 333 des amtlichen Verkehrszeichenkataloges) bildet die grafische Vorlage für die Richtungsanweisung des Fahrers. Die übliche Beschriftung „Ausfahrt“ wurde durch den Schriftzug „ZIEL“ und einen weißen Pfeil ersetzt. Das Schild ist auf der Höhe der Fahrbahnteilung positioniert und vom Fahrer zum Zeitpunkt der Übernahme sehr gut sichtbar. Durch die Formcodierung des Schildes als Pfeil und den weißen Pfeil auf dem Schild ist es nicht nötig, das Wort Ziel explizit zu lesen. Da nur eine Richtungsangabe auf dem Schild ist, handelt es sich um keine Leseaufgabe, sondern eine leichte Suchaufgabe, bei der die Phase der Informationsaufnahme (siehe Kapitel 2.3) als kurz einzuschätzen ist. Dieses Szenario entspricht einer Navigationsaufgabe (siehe Kapitel 2.2).

#### **6.1.1.4.1 Szene „AK links frei 6 s“ (Links6s)**

Abbildung 6-3 zeigt die Frontsicht des Fahrers zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung MIT\_kHUD oben und OHNE\_kHUD unten. Bei einer Vorwarnzeit von 6 Sekunden (168 Meter) wurden dem Fahrer in der Bedingung MIT\_kHUD fünf Wechselfeile mit jeweils 1 Sekunde (28 Meter) Abstand angezeigt. Gleichzeitig ist noch die Trajektorie zu sehen, die erst durch die Deaktivierung der Automation ausgeblendet wurde. Der Zielfahstreifen war frei.



*Abbildung 6-3: Szene Autobahnkreuz „Links6s“ zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung MIT\_kHUD (oben) und OHNE\_kHUD (unten).*

#### 6.1.1.4.2 Szene „AK rechts frei 4 s“ (Rechts4s)

Abbildung 6-4 zeigt die Frontsicht des Fahrers zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung MIT\_kHUD oben und OHNE\_kHUD unten. Bei einer Vorwarnzeit von 4 Sekunden (112 Meter) wurden dem Fahrer in der Bedingung MIT\_kHUD drei Wechselfeile mit jeweils 1 Sekunde (28 Meter) Abstand angezeigt. Gleichzeitig ist noch die Trajektorie zu sehen, die erst durch die Deaktivierung der Automation ausgeblendet wurde. Der Zielfahrstreifen war frei.

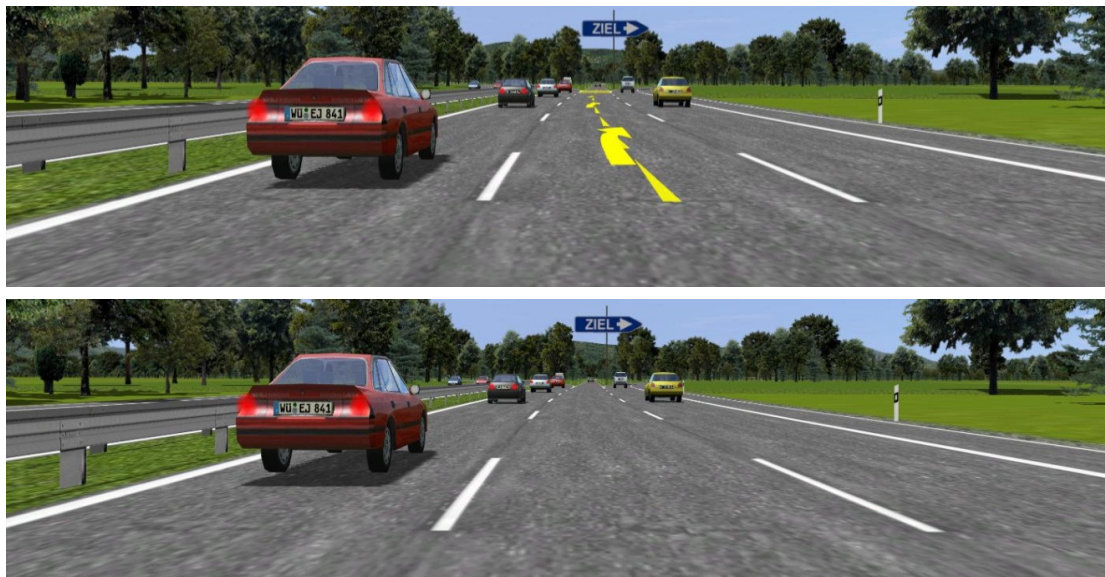


Abbildung 6-4: Szene Autobahnkreuz „Rechts4s“ zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung MIT\_kHUD (oben) und OHNE\_kHUD (unten).

#### 6.1.1.5 Nebenaufgabe

Während einer hochautomatisierten Fahrt ist dem Fahrer per Definition erlaubt, eine fahrfremde Tätigkeit auszuführen, bis er vom System zur Übernahme aufgefordert wird. Dafür wurde eine zweidimensionale Trackingaufgabe zur Bearbeitung während der Fahrt verwendet (siehe Abbildung 6-5). Laptop und Joystick zur Bearbeitung der Nebenaufgabe wurden auf dem Beifahrersitz aufgebaut. Der Fahrer musste den Oberkörper und den Kopf leicht zum Bildschirm drehen. Die Nebenaufgabe wurde über ein dauerhaftes Drücken des Triggers am Joystick aktiviert und war somit jederzeit unterbrechbar. Die Aufgabe bestand darin, einer Zielscheibe mit einem Fadenkreuz zu folgen. Alle drei Sekunden wurde die Position des Fadenkreuzes auf der Zielscheibe ermittelt und entsprechend Punkte vergeben, die in die Probandenvergütung eingerechnet wurden. Damit war gewährleistet, dass die Fahrer eine ausreichende

Motivation hatten, die Nebenaufgabe zu bearbeiten. Diese Nebenaufgabe wurde bereits in anderen Versuchen erfolgreich eingesetzt (Damböck et al., 2012a).



Abbildung 6-5: LINKS – Aufbau von Laptop und Joystick auf dem Beifahrersitz im Fahrzeug; RECHTS – Screenshot der Trackingaufgabe (Damböck et al., 2012a)

Die Probanden wurden instruiert, die Nebenaufgabe dauerhaft zu bearbeiten und nur bei einer Übernahmeaufforderung die Nebenaufgabe zu unterbrechen. Die rechte Hand war am Joystick und die linke Hand sollte auf den Oberschenkel gelegt werden. Damit waren die Probanden haptisch und visuell komplett entkoppelt und hatten kein Bewusstsein über Szenerie und umgebenden Verkehr in der Übernahmesituation. Die Daten der Nebenaufgabenbearbeitung wurden nicht ausgewertet.

#### 6.1.1.6 Probandeninstruktionen

Den Probanden wurden über den Automatisierungsgrad „hochautomatisiert“ bzw. „Level 3 – Limited Self-Driving Automation“ aufgeklärt, der einerseits die Möglichkeit eröffnet, während der Fahrt eine fahrfremde Tätigkeit auszuführen, aber andererseits bei einer Übernahmeaufforderung zur umgehenden Übernahme der Fahraufgabe verpflichtet. Der durchzuführende Fahrstreifenwechsel sollte ausreichend abgesichert werden. Die Probanden sollten nicht bremsen, sondern das Manöver zügig absolvieren. Wenn ein Fahrstreifenwechsel wegen einer drohenden Kollision zu riskant war, konnte er unterlassen werden. Oberstes Ziel in der Manöverausführung war das Vermeiden von Kollisionen.

#### 6.1.2 Versuchsdesign

Es wurde eine verbundene Stichprobe gewählt. Jeder Proband absolvierte je eine Fahrt MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD. Die Reihenfolge wurde permutiert. Innerhalb

jeder Versuchsfahrt wurden sechs Übernahmesituationen in randomisierter Reihenfolge durchfahren, von denen zwei Übernahmesituationen in den folgenden Ergebnissen ausgewertet werden. Die Übernahmesituationen unterscheiden sich in der Richtung des Fahrstreifenwechsels nach links bzw. rechts und dem Zeitbudget von 6 bzw. 4 Sekunden. Lerneffekte wurden gezielt ausgeschlossen. Die Probanden hatten durch insgesamt zwölf Übernahmesituationen ausreichend Übung.

### **6.1.3 Probandenkollektiv**

Die Teilnehmer der Probandengruppe (N=24) waren zwischen 19 und 73 Jahre alt (M=32.4 Jahre, SD=15.4 Jahre); es handelte sich um 6 Frauen und 18 Männer. Der Führerscheinbesitz wurde mit M=12.7 Jahre (SD=13.2 Jahre) angegeben, bei einer jährlichen Kilometerleistung von M=10729 km/a (SD=5733 km/a).

Im Vergleich zum Probandenkollektiv aus der oben aufgeführten Simulatorstudie (siehe Kapitel 5.1.3) ist diese Gruppe deutlich jünger, bei einer größeren Altersspanne. Das zeigt sich auch durch den kürzeren Führerscheinbesitz.

Alle Probanden haben einen Sehtest vor der Versuchsfahrt absolviert und bestanden. Ein Proband hatte eine Rot-Grün-Farbfehlsichtigkeit. Da alle Anzeigesymbole im kHUD und im Kombiinstrument gelb dargestellt und nicht farbcodiert waren, hatte das keine Auswirkung auf den Versuch. Alle Probanden haben in einer Einführungsfahrt Automation, Übernahmesituationen und Anzeige-konzept ausführlich kennenlernen können.

## **6.2 Hypothesen**

In Tabelle 6-2 sind die statistisch nachprüfbareren Hypothesen für jede abhängige Variable formuliert. Ihre Gliederung entspricht dem Aufbau der Arbeit. Bei den Blickdaten ist aus Platzgründen keine Unterteilung in die einzelnen AOs vorgenommen worden.

Die übergeordnete Fragestellung möchte klären, auf welche abhängigen Variablen das kHUD einen Einfluss hat und wie zukünftig ein kHUD bewertet werden kann. Daher wird eine Vielzahl von Variablen abgefragt, die thematisch zusammengefasst werden. Die subjektiven Daten dienen der Ergänzung der objektiven Daten, die sich aus Übernahmekenngrößen und Blickkenngrößen zusammensetzen. Die Übernahmekenngrößen vereinen Variablen, die bisher zur Beschreibung von Übernahmeprozessen des automatisierten Fahrens genutzt wurden. Hier stellt sich die



Frage, ob diese Größen auch zur Bewertung einer kontaktanalogen Anzeige geeignet sind. Die Blickkenngrößen sollen die Frage beantworten, ob das kHUD sicherheitskritische Veränderungen im Blickverhalten bewirkt.

*Tabelle 6-2: Hypothesen der Versuchsreihe „Systemgrenze“ nach Kapiteln strukturiert.*

<b>Subjektive Daten bei Systemgrenze (SG) – Kapitel 6.3.1</b>		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Beanspruchung nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Beanspruchung.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Automationsvertrauen nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Automationsvertrauen.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Kritikalitätsempfinden nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Kritikalitätsempfinden.	
<b>Übernahmekenngrößen bei Systemgrenze (SG) – Kapitel 6.3.2</b>		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Häufigkeit der bewältigten Situationen nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Häufigkeit der bewältigten Situationen.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Absicherungsverhalten nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Absicherungsverhalten.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Übernahmezeit nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Übernahmezeit.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die TTCmin nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die TTCmin.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst den Zeitpunkt der TTCmin nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst den Zeitpunkt der TTCmin.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Beschleunigung lateral nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Beschleunigung lateral.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale resultierende Beschleunigung nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale resultierende Beschleunigung.	
<b>Blickkenngrößen bei Systemgrenze (SG) – Kapitel 6.3.3</b>		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Verweildauer auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Verweildauer auf die AOIs.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die absolute Verweildauer auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die absolute Verweildauer auf die AOIs.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs.	
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Verweildauer auf die AOIs nicht.	
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Verweildauer auf die AOIs.	

### 6.3 Ergebnisse

Das Ergebniskapitel ist in drei Unterkapitel mit einer jeweils abschließenden Zusammenfassung untergliedert. In Kapitel 6.3.1 werden die subjektiven Befragungsergebnisse der Probanden dargestellt. Kapitel 6.3.2 behandelt anhand von

Übernahmekenngrößen das Übernahmeverhalten und die Übernahmequalität. Kapitel 6.3.3 befasst sich mit den Blickkenngrößen während der Übernahmesituation.

Die Daten dieses Versuchs werden nicht inferenzstatistisch analysiert, da in der verbundenen Stichprobe fehlende Datenpunkte die Stichprobengröße stark reduzieren würden. Deswegen werden die Daten deskriptiv ausgewertet. In Kapitel 6.4 werden in der Hypothesenübersicht die Hypothesen angenommen oder abgelehnt. Das geschieht aber ohne statistische Absicherung.

Jede Kenngröße endet mit einer stichpunktartigen Auflistung der Erkenntnisse. Dabei wird zwischen → E: Ergebnisse aus Versuchsdaten, → M: Methodischer Handlungsbedarf und → F: Forschungsbedarf und Fragestellungen unterschieden.

### **6.3.1 Subjektive Daten bei Systemgrenze (SG)**

#### **6.3.1.1 Beanspruchung (NASA-TLX)**

Nach den Versuchsfahrten MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD wurde die Beanspruchung jeweils für die gesamte Fahrzeit über den ungewichteten NASA-TLX abgefragt (Hart & Staveland, 1988). Es besteht kein Unterschied in der Beanspruchung zwischen den Gruppen MIT\_kHUD (M=42.9, SD=14.1) und OHNE\_kHUD (M=42.5, SD=15.5). Die geringen Varianzen weisen auf aussagekräftige Mittelwerte hin.

→ E: Die Art der Anzeige hat keinen Einfluss auf die Beanspruchung während der gesamten Fahrt.

#### **6.3.1.2 Bewertung kHUD**

Nach beiden Versuchsfahrten durften die Probanden vier Aussagen (A1–A4) zur kontaktanalogen Anzeige bewerten. Den Aussagen konnte mit einer siebenstufigen Likert-Skala voll zugestimmt (1) oder gar nicht zugestimmt (7) werden.

**Aussage 1: Die kontaktanalogue Anzeige hat mich nicht abgelenkt.**

Mit M=2.2 und SD=1.9 wurde die kontaktanalogue Anzeige als wenig ablenkend von den Probanden empfunden.

**Aussage 2: Die Anzeigesymbole in der Übernahmesituation haben mir geholfen zu verstehen, was ich machen soll.**

Mit M=3.0 und SD=2.0 liegt die Bewertung der kontaktanalogen Anzeige bezüglich des Systemverständnisses noch im positiven Bereich. Die positive Wirkung der Handlungsempfehlung durch die Wechselfeile fällt insgesamt verhalten aus.

**Aussage 3: Die Anzeigesymbole in der Übernahmesituation haben mir geholfen, schnell zu verstehen, was ich machen soll.**

Mit  $M=2.6$  und  $SD=1.9$  liegt auch die Bewertung der Schnelligkeit zur Erlangung des Systemverständnisses im positiven Bereich. Negative Bewertungen werden mit dem Argument, zu viel Information aufnehmen zu müssen, begründet.

**Aussage 4: Ich finde die Wechselfeile / die Anzeige der Systemgrenze wichtiger.**

19 Probanden entschieden sich für die Wechselfeile und 5 Probanden bevorzugten die Anzeige der Systemgrenze als wichtigeres Anzeigeelement. Sehr wahrscheinlich werden die Wechselfeile bevorzugt, weil sie durch ihre Handlungsempfehlung dem Fahrer einen möglichen Lösungsweg anzeigen, wohingegen der Systemgrenze-Balken den Lösungsraum einschränkt.

- E: Das kHUD ist wenig ablenkend.
- E: Das kHUD hilft beschränkt für die Handlungsableitung des Fahrers.
- E: Das kHUD beschleunigt die Informationsaufnahme im Übernahmeprozess positiv.
- E: Die überwiegende Mehrheit der Probanden bevorzugte die Wechselfeile als Handlungsempfehlung gegenüber dem Systemgrenze-Balken.

### **6.3.1.3 Automationsvertrauen**

Nach jeder der beiden Versuchsfahrten wurde das Automationsvertrauen der Probanden abgefragt. Die Versuchsfahrten MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD waren permutiert, um Lerneffekte zu vermeiden. Zwischen der Fahrt MIT\_kHUD ( $M=5.5$ ,  $SD=1.6$ ) und der Fahrt OHNE\_kHUD ( $M=5.1$ ,  $SD=1.8$ ) ist kein Unterschied im Automationsvertrauen zu erkennen. Das kHUD hat in diesem Versuch keinen Einfluss auf das Automationsvertrauen. Beide Mittelwerte bewegen sich im positiven Bereich. Die Automation funktionierte fehlerfrei.

- E: Bei einer fehlerfreien Automation hat das kHUD bei kontrollierten Systemgrenzen keinen Einfluss auf das Automationsvertrauen.

### **6.3.1.4 Wahrgenommene Kritikalität**

Nach jeder Übernahmesituation sollten die Probanden einschätzen, wie kritisch die eben erlebte Situation war. Die Probanden wurden vor Versuchsbeginn auf die Befragung vorbereitet und die Skala wurde erläutert.

Abbildung 6-6 zeigt die wahrgenommene Kritikalität in den Übernahmesituationen Links6s und Rechts4s für die Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD. In den Übernahmesituationen Links6s liegt die Kritikalität bei MIT\_kHUD (M=6.0, SD=3.6) und OHNE\_kHUD (M=7.5, SD=4.2) bei ähnlichen Werten. Ebenso in der Übernahme Rechts4s für MIT\_kHUD (M=11.8, SD=4.8) und OHNE\_kHUD (M=11.5, SD=6.1). Es kann ein Einfluss des Zeitbudgets und kein Einfluss der Anzeige vermutet werden.

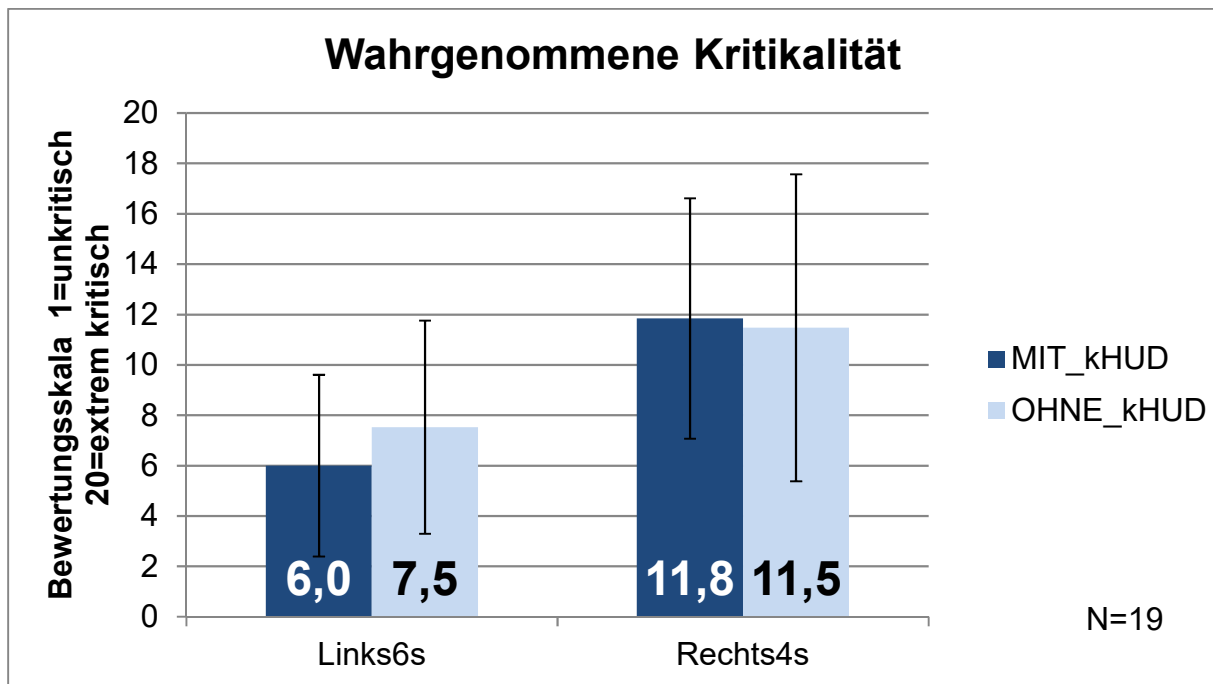


Abbildung 6-6: Subjektive Einschätzung der Kritikalität von 1=unkritisch bis 20=extrem kritisch für den Faktor Anzeige  $F_A$  (MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD) und den Faktor Zeitbudget  $F_{ZB}$  (6 und 4 Sekunden).

- E: Die Anzeige hat keinen Einfluss auf die Einschätzung der Kritikalität an kontrollierten Systemgrenzen.
- E: Ein geringeres Zeitbudget erhöht das subjektive Empfinden der Kritikalität in Übernahmesituationen.

### 6.3.1.5 Zusammenfassung der subjektiven Daten

Das kHUD hat keinen Einfluss auf die Beanspruchung, das Automationsvertrauen und das Kritikalitätsempfinden der Fahrer. Die subjektiven Bewertungen des kHUD fallen befriedigend aus. Sie bleiben aber hinter den Bewertungen aus Kapitel 5.3.1.2 zurück. Sehr wahrscheinlich fehlte in dieser Befragung ein Ankerpunkt für die Einschätzung des kHUD. Im vorausgehenden Versuch war das Kombiinstrument der Ankerpunkt.

### **6.3.2 Übernahmekenngrößen bei Systemgrenze (SG)**

#### **6.3.2.1 Häufigkeit der erfolgreichen Übernahmen**

Abbildung 6-7 zeigt die Häufigkeit der erfolgreich bewältigten Situationen für die Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD und die Übernahmesituationen Links6s und Rechts4s. Situationen wurden als geschafft bewertet, wenn sich das Fahrzeug beim Passieren der Systemgrenze vollständig im richtigen Fahrstreifen befand. Als nicht geschafft wurden Situationen bewertet, in denen der Fahrer entweder geradeaus weitergefahren war oder das Fahrzeug zum Zeitpunkt der Systemgrenze noch nicht vollständig in den Zielfahrstreifen gewechselt hatte. Das späteste Ende eines Fahrstreifenwechsels lag bei 73 cm nach der Systemgrenze und wurde von einem Probanden OHNE\_kHUD bei einem Zeitbudget von 4 Sekunden (Rechts4s) verursacht. Es wurde weder eine Kollision noch ein Abkommen von der Fahrbahn verursacht, weil in diesem Streckenstück noch eine geschlossene Asphaltdecke war, auf der sich die Fahrstreifenmarkierung teilte.

Ein McNemar-Test mit der Edwards-Korrektur von 1.0 zeigt bei beiden Gruppen mit  $p_{MIT}=.021$  und  $p_{OHNE}=.006$  einen signifikanten Unterschied in der erfolgreichen Bewältigung der Situationen bezogen auf die beiden Zeitbudgets von 6 bzw. 4 Sekunden. Eine Verkürzung des Zeitbudgets von 6 auf 4 Sekunden hat zur Folge, dass die Anzahl der erfolgreichen Übernahmesituationen um ungefähr 30–40 % sinkt. Die Art der Anzeige zeigt bei einem Zeitbudget von 6 Sekunden mit  $p_A=.219$  und bei einem Zeitbudget von 4 Sekunden mit  $p_A=.146$  keinen Einfluss.

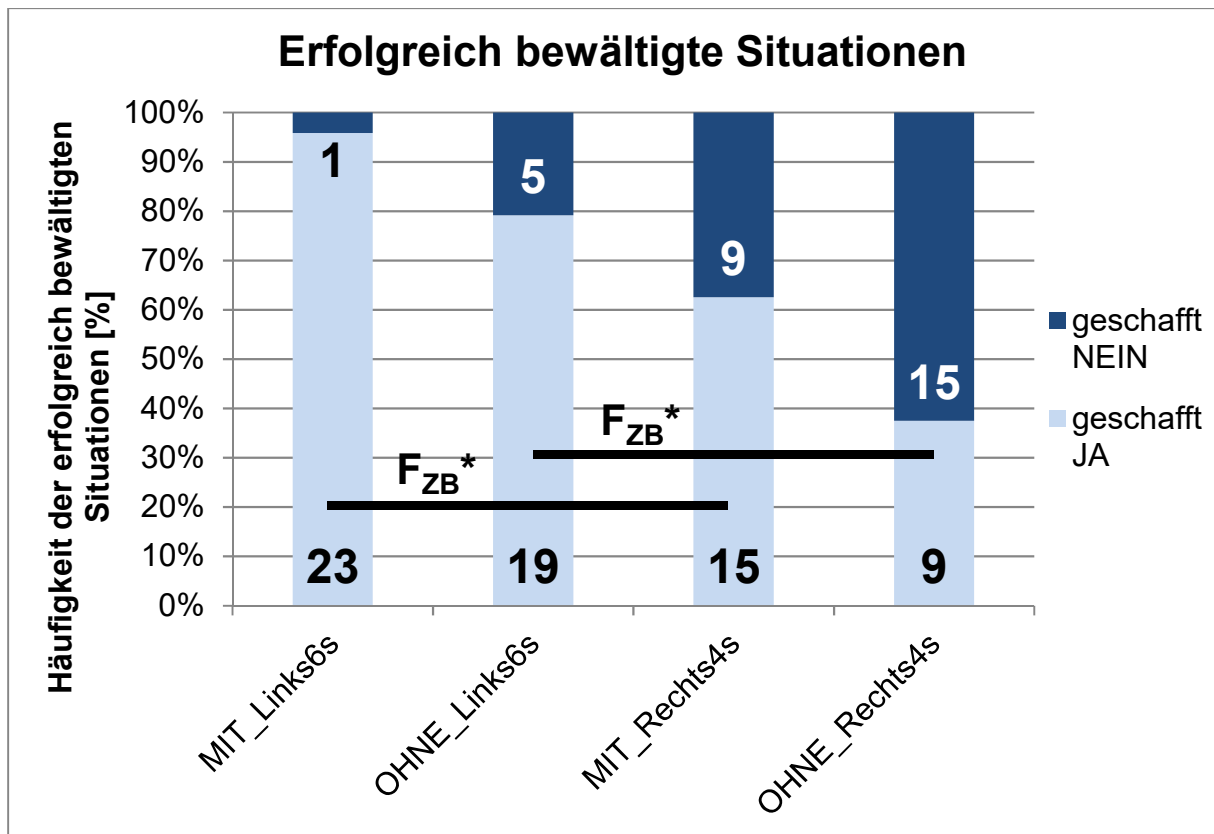


Abbildung 6-7: Häufigkeit der erfolgreich bewältigten Übernahme-situationen für die Bedingung MIT\_kHUD (N=24) und OHNE\_kHUD (N=24) und die Übernahme-situationen Links6s und Rechts4s.

- ➔ E: Die Anzeige hat bei beiden Zeitbudgets keinen Einfluss auf die Anzahl der erfolgreich bewältigten Situationen.
- ➔ E: Durch eine Verkürzung des Zeitbudgets von 6 auf 4 Sekunden sinkt die Anzahl der erfolgreich bewältigten Situationen signifikant.

### 6.3.2.2 Fahrstreifenwechsel und Absicherung

Tabelle 6-3 zeigt die Anzahl der Fahrstreifenwechsel (FSW) für alle Versuchsbedingungen. Die Anzahl der Spiegel- und Schulterblicke und der Betätigungen des Blinkers zeigen das Absicherungsverhalten während der FSW. Die Anzahl der FSW darf nicht gleichgesetzt werden mit der Anzahl der erfolgreichen Übernahmen (siehe Kapitel 6.3.2.1). Eine erfolgreiche Übernahme war definiert als vor der Systemgrenze abgeschlossener FSW. Bei der Anzahl der FSW in Tabelle 6-3 zählen auch nicht rechtzeitig abgeschlossene FSW mit, da hier keine Kollision verursacht wurde, sondern lediglich die Fahrstreifenmarkierung überfahren wurde. Nur Probanden, die geradeaus weiterfahren, ohne einen FSW zu machen, wurden nicht

berücksichtigt, da in diesem Fall keine Absicherung nötig war. Allerdings gab es auch Probanden, die, ohne den Fahrstreifen zu wechseln, Absicherungsblicke durchführten.

*Tabelle 6-3: Anzahl der Fahrstreifenwechsel (FSW), Spiegelblicke, Schulterblicke und Blinken für die Versuchsbedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD in den Szenarien Links6s und Rechts4s. In der oberen Tabellenhälfte sind Absolutwerte aufgeführt. In der unteren Tabellenhälfte sind Prozentwerte aufgeführt, wobei sich Spiegel, Schulter und Blinken auf die Anzahl der FSW beziehen.*

Anzahl [-]	FSW	Spiegel	Schulter	Blinken
MIT_Links6s	23	21	8	23
OHNE_Links6s	22	18	6	22
MIT_Rechts4s	19	10	4	18
OHNE_Rechts4s	15	10	0	14
Prozent [%]	FSW	Spiegel	Schulter	Blinken
MIT_Links6s	96%	91%	35%	100%
OHNE_Links6s	92%	82%	27%	100%
MIT_Rechts4s	79%	53%	21%	95%
OHNE_Rechts4s	63%	67%	0%	93%

Im Folgenden wird der McNemar-Test mit der Edwards-Korrektur von 1.0 verwendet, um Unterschiede in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für die Szenarios Links6s und Rechts4s zu ermitteln. Die Anzahl der FSW ( $p_{\text{Links6s}}=1.000$ ,  $p_{\text{Rechts4s}}=.547$ ), der Spiegelblicke ( $p_{\text{Links6s}}=.480$ ,  $p_{\text{Rechts4s}}=.480$ ), der Schulterblicke ( $p_{\text{Links6s}}=.683$ ,  $p_{\text{Rechts4s}}=.134$ ) und der Blinkerbetätigungen ( $p_{\text{Links6s}}=\text{keine Teststatistik möglich}$ ,  $p_{\text{Rechts4s}}=1.000$ ) wird nicht durch die Art der Anzeige beeinflusst.

Die Probanden hatten die Anweisung, nicht zu bremsen, sondern nur zu lenken. Wenn der FSW für sie zu kritisch oder in der vorgegebenen Zeit nicht durchzuführen war, sollte geradeaus weitergefahren werden (siehe Kapitel 6.1.1.6). Im Szenario Links6s haben über 90 % der Probanden einen FSW durchgeführt. Der FSW wurde in 80–90 % der Fälle durch einen Spiegelblick abgesichert. Das kHUD hat weder einen positiven noch negativen Einfluss auf die Absicherungsblicke im Außenspiegel. Nur etwa ein Drittel der Übernahmesituationen wurde durch einen Schulterblick abgesichert, unabhängig von der Art der Anzeige. Der Blinker wurde bei beiden Bedingungen zu 100 % gesetzt.

Im Szenario Rechts4s bewegt sich für beide Bedingungen die Anzahl der FSW zwischen 60 % und 80 %. Die FSW werden zu 50–70 % mit Spiegelblicken abgesichert. MIT\_kHUD wird in ca. 20 % der FSW ein Schulterblick und OHNE\_kHUD kein Schulterblick gemacht. Es ist möglich, dass durch die Positionierung der

Nebenaufgabe auf dem Beifahrersitz die Fahrer den toten Winkel im peripheren Sehbereich hatten und ein expliziter Schulterblick nicht nötig war. Die Rate der Blinkerbetätigungen lag bei 93–95 %.

- E: Die Art der Anzeige hat keinen Einfluss auf das Absicherungsverhalten bei einem Fahrstreifenwechsel.
- E: Bei kürzerem Zeitbudget wird der Fahrstreifenwechsel schlechter abgesichert.
- E: Maximal ein Drittel der Fahrstreifenwechsel wird mit Schulterblicken abgesichert.
- M: Die Positionierung der Nebenaufgabe sollte möglichst realitätsnah umgesetzt werden.

### **6.3.2.3 Übernahmezeit**

Die Übernahmezeit wurde von der Übernahmeaufforderung bis zum ersten Eingriff durch den Fahrer gemessen. Der erste Eingriff fand überwiegend durch Überdrücken des Lenkradmoments statt. Es wurden die Messwerte aller Probanden verwertet, die eingriffen. Dazu gehören auch Probanden, die den Fahrstreifenwechsel erst nach der Systemgrenze abgeschlossen haben, und Probanden, die eingriffen, ohne einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen.

Abbildung 6-8 zeigt die Übernahmezeit im Szenario Links6s mit 6 Sekunden Zeitbudget für die Bedingung MIT\_kHUD (M=3437 ms, SD=778 ms) und OHNE\_kHUD (M=3904 ms, SD=847 ms) und im Szenario Rechts4s mit 4 Sekunden Zeitbudget für MIT\_kHUD (M=2596 ms, SD=623 ms) und OHNE\_kHUD (M=2579 ms, SD=574 ms).

Im Szenario Links6s mit einem Zeitbudget von 6 Sekunden zeigt sich, dass in der Bedingung MIT\_kHUD ca. 460 ms früher übernommen wird als OHNE\_kHUD. Im Szenario Rechts4s hingegen sind die Übernahmezeiten nahezu identisch. Die Übernahmezeiten in dieser Studie sind größer als diejenigen der Literaturangaben (Kapitel 3.2) mit Zeitbudgets von 7 bzw. 5 Sekunden. Der Unterschied könnte darin begründet sein, dass kein Kollisionsobjekt im Fahrstreifen die Dringlichkeit erhöhte. Der Fahrstreifenwechsel war auf Navigationsebene induziert und nicht auf der dringlicheren Führungsebene.



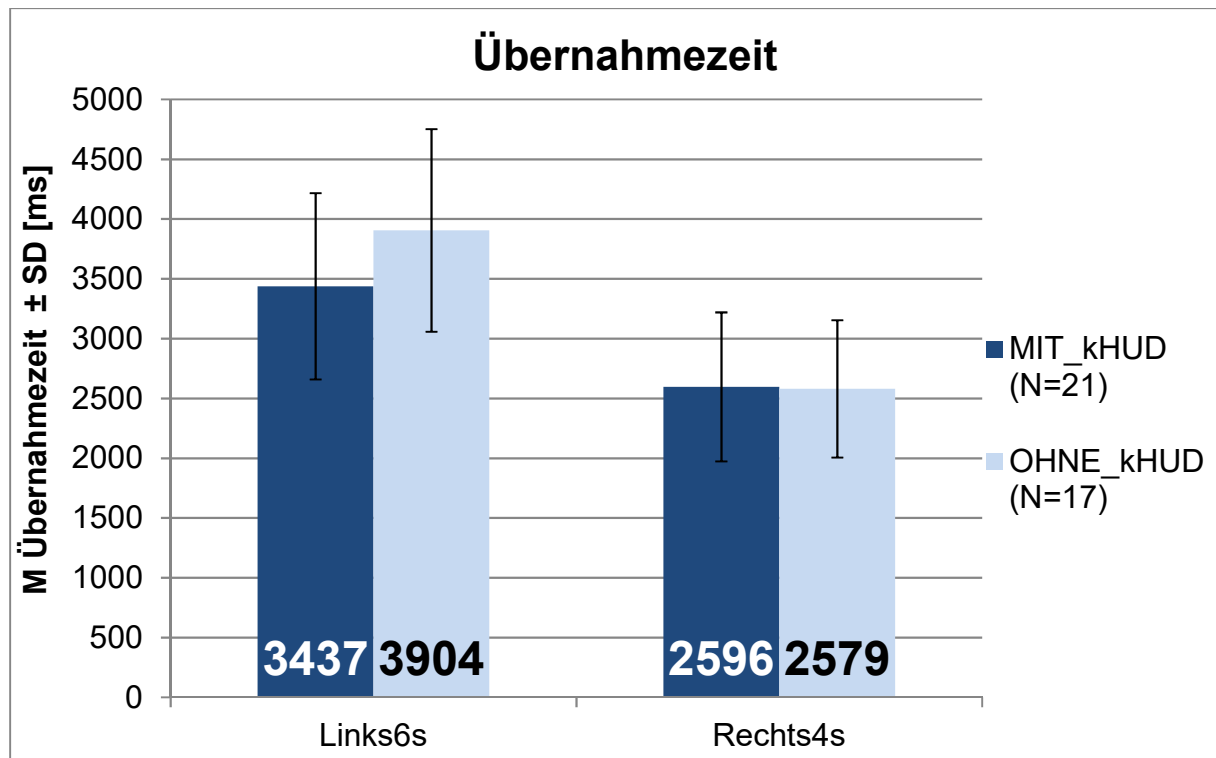


Abbildung 6-8: Mittlere Übernahmezeit mit Standardabweichung ab der Übernahmeaufforderung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für die beiden Szenarien Links6s (Zeitbudget = 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget = 4 Sekunden).

- ➔ E: Bei einem Zeitbudget von 6 Sekunden wird MIT\_kHUD früher übernommen.
- ➔ E: Bei einem Zeitbudget von 4 Sekunden hat die Art der Anzeige keinen Einfluss auf die Übernahmezeit.

#### 6.3.2.4 TTCmin

In der Berechnung der TTCmin sind die Messwerte aller durchgeführten FSW inklusive der zu spät abgeschlossenen FSW enthalten, da ein potenzielles Kollisionsrisiko mit der Straßeninfrastruktur oder Fahrzeugen bestand. Die TTCmin wurde auf die Systemgrenze bezogen. Nicht abgeschlossene FSW wurden mit einer TTCmin=0 ms angesetzt.

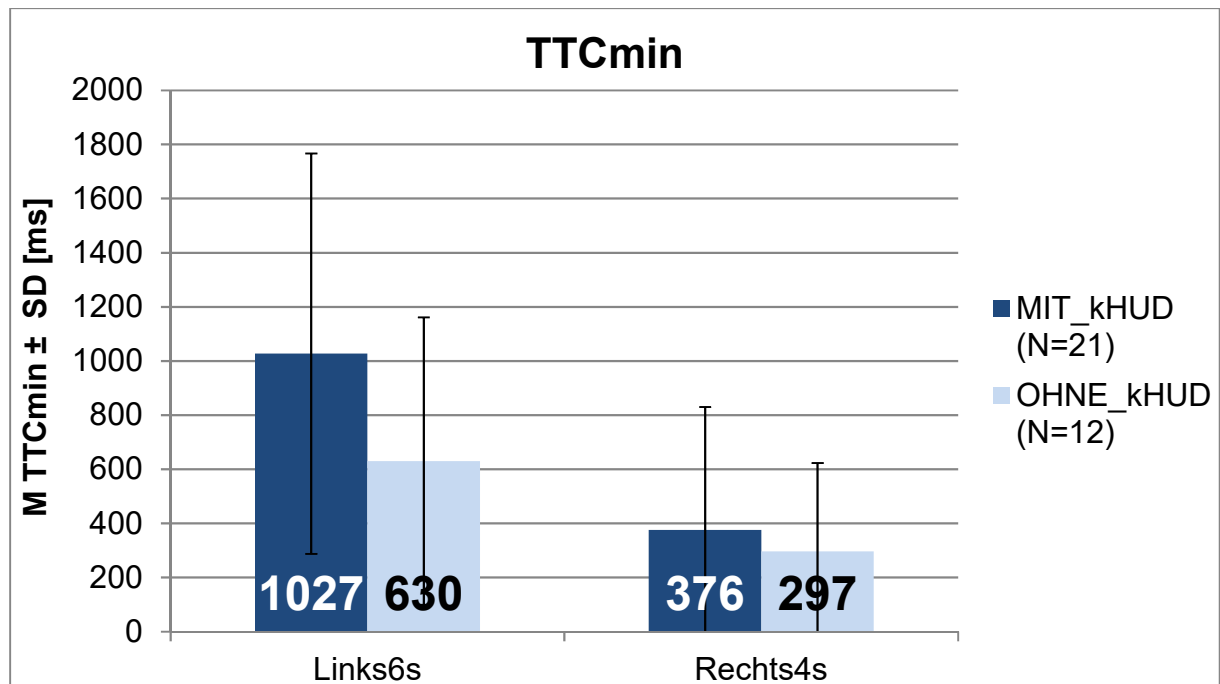


Abbildung 6-9: Mittlere TTCmin mit Standardabweichung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für die beiden Szenarien Links6s (Zeitbudget = 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget = 4 Sekunden).

Abbildung 6-9 zeigt die TTCmin im Szenario Links6s mit 6 Sekunden Zeitbudget für die Bedingung MIT\_kHUD (M=1027 ms, SD=740 ms) und OHNE\_kHUD (M=630 ms, SD=531 ms) und im Szenario Rechts4s mit 4 Sekunden Zeitbudget für MIT\_kHUD (M=376 ms, SD=454 ms) und OHNE\_kHUD (M=297 ms, SD=326 ms).

Im Szenario Links6s wird MIT\_kHUD eine ungefähr 400 ms größere TTCmin erreicht als OHNE\_kHUD. Im Szenario Rechts4s kann kein Einfluss der Art der Anzeige auf die TTCmin vermutet werden.

- ➔ E: Bei einem Zeitbudget von 6 Sekunden ist MIT\_kHUD die TTCmin größer als OHNE\_kHUD.
- ➔ E: Bei einem Zeitbudget von 4 Sekunden hat die Art der Anzeige keinen Einfluss auf die TTCmin.

### 6.3.2.5 TTCmin-Zeitpunkt

Der Zeitpunkt der TTCmin wurde von der Übernahmeaufforderung an gemessen. Wie im vorausgehenden Kapitel 6.3.2.4 für die TTCmin sind Fahrer, die geradeaus weitergefahren sind, nicht in den Werten enthalten. Für die Fahrer, die den FSW nicht rechtzeitig abgeschlossen hatten, wurde als Zeitpunkt für die TTCmin der Zeitpunkt des Überfahrens der Systemgrenze gewählt.

Abbildung 6-10 zeigt den Zeitpunkt der TTCmin im Szenario Links6s mit 6 Sekunden Zeitbudget für die Bedingung MIT\_kHUD (M=5229 ms, SD=779 ms) und OHNE\_kHUD (M=5628 ms, SD=586 ms) und im Szenario Rechts4s mit 4 Sekunden Zeitbudget für MIT\_kHUD (M=3965 ms, SD=658 ms) und OHNE\_kHUD (M=3951 ms, SD=327 ms).

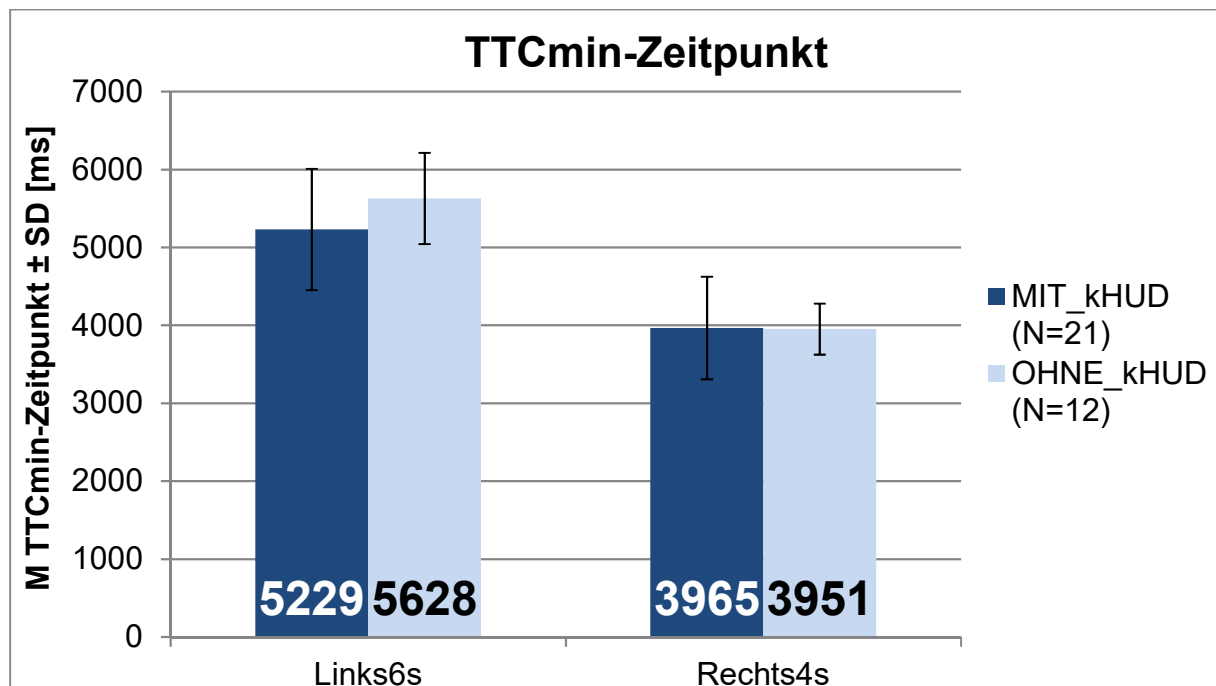


Abbildung 6-10: Mittlerer Zeitpunkt der TTCmin mit Standardabweichung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für die beiden Szenarien Links6s (Zeitbudget = 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget = 4 Sekunden).

Im Szenario Links6s ist MIT\_kHUD der Zeitpunkt der TTCmin ungefähr 400 ms früher aufgetreten als OHNE\_kHUD. Im Szenario Rechts4s ist kein Einfluss der Art der Anzeige auf den Zeitpunkt der TTCmin zu erkennen.

Der Zeitpunkt der TTCmin und die Übernahmezeit haben einen größeren Zeitabstand als in der vorausgehenden Versuchsreihe (siehe Kapitel 5.3.2.5), da hier ein FSW durchgeführt werden musste, der mehr Zeit in Anspruch nimmt als ein Bremsmanöver.

- ➔ E: Bei einem Zeitbudget von 6 Sekunden ist MIT\_kHUD der Zeitpunkt der TTCmin kleiner als OHNE\_kHUD.
- ➔ E: Bei einem Zeitbudget von 4 Sekunden hat die Art der Anzeige keinen Einfluss auf den Zeitpunkt der TTCmin.

### 6.3.2.6 Maximale Verzögerung longitudinal

In dieser Studie wird die maximale Verzögerung longitudinal nicht ausgewertet, da die Probanden die Anweisung erhalten hatten, nicht zu bremsen, sondern den FSW durchzuführen oder geradeaus weiterzufahren (siehe Kapitel 6.1.1.6).

### 6.3.2.7 Maximale Beschleunigung lateral

Abbildung 6-11 zeigt die maximale laterale Beschleunigung nach links und rechts für beide Szenarien. Tabelle 6-4 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen im Überblick.

Im Szenario Links6s kann weder für die Beschleunigung nach links (BeLi) noch die Beschleunigung nach rechts (BeRe) ein Einfluss der Art der Anzeige vermutet werden. Die Gegenlenkbewegung nach rechts ist ungefähr doppelt so groß wie die Einleitung des Lenkmanövers.

Im Szenario Rechts4s kann weder für die Beschleunigung nach links (BeLi) noch die Beschleunigung nach rechts (BeRe) ein Einfluss der Art der Anzeige erkannt werden. Die Gegenlenkbewegung und die Einleitung des Lenkmanövers sind ausgewogen, wobei die Beschleunigung nach rechts eine sehr hohe Standardabweichung zeigt.

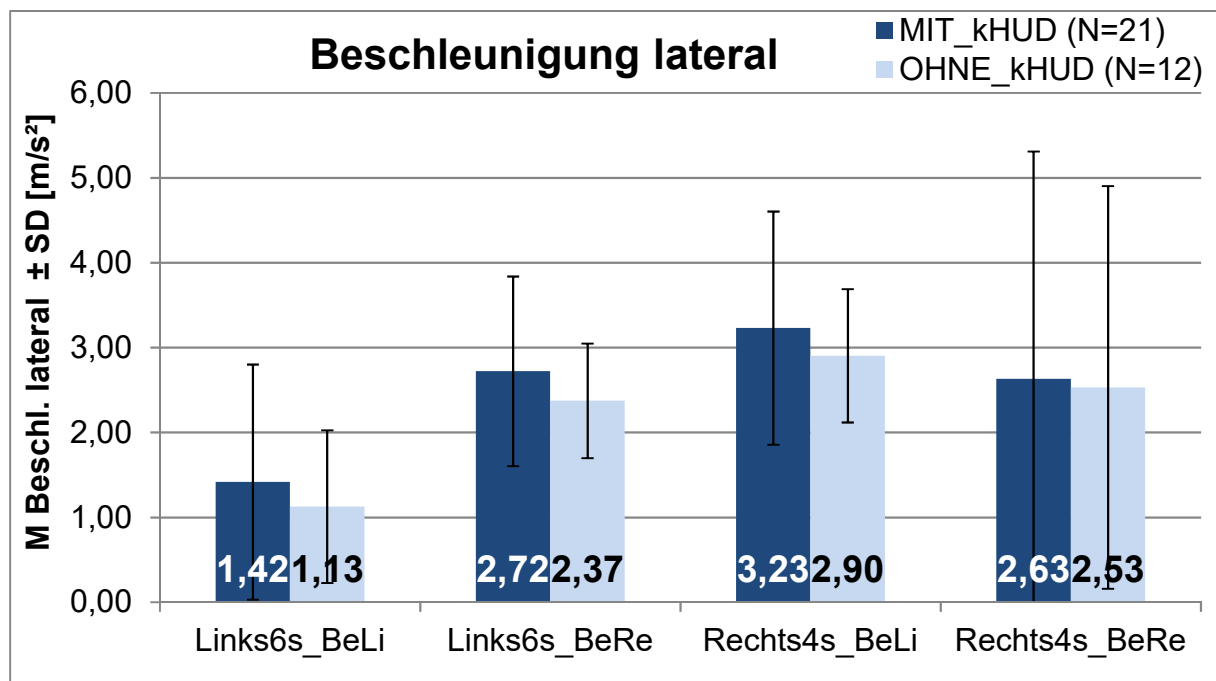


Abbildung 6-11: Mittlere laterale Beschleunigung nach links (BeLi) und rechts (BeRe) mit Standardabweichung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für die beiden Szenarien Links6s (Zeitbudget = 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget = 4 Sekunden).

*Tabelle 6-4: Mittelwert und Standardabweichung der lateralen Beschleunigungen links und rechts für die Bedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD in den Szenarien Links6s und Rechts4s.*

M [m/s <sup>2</sup> ]	Links6s_BeLi	Links6s_BeRe	Rechts4s_BeLi	Rechts4s_BeRe
MIT_kHUD	1.42	2.72	3.23	2.63
OHNE_kHUD	1.13	2.37	2.90	2.53
SD [m/s <sup>2</sup> ]	Links6s_BeLi	Links6s_BeRe	Rechts4s_BeLi	Rechts4s_BeRe
MIT_kHUD	1.38	1.12	1.37	2.68
OHNE_kHUD	0.90	0.68	0.78	2.37

- ➔ E: Bei einem Zeitbudget von 6 Sekunden hat die Art der Anzeige keinen Einfluss auf die laterale Beschleunigung.
- ➔ E: Bei einem Zeitbudget von 4 Sekunden hat die Art der Anzeige keinen Einfluss auf die laterale Beschleunigung.

### 6.3.2.8 Maximale resultierende Beschleunigung

Abbildung 6-12 zeigt die maximale resultierende Beschleunigung für beide Szenarien. Im Szenario Links6s deutet die resultierende Beschleunigung MIT\_kHUD (M=2.85, SD=1.29) und OHNE\_kHUD (M=2.40, SD=0.67) nicht auf einen Einfluss der Art der Anzeige hin. Ebenso verhält es sich im Szenario Rechts4s bei MIT\_kHUD (M=4.74, SD=2.49) und OHNE\_kHUD (M=4.03, SD=2.17). Im Szenario Links6s wurden geringere Beschleunigungen produziert als im Szenario Rechts4s.

Die Beschleunigungen fallen in der Versuchsreihe „Systemgrenze“ insgesamt niedriger aus als in der Versuchsreihe „Fehlfunktion“ (Kapitel 5.3.2.8) – bedingt durch den Manöverinfluss.

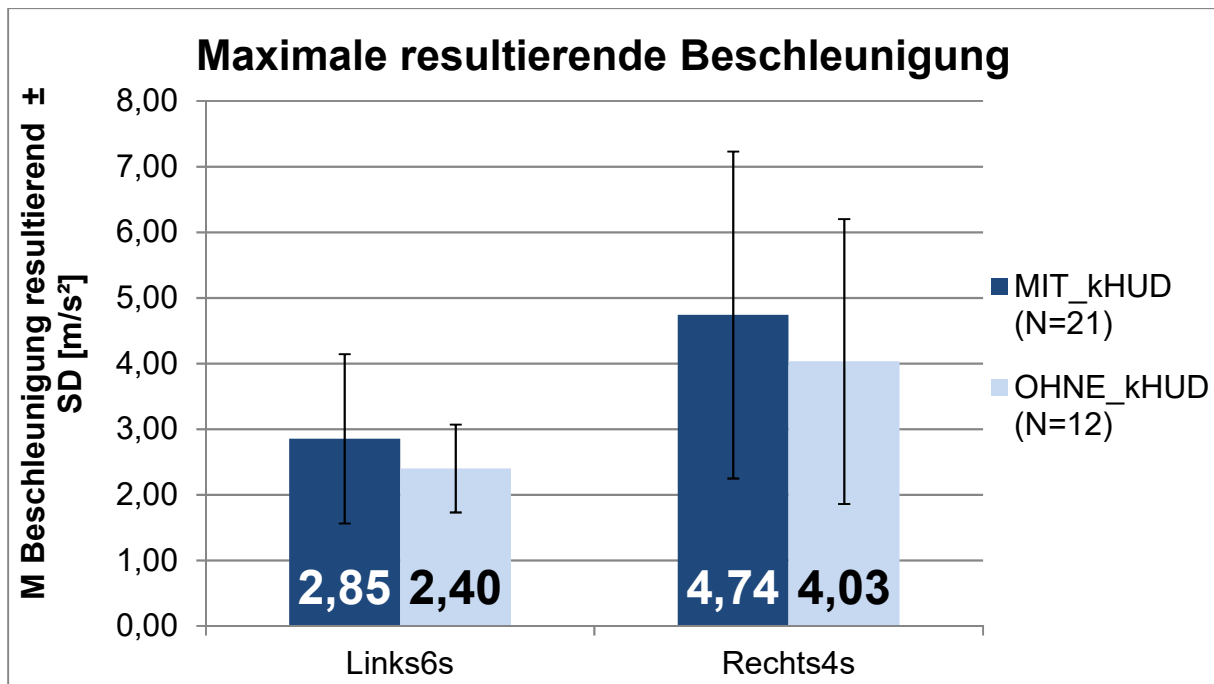


Abbildung 6-12: Mittlere maximale resultierende Beschleunigung mit Standardabweichung in der Bedingung MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD für die beiden Szenarien Links6s (Zeitbudget = 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget = 4 Sekunden).

- ➔ E: Bei einem Zeitbudget von 6 Sekunden hat die Art der Anzeige keinen Einfluss auf die resultierende Beschleunigung.
- ➔ E: Bei einem Zeitbudget von 4 Sekunden hat die Art der Anzeige keinen Einfluss auf die resultierende Beschleunigung.

### 6.3.2.9 Zusammenfassung der Übernahmekenngrößen

Während die Art der Anzeige keinen Einfluss auf die Häufigkeit der bewältigten Situationen hat, sinkt die Häufigkeit bei einem geringeren Zeitbudget.

Die Art der Anzeige beeinflusst das Absicherungsverhalten nicht. Bei kürzerem Zeitbudget wird schlechter abgesichert. Schulterblicke werden generell selten angewendet.

Bei einem Zeitbudget von 6 Sekunden wird MIT\_kHUD früher übernommen. Bei einem Zeitbudget von 4 Sekunden hat die Art der Anzeige scheinbar keinen Einfluss auf die Übernahmezeit.

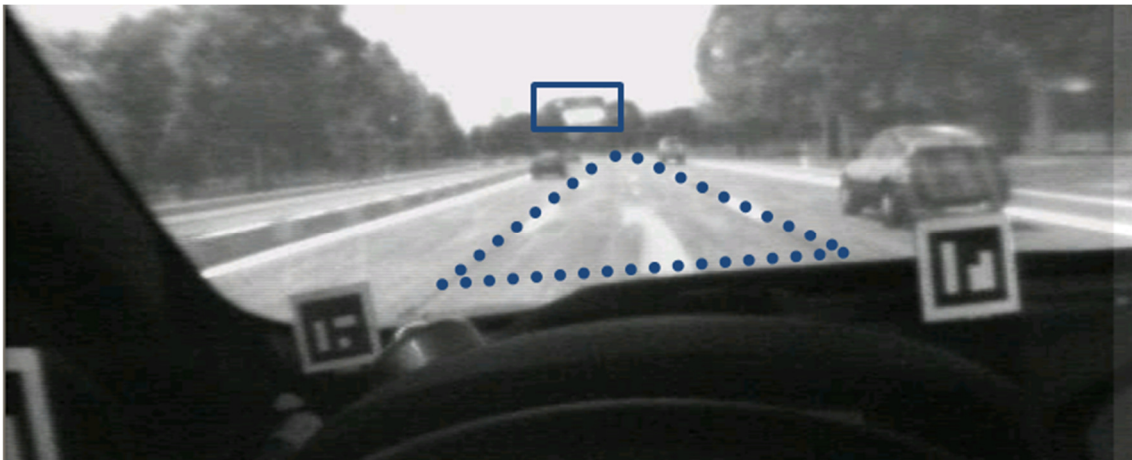
Die TTCmin und der Zeitpunkt der TTCmin verhalten sich ähnlich wie die Übernahmezeit.

Die Art der Anzeige hat bei keinem der beiden Zeitbudgets einen Einfluss auf die laterale und resultierende Beschleunigung.

Die Übernahmezeit ist als Startpunkt des vom Fahrer ausgeführten Manövers zu sehen, während die TTCmin als Ergebnis verstanden werden kann. Die Qualität der Manöverausführung wird durch die Beschleunigungen beschrieben. Die Übernahmezeit und die TTCmin lassen einen Einfluss des kHUD bei einem Zeitbudget von 6 Sekunden vermuten, der in den Beschleunigungen nicht zu sehen ist. Da sich die Qualität der Manöverausführung nicht verbesserte, kann die größere TTCmin in der kürzeren Übernahmezeit begründet sein.

### 6.3.3 Blickkenngößen bei Systemgrenze (SG)

Da die Übernahmekenngößen alleine keine aussagekräftige Bewertung eines Anzeigekonzeptes zulassen, werden in den folgenden Kapiteln Blickverläufe und Blickkenngößen analysiert, die in Kapitel 6.3.3.6 zusammengefasst werden. Da es sich um eine händische Auswertung handelt, bei der jeder einzelne Frame erfasst wurde, liegt die Pupillenerkennung bei 100 %. Die Markererkennung wurde nicht erfasst. Sie ist nur bei automatisierten Auswertungen relevant.



*Abbildung 6-13: Darstellung der AOI im Frontbereich. Die gepunktete Fläche zeigt das AOI Zentral. Die umrahmte Fläche zeigt das AOI Schild. Die restliche Fläche der Frontsicht wird als AOI Szenerie bezeichnet.*

Die detaillierte Blickanalyse erlaubt die Unterteilung in die AOIs „Spiegel links“ (SpieLinks), „Spiegel rechts“ (SpieRechts), „Innenspiegel“ (InnenSpie), „Tacho“ (Tacho), „Schulter“ (Schulter), „fahrfremde Tätigkeit“ (NebAuf) und die Übergangszeiten für Blickwechsel (Übergang), die kein AOI darstellen. Die Frontsicht des Fahrers ist in drei weitere AOIs unterteilt (siehe Abbildung 6-13): Das AOI „Zentralbereich“ (Zentral) deckt den mittleren Fahrstreifen vor dem Fahrzeug ab. Hier

sind bei der Bedingung MIT\_kHUD die Anzeigesymbole des kontaktanalogen Head-Up Displays eingeblendet (siehe Abbildung 6-13 gepunktete Fläche). Das AOI „Verkehrszeichen“ (Schild) mit der Navigationsrichtung ist in Abbildung 6-13 als umrahmte Fläche eingezeichnet. Die restlichen Bereiche in der Frontsicht des Fahrers gelten als AOI „Szenerie“ (Szenerie). Es wurde bei der Auswertung nicht nach linkem und rechtem Fahrstreifen unterschieden.

#### **6.3.3.1 Blicksequenz Zeitintervall 8 Sekunden**

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die Blickverläufe der Studie geben. Die Abbildung 6-14 bis Abbildung 6-17 zeigen die Blickzuwendung der Fahrer auf die einzelnen AOIs in einem Zeitintervall von 8 Sekunden, beginnend mit der Übernahmeaufforderung. Ein Zeitframe entspricht 40 ms. Als Blickzuwendungen sind die Verweildauern auf die AOIs und die Blickübergangszeit aufgeführt, die ab Kapitel 6.3.3.2 beschrieben werden. Zur besseren Orientierung sind in den Abbildungen die Mittelwerte der Übernahmezeit (Raute) und des Zeitpunkts der minimalen TTC (Kreuz) mit den jeweiligen Standardabweichungen (Pfeile), das Zeitbudget von 6 bzw. 4 Sekunden und das 50 %-Zeitbudget mit 3 bzw. 2 Sekunden angetragen. Das 50 %-Zeitbudget wurde in Kapitel 5.3.3.2 (hier lag das Zeitbudget bei 6.6 Sekunden und das 50 %-Zeitbudget bei 3.3 Sekunden) als eine Möglichkeit für ein geeignetes Ende des Betrachtungsintervalls zur Blickdatenauswertung festgelegt. Ein wichtiges Argument war, dass die Phase der Informationsaufnahme und -verarbeitung möglichst wenig Zeitanteil der Manöverumsetzung enthält, die durch den Bereich der Übernahmezeit angekündigt wird. Wie die Intervallgrenzen und die Standardabweichungen der Übernahmezeiten in den folgenden Abbildungen zeigen, ist das Kriterium sehr gut erfüllt. Die Manöverumsetzung beginnt erst nach dem Ende des Betrachtungsintervalls.



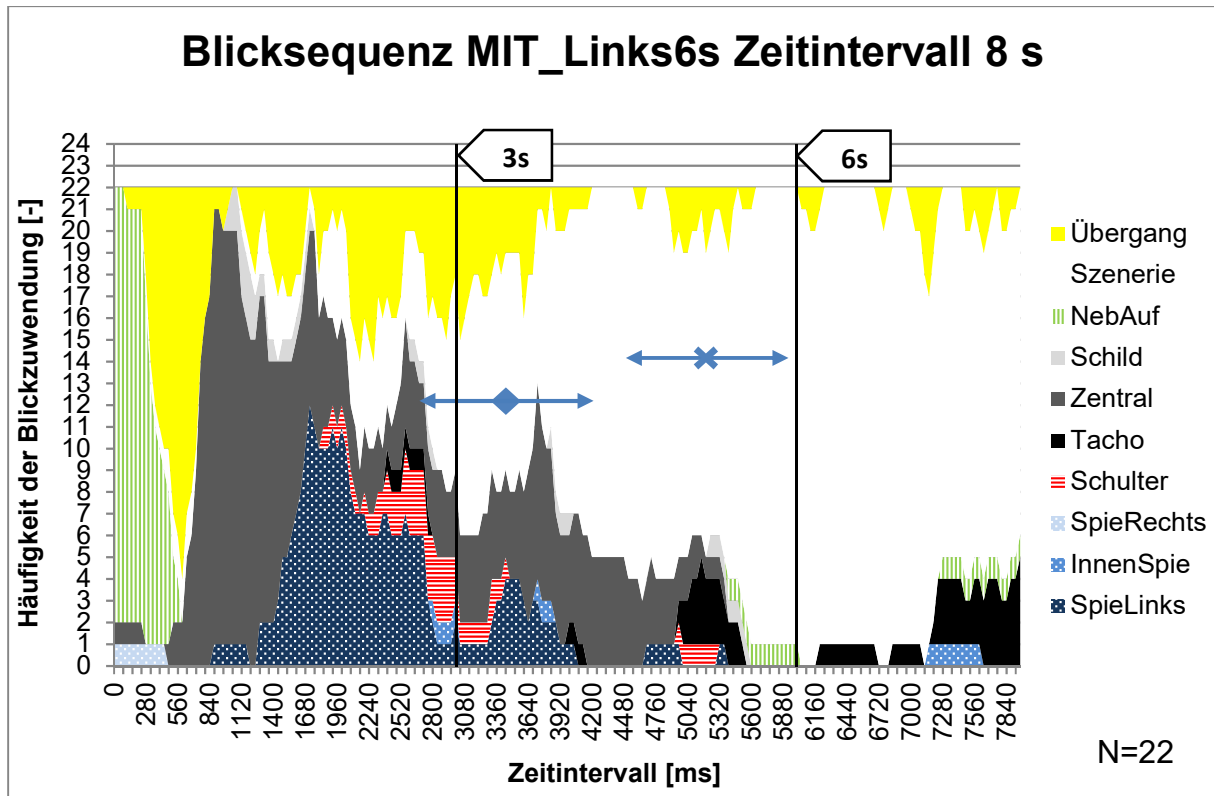


Abbildung 6-14: Blickzuwendungen der Bedingung MIT\_kHUD im Szenario Links6s auf die unterschiedlichen AOIs in einem Zeitintervall von 8 Sekunden, beginnend mit der Übernahmeaufforderung.

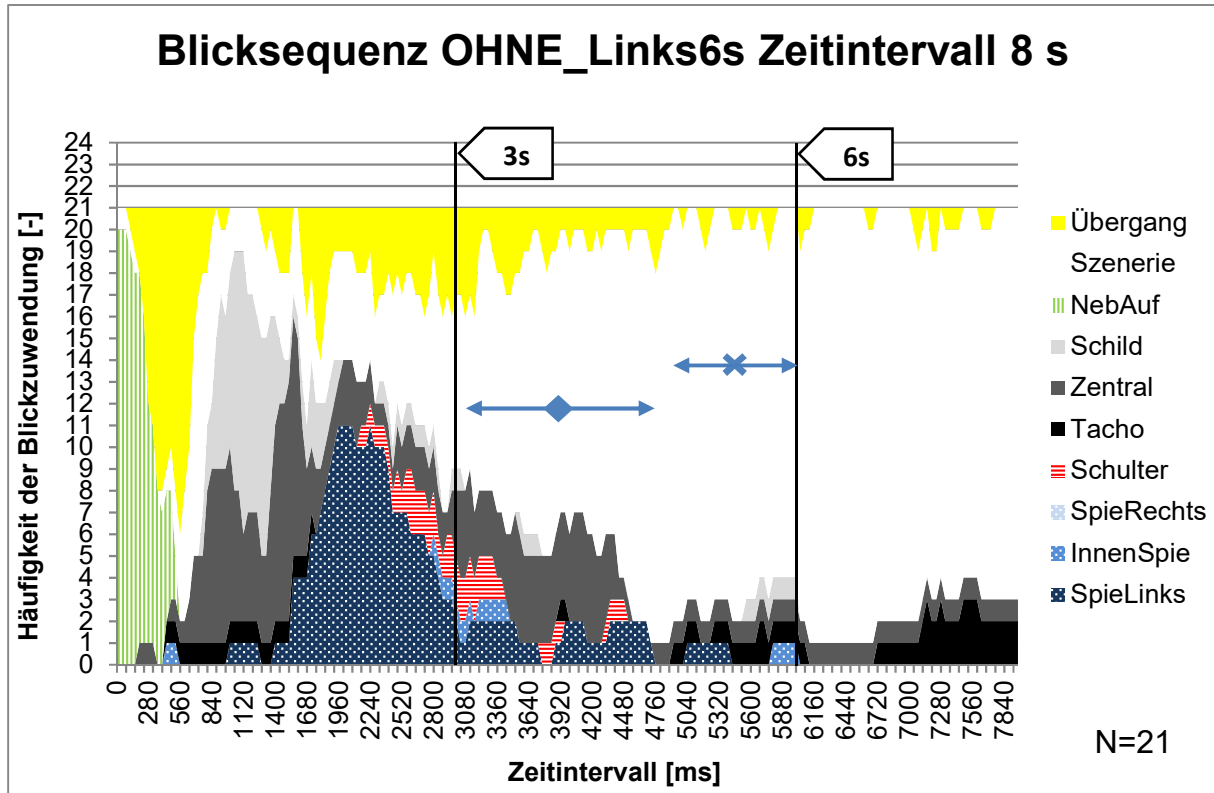


Abbildung 6-15: Blickzuwendungen der Bedingung OHNE\_kHUD im Szenario Links6s auf die unterschiedlichen AOIs in einem Zeitintervall von 8 Sekunden, beginnend mit der Übernahmeaufforderung. Angetragen sind das Zeitbudget mit

*6 Sekunden und die Hälfte des Zeitbudgets mit 3 Sekunden. Die blaue Raute markiert den Mittelwert der Übernahmezeit=◆, das blaue Kreuz den Mittelwert des Zeitpunkts der TTCmin=X und die blauen Pfeile die jeweilige Standardabweichung.*

In Abbildung 6-14 ist die Blicksequenz von 22 verwertbaren Datensätzen in der Bedingung MIT\_Links6s dargestellt. Die Datensätze von VP01 konnten nicht genutzt werden, weil sich eine Schraube an der Dikablis-Head-Unit gelöst hatte und die Szenenkamera verrutscht war. Eine Überprüfung der Videodaten hat ergeben, dass bei VP05 aufgrund eines technischen Mangels die Übernahmeaufforderung nicht ausgelöst wurde. Dadurch hat dieser Proband während des Zeitintervalls durchgehend die fahrfremde Tätigkeit ausgeübt und musste ebenfalls von der Auswertung ausgeschlossen werden.

Bis auf zwei Probanden haben alle Probanden zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung die Nebenaufgabe bearbeitet. Dann folgt eine Übergangsphase, nach der fast ausschließlich auf den zentralen Bereich im mittleren Fahrstreifen vor dem Fahrzeug geblickt wird. Hier ist die kontaktanaloge Anzeige positioniert. Dass das kontaktanaloge Head-Up Display genutzt wird, zeigt auch die geringe Blickzuwendung zum Verkehrsschild, das in der Navigationsaufgabe die Richtung anzeigt. Die Fahrer haben nun die nötige Information aus der Umwelt aufgenommen und die Handlungsentscheidung zum Fahrstreifenwechsel getroffen. Es folgen nun Absicherungsblicke in den linken Außenspiegel und vereinzelte Schulterblicke. Ungefähr bei der Hälfte des Zeitbudgets von 3 Sekunden beginnt die Übernahme durch die Handlungsumsetzung. Die Blickwechsel werden seltener und die Verweildauer auf das AOI Szenarie nimmt zu. Das AOI Szenarie deckt den linken und rechten Fahrstreifen ab. Die Aufmerksamkeit der Fahrer im AOI Szenarie richtet sich hauptsächlich auf das vorausfahrende Fahrzeug im Zielfahrstreifen. Im Zeitintervall zwischen 3 und 6 Sekunden wird das Manöver umgesetzt und der kritischste Zeitpunkt der TTCmin überwunden. Ab ungefähr 6 Sekunden finden kaum Blickwechsel statt und die Fahrer blicken fast ausschließlich auf das vorausfahrende Fahrzeug im neuen Fahrstreifen. Gegen Ende des 8-Sekunden-Intervalls deutet die langsame Zunahme der Tachoblicke an, dass die Fahrer den Status der Automation kontrollieren und sie erneut aktivieren.

In Abbildung 6-15 ist die Blicksequenz von 21 verwertbaren Datensätzen in der Bedingung OHNE\_Links6s dargestellt. Die Datensätze von VP01 und VP17 konnten nicht genutzt werden, weil sich eine Schraube an der Dikablis-Head-Unit gelöst hat

und die Szenenkamera verrutscht war. VP02 hat die Nebenaufgabe sehr lange bearbeitet. Eine Auswertung der Videodaten hat ergeben, dass durch einen technischen Mangel das Signal zur Übernahme zu spät ertönte.

Bis auf einen Probanden bearbeiten alle Probanden zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung die Nebenaufgabe. Es folgt eine Blickübergangsphase zur Informationsaufnahme aus den AOIs Szenerie, Schild und Zentral. Auch ohne die Anzeigesymbole des kHUD wird der zentrale Bereich vor dem Fahrzeug angeblickt. Die Blickübergangszeiten gehen kurzfristig auf null zurück, da die Blickwechsel zwischen den AOIs Szenerie, Schild und Zentral fließend geschehen und selbst in der detaillierten Auswertung die Übergangszeiten schwer zu ermitteln sind. Die zeitliche Abfolge der Blickzuwendungen lässt sich aus der Darstellungsart nicht für Einzelprobanden, aber allgemein für die Stichprobe erkennen: Von der Nebenaufgabe wird mit einer Übergangszeit häufig über das AOI Szenerie, zum AOI Schild oder AOI Zentral geblickt. Das AOI Szenerie stellt hier das auf dem rechten Fahrstreifen vorausfahrende Fahrzeug dar, das in diesem Manöver keine Relevanz hat. Dann folgen – wie in Abbildung 6-14 MIT\_kHUD – Blicke in den linken Außenspiegel und vereinzelte Schulterblicke, die ungefähr nach der Hälfte des Zeitbudgets bei 3 Sekunden das Ende der Informationsaufnahme zeigen. Es beginnt die Übernahmephase, in der Blickwechsel zwischen dem vorausfahrenden Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen und dem zentralen Bereich vor dem Fahrzeug stattfinden. Nach dem kritischsten Zeitpunkt und der Absolvierung des Manövers findet eine Fixierung auf das vorausfahrende Fahrzeug statt, das nach dem Fahrstreifenwechsel zum AOI Szenerie gehört. Gegen Ende des 8-Sekunden-Intervalls wird wieder der Automationsstatus im Tacho abgefragt.

In den beiden Bedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD liegen die Übernahmezeiten und der Zeitpunkt der TTCmin sehr gut im zweiten Intervall von 3 bis 6 Sekunden.

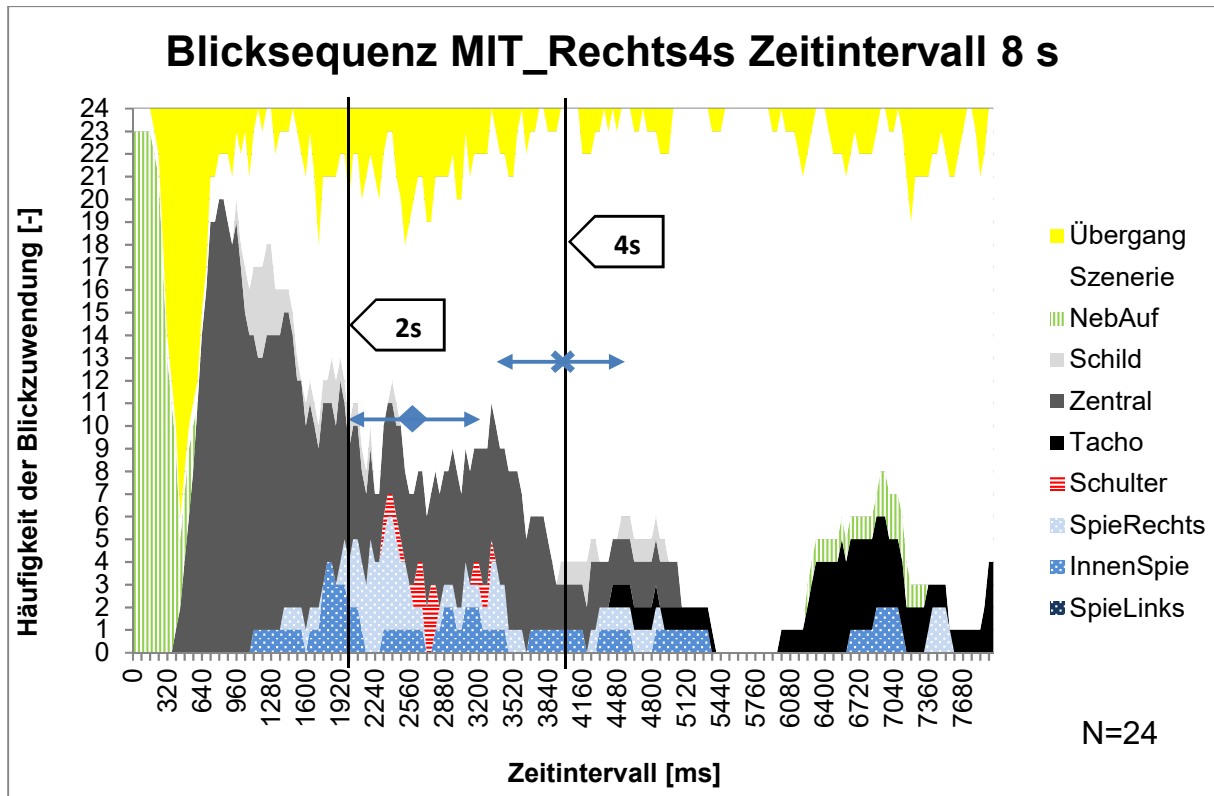


Abbildung 6-16: Blickzuwendungen der Bedingung MIT\_kHUD im Szenario Rechts4s auf die unterschiedlichen AOIs in einem Zeitintervall von 8 Sekunden, beginnend mit der Übernahmeaufforderung.

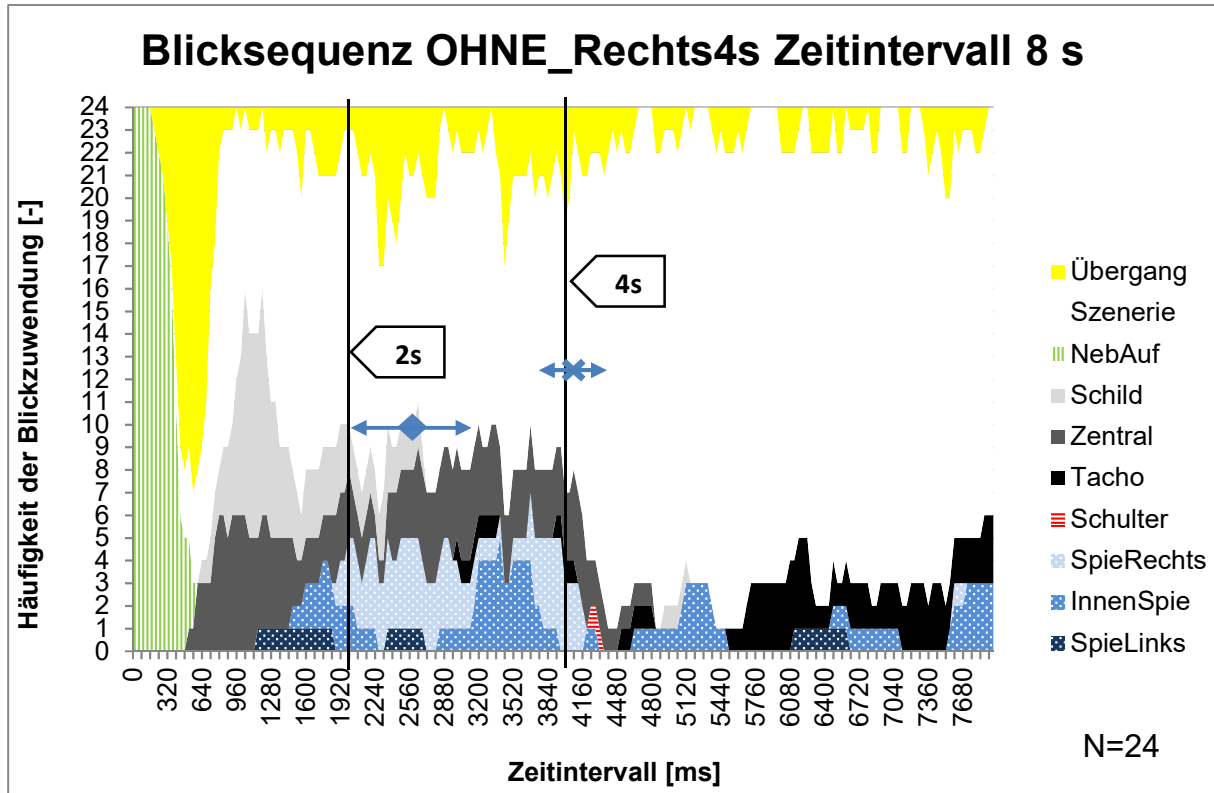


Abbildung 6-17: Blickzuwendungen der Bedingung OHNE\_kHUD im Szenario Rechts4s auf die unterschiedlichen AOIs in einem Zeitintervall von 8 Sekunden, beginnend mit der Übernahmeaufforderung. Angetragen sind das Zeitbudget mit

*4 Sekunden und die Hälfte des Zeitbudgets mit 2 Sekunden. Die blaue Raute markiert den Mittelwert der Übernahmezeit=◆, das blaue Kreuz den Mittelwert des Zeitpunkts der TTCmin=X und die blauen Pfeile die jeweilige Standardabweichung.*

In Abbildung 6-16 ist die Blicksequenz in der Bedingung MIT\_Rechts4s dargestellt. Das Zeitbudget von 4 Sekunden und das 50 %-Zeitbudget von 2 Sekunden sind zusammen mit der Übernahmezeit und dem Zeitpunkt der TTCmin angetragen. Es zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie in der Bedingung MIT\_Links6s in Abbildung 6-14. Nach Beendigung der Nebenaufgabe gibt es eine Übergangsphase zum AOI Zentral. Dort wird die kontaktanaloge Information abgefragt, während das Verkehrsschild wenig angeblickt wird. Nach 2 Sekunden zeigt sich, dass der seitliche und rückwärtige Verkehr abgesichert wird. Dies geschieht weniger ausführlich als bei einem Zeitbudget von 6 Sekunden, wie das Absicherungsverhalten in Kapitel 6.3.2.2 belegte. Die Informationsaufnahme scheint noch nicht vollständig abgeschlossen zu sein und wird von der Übernahmephase teilweise überlagert, die ab 2 Sekunden beginnt. Im Zeitintervall von 2 bis 4 Sekunden findet das Wechselmanöver statt, das mit dem Zeitpunkt der TTCmin endet. Danach nehmen die Blicke im AOI Szenerie auf das vorausfahrende Fahrzeug im neuen Fahrstreifen zu. Vermehrte Tachoblicke zeigen die Kontrolle des Systemzustands an, nachdem die Situation durch die Fahrer bewältigt wurde.

In Abbildung 6-17 ist die Blicksequenz in der Bedingung OHNE\_Rechts4s dargestellt. Das Zeitbudget von 4 Sekunden und das 50 %-Zeitbudget von 2 Sekunden sind zusammen mit der Übernahmezeit und dem Zeitpunkt der TTCmin angetragen. Die Blicksequenz ähnelt in der Anfangsphase der Bedingung OHNE\_Links6s. Die Blicke gehen über den rechten Fahrstreifen (Szenerie) in die AOIs Zentral und Schild. Vor der 2-Sekunden-Intervallgrenze setzen vermehrt Spiegelblicke ein, die von der Übernahme begleitet werden. Im Intervallbereich von 2 bis 4 Sekunden zeigt die Informationsaufnahme aus Seiten- und Innenspiegel ein Plateau, das in der Bedingung MIT\_Rechts4s nicht zu erkennen ist. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass einige Probanden die Information verzögert aus diesen AOIs aufgenommen haben. Der Zeitpunkt der TTCmin liegt hinter dem Zeitbudget von 4 Sekunden, weil durch die Übernahme die Automation deaktiviert wurde und das Fahrzeug durch das Schleppmoment langsamer wurde. Im Szenario Rechts4s haben einige Probanden entgegen der Anweisung zusätzlich gebremst.

Für alle Abbildungen in diesem Kapitel gilt: Die Standardabweichung der Übernahme und des Zeitpunkts der TTCmin überschneiden sich in dieser Übernahmesituation an einer Systemgrenze nicht – im Gegensatz zur Übernahmesituation bei einer Fehlfunktion in Kapitel 5.3.3.2. Das liegt an der Art des Manövers. Ein Fahrstreifenwechsel benötigt mehr Zeit als ein Bremsmanöver.

→ E: Für diese Studie wird das Betrachtungsintervall von der Übernahmeaufforderung bis zum 50 %-Zeitbudget der Systemgrenze aus Kapitel 5.3.3.2 übernommen.

### **6.3.3.2 Prozentuale Verweildauer bei Systemgrenze (SG)**

In den Blickdaten sind sowohl Probanden enthalten, die geradeaus weitergefahren sind, als auch solche, die einen FSW durchgeführt haben. In der frühen Phase des Betrachtungsintervalls unterscheiden sich diese Manövertypen nicht. Bei MIT\_Links6s sind die Datensätze von den zwei Probanden VP01 und VP05 (siehe Abbildung 6-14) und bei OHNE\_Links6s von den Probanden VP01, VP02 und VP17 (siehe Abbildung 6-15) nicht verwertbar, weil die Kamera während der Fahrt verrutschte oder die Übernahmeaufforderung nicht ausgelöst wurde. Damit ergibt sich für das Szenario Links6s mit einem Zeitbudget von 6 Sekunden eine Stichprobengröße von N=20. Im Szenario Rechts4s mit einem Zeitbudget von 4 Sekunden konnten alle Datensätze verwertet werden. Hier liegt die Stichprobengröße bei N=24.

Abbildung 6-18 zeigt die prozentuale Verweildauer auf die AOs im Zeitintervall von der Übernahmeaufforderung bis zur Hälfte des Zeitbudgets, das in Kapitel 5.3.3.2 festgelegt wurde. Für das Szenario Links6s beträgt das Zeitintervall 3 Sekunden und für das Szenario Rechts4s 2 Sekunden. Unterhalb der Diagrammachse sind die Mittelwerte tabellarisch aufgeführt. In Tabelle 6-5 sind die Standardabweichungen für beide Szenarien dargestellt.

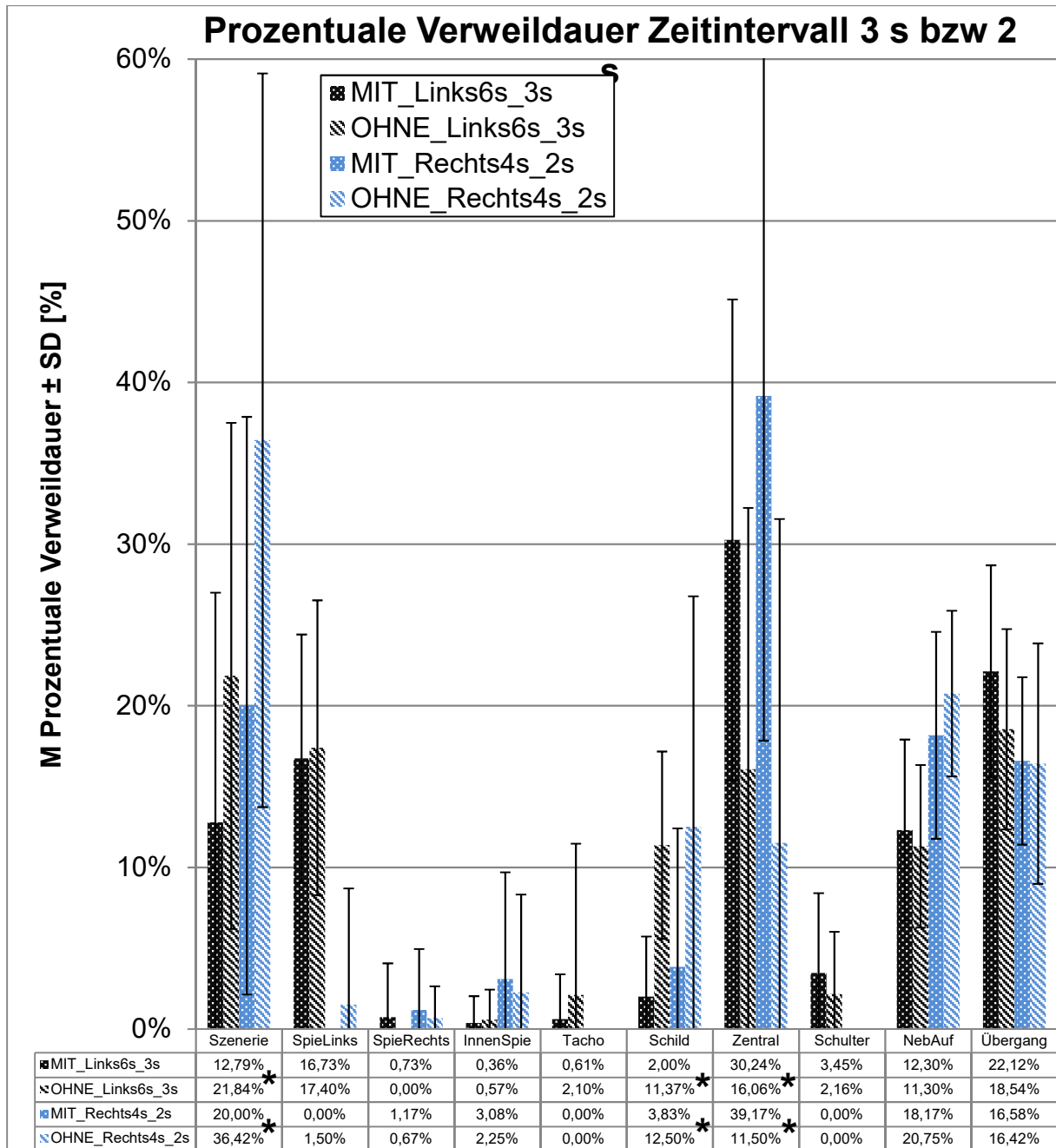


Abbildung 6-18: Prozentuale Verweildauer mit Standardabweichung auf die unterschiedlichen AOIs für die Bedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD und die Szenarien Links6s (Zeitbudget 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget 4 Sekunden). Die Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.  $N_{Links6s}=20$  und  $N_{Rechts4s}=24$ .

Tabelle 6-5: Standardabweichungen der prozentualen Verweildauer [%] für die Bedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD in den Szenarien Links6s (Zeitbudget 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget 4 Sekunden).

Standardabweichung	Szenerie	SpielLinks	SpielRechts	InnenSpie	Tacho	Schild	Zentral	Schulter	NebAuf	Übergang
MIT_Links6s_3s	14,21	7,68	3,33	1,67	2,78	3,72	14,89	4,95	5,60	6,56
OHNE_Links6s_3s	15,66	9,12	0,00	1,87	9,37	5,80	16,18	3,85	5,03	6,20
MIT_Rechts4s_3s	17,87	0,00	3,78	6,61	0,00	8,58	21,33	0,00	6,40	5,18
OHNE_Rechts4s_2s	14,21	7,68	3,33	1,67	2,78	3,72	14,89	4,95	5,60	6,56

Im Szenario Links6s zeigt sich, dass in der Bedingung MIT\_kHUD um ca. 10 % kürzer im AOI Szenerie und um ca. 9 % kürzer im AOI Schild verweilt wird als OHNE\_kHUD. Dafür wird MIT\_kHUD ein größerer Zeitanteil von ca. 14 % im AOI Zentral verweilt als OHNE\_kHUD.

Auch im Szenario Rechts4s zeigt sich, dass in der Bedingung MIT\_kHUD ca. 16 % kürzer im AOI Szenerie und ca. 9 % kürzer im AOI Schild verweilt wird als OHNE\_kHUD. Dafür wird MIT\_kHUD ein größerer Zeitanteil – ca. 28 % – im AOI Zentral verweilt als OHNE\_kHUD.

Der Anstieg der Verweildauer auf das AOI Zentral in der Bedingung MIT\_kHUD wird ausgeglichen durch eine Reduzierung der Verweildauer auf die AOIs Szenerie und Schild. Dieser Unterschied deckt sich mit den Ergebnissen der Blickverläufe in Kapitel 6.3.3.1. Das kHUD zieht die Aufmerksamkeit des Fahrers auf sich.

Das AOI SpieLinks verdeutlicht die unterschiedlichen Manöver der Szenarien. Im Szenario Links6s musste der Fahrstreifen nach links gewechselt werden, der mindestens zu 80 % über Spiegelblicke abgesichert wurde (siehe Kapitel 6.3.2.2). Für Szenario Rechts4s war der linke Außenspiegel ein unwichtiger Informationsgeber. Im AOI SpieRechts zeigt sich der Einfluss des FSW nach rechts im Szenario Rechts4s jedoch nicht. Es gibt zwei Gründe hierfür: Wie in Kapitel 6.3.3.1 vermutet, hat die Positionierung der fahrfremden Tätigkeit auf dem Beifahrersitz einen Einfluss auf das Blick- und Absicherungsverhalten. Eventuell konnten Probanden im peripheren Blickfeld den rechten Fahrstreifen überwachen. Außerdem ist das Betrachtungsintervall im Szenario Rechts4s nur 2 Sekunden lang. Ein beträchtlicher Teil der Spiegelblicke wird im Vergleich zum 3 Sekunden Zeitintervall nicht berücksichtigt. Das Zeitintervall wurde auf 50 % des Zeitbudgets festgelegt, da vermutet wurde, dass ein kürzeres Zeitbudget eine frühere Übernahme und damit auch eine schnellere Informationsaufnahme bedeutet. Scheinbar trifft die Annahme einer schnelleren Informationsaufnahme aus den Außenspiegeln bei kürzerem Zeitbudget nicht zu.

Die Blicksequenz aus Kapitel 6.3.3.1 zeigte keinen zeitlichen Schwerpunkt für das AOI InnenSpie, und die prozentuale Verweildauer in Abbildung 6-18 liefert keine Aussage. Das AOI Tacho ist in der Anfangsphase der Informationsaufnahme von sehr geringer Bedeutung. In akuten und kritischen Phasen wird wenig bis gar keine Information aus ihm abgefragt. Erst nach Entschärfung der Situation wird der Systemzustand über den Tacho abgefragt. Das AOI Schulter ermöglicht ebenso keine Aussage, da maximal ein



Drittel der Probanden den FSW mit einem Schulterblick abgesichert haben (siehe Kapitel 6.3.2.2). Der Schulterblick ist immer an einen Spiegelblick gebunden und wird meistens nach dem Spiegelblick durchgeführt.

Die Übergangszeiten lassen in keinem Szenario einen Einfluss der Art der Anzeige vermuten. Die Übergangszeit ist nicht mit einer Verweildauer gleichzusetzen, da während eines Übergangs keine Information aufgenommen wird. In beiden Szenarien wird in der Bedingung OHNE\_kHUD immer noch mindestens 10 % der Intervallzeit auf das AOI Zentral geblickt. Scheinbar ist dieser Bereich für die Fahrer von Bedeutung, obwohl keine kontaktanaloge Anzeige eingeblendet ist.

Insgesamt haben die Werte eine große Standardabweichung. Durch das kurze Betrachtungsintervall von 3 bzw. 2 Sekunden tragen einzelne Extremwerte vermutlich stark dazu bei.

- E: Unabhängig vom Zeitbudget wird MIT\_kHUD ein größerer Zeitanteil auf dem AOI Zentral und ein kleinerer Zeitanteil auf den AOIs Schild und Szenerie verweilt als OHNE\_kHUD.
- E: Im Szenario Links6s hat die Anzeige keinen Einfluss auf den Zeitanteil der Verweildauer im AOI SpieLinks.
- E: Im Szenario Rechts4s kann keine Aussage über den Einfluss einer Anzeige im AOI SpieRechts getroffen werden.
- M: Die Positionierung der fahrfremden Tätigkeit sollte möglichst anwendungsnah umgesetzt werden, da sie sehr wahrscheinlich das Absicherungs- und Blickverhalten beeinflusst.
- M: Das Betrachtungsintervall von 2 Sekunden grenzt die Spiegelblicke aus und ist damit zu kurz.
- F: Es kann vermutet werden, dass ein kürzeres Zeitbudget die Übernahmezeit verkürzt, aber nicht die Informationsaufnahmedauer. Die Informationsaufnahme und die Übernahmephase werden überlagert. Es muss ein neues Intervallende definiert werden.
- E: In zeitkritischen Übernahmesituationen wird der Tacho sehr wenig bis gar nicht als Informationsgeber genutzt.
- E: Die kontaktanaloge Anzeige zeigt keinen Einfluss auf den Zeitanteil der Übergangszeiten.
- E: Selbst OHNE\_kHUD werden mindestens 10 % der Intervallzeit auf das AOI Zentral geblickt.

### 6.3.3.3 Absolute Verweildauer bei Systemgrenze (SG)

Abbildung 6-19 zeigt die absolute Verweildauer auf die AOIs im Zeitintervall von der Übernahmeaufforderung bis zur Hälfte des Zeitbudgets. Unterhalb der Diagrammachse sind die Mittelwerte tabellarisch aufgeführt. In Tabelle 6-6 sind die Standardabweichungen für beide Szenarien dargestellt.

Im Szenario Links6s wird in der Bedingung MIT\_kHUD im AOI Szenerie 270 ms und im AOI Schild 280 ms kürzer verweilt wird als OHNE\_kHUD. Dafür wird MIT\_kHUD 425 ms länger im AOI Zentral verweilt als OHNE\_kHUD.

Im Szenario Rechts4s wird in der Bedingung MIT\_kHUD im AOI Szenerie fast 330 ms und im AOI Schild 170 ms kürzer verweilt wird als OHNE\_kHUD. Dafür wird MIT\_kHUD über 550 ms länger im AOI Zentral verweilt als OHNE\_kHUD.

Die Übergangszeit wird nicht durch die Anzeige beeinflusst. Für die AOIs SpieLinks, SpieRechts, InnenSpie, Tacho, Schulter und NebAuf gelten die Aussagen zur prozentualen Verweildauer aus Kapitel 6.3.3.2.

- ➔ E: Unabhängig vom Zeitbudget wird MIT\_kHUD länger auf dem AOI Zentral und kürzer auf den AOIs Schild und Szenerie verweilt als OHNE\_kHUD.
- ➔ E: Die kontaktanaloge Anzeige hat keinen Einfluss auf die Übergangszeiten.

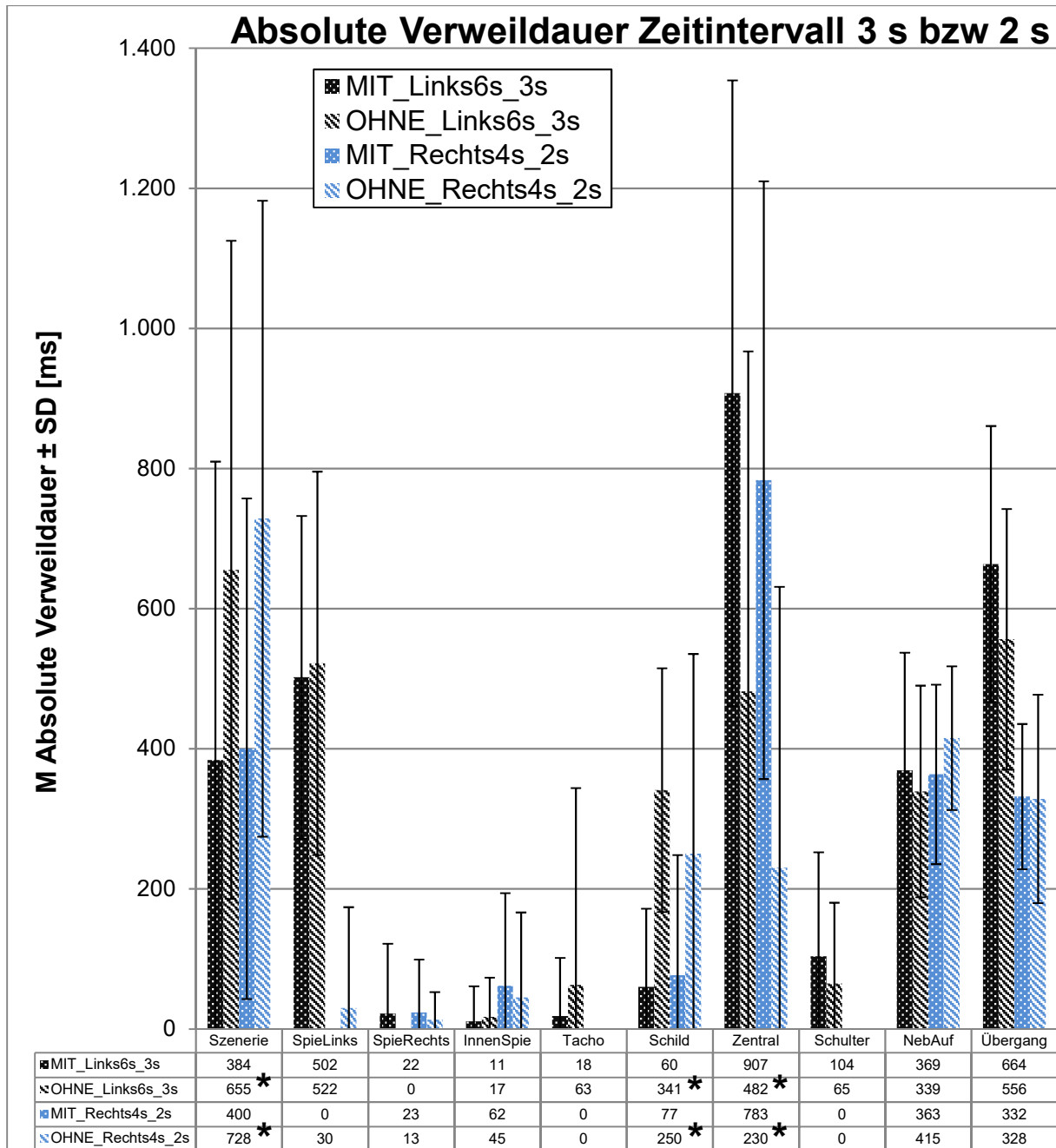


Abbildung 6-19: Absolute Verweildauer mit Standardabweichung auf die unterschiedlichen AOIs für die Bedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD und die Szenarien Links6s (Zeitbudget 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget 4 Sekunden). Die Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.  $N_{Links6s}=20$  und  $N_{Rechts4s}=24$ .

Tabelle 6-6: Standardabweichungen der Verweildauer für die Bedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD in den Szenarien Links6s (Zeitbudget 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget 4 Sekunden).

Standardabweichung	Szenerie	SpielLinks	SpielRechts	InnenSpie	Tacho	Schild	Zentral	Schulter	NebAuf	Übergang
MIT_Links6s_3s	426	230	100	50	83	112	447	149	168	197
OHNE_Links6s_3s	470	274	0	56	281	174	485	115	151	186
MIT_Rechts4s_3s	357	0	76	132	0	172	427	0	128	104
OHNE_Rechts4s_2s	454	144	39	121	0	285	401	0	103	149

#### **6.3.3.4 Blickhäufigkeit bei Systemgrenze (SG)**

Abbildung 6-20 zeigt die Blickhäufigkeit auf die AOIs im Zeitintervall von der Übernahmeaufforderung bis zur Hälfte des Zeitbudgets. Unterhalb der Diagrammachse sind die Mittelwerte tabellarisch aufgeführt. In Tabelle 6-7 sind die Standardabweichungen für beide Szenarien dargestellt.

Im Szenario Links6s wird in der Bedingung MIT\_kHUD um 0.81 Hz seltener in das AOI Szenerie und um 0.77 Hz seltener in das AOI Schild geblickt als OHNE\_kHUD. Im AOI Zentral ist der Unterschied mit einer um 0.17 Hz größeren Blickhäufigkeit für MIT\_kHUD sehr gering, obwohl die absolute Verweildauer MIT\_kHUD länger war (siehe vorausgehendes Kapitel 6.3.3.3).

Im Szenario Rechts4s wird in der Bedingung MIT\_kHUD in das AOI Szenerie und in das AOI Schild jeweils um 0.33 Hz seltener geblickt als OHNE\_kHUD. Dafür wird MIT\_kHUD um 0.66 Hz häufiger in das AOI Zentral geblickt als OHNE\_kHUD.

Das AOI Übergang, das die Blickaktivität der Fahrer repräsentiert, zeigt mit einem Unterschied von jeweils 0.17 Hz keine Auswirkung der Anzeige. Für die AOIs SpieLinks, SpieRechts, InnenSpie, Tacho, Schulter und NebAuf gelten die Aussagen zur prozentualen Verweildauer aus Kapitel 6.3.3.2.

- ➔ E: Im Szenario Links6s wird MIT\_kHUD seltener auf das AOI Szenerie und das AOI Schild geblickt als OHNE\_kHUD.
- ➔ E: Im Szenario Links6s hat die Anzeige im AOI Zentral keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeit.
- ➔ E: Im Szenario Rechts4s wird MIT\_kHUD seltener in das AOI Szenerie und in das AOI Schild geblickt als OHNE\_kHUD.
- ➔ E: Im Szenario Rechts4s wird MIT\_kHUD häufiger in das AOI Zentral geblickt als OHNE\_kHUD.
- ➔ E: Die kontaktanaloge Anzeige hat keinen Einfluss auf die Häufigkeit der Übergänge.

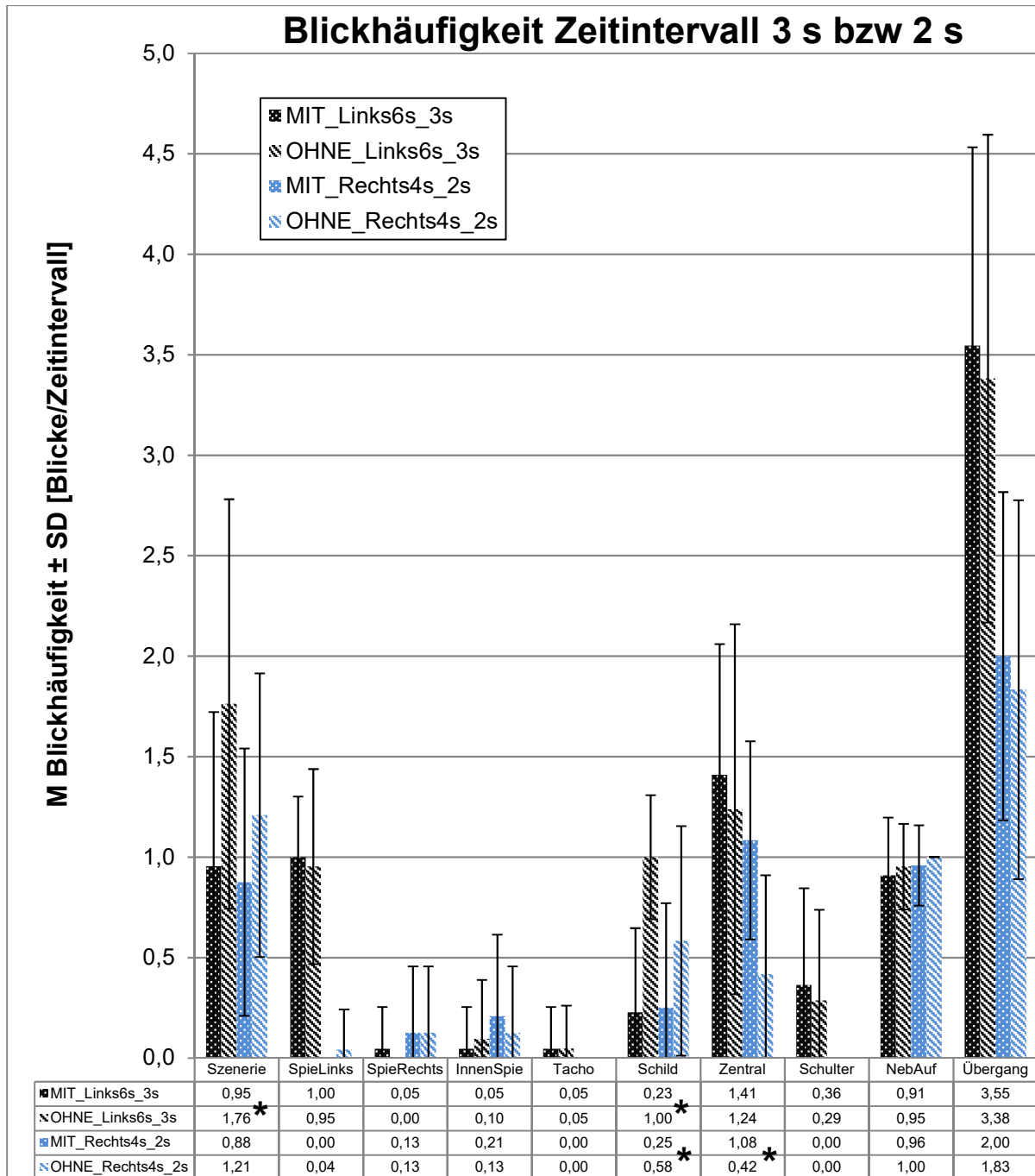


Abbildung 6-20: Blickhäufigkeit mit Standardabweichung auf die unterschiedlichen AOIs für die Bedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD und die Szenarien Links6s (Zeitbudget 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget 4 Sekunden). Die Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.  $N_{Links6s}=20$  und  $N_{Rechts4s}=24$ .

Tabelle 6-7: Standardabweichungen der Blickhäufigkeit für die Bedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD in den Szenarien Links6s (Zeitbudget 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget 4 Sekunden).

Standardabweichung	Szenerie	SpielLinks	SpielRechts	InnenSpie	Tacho	Schild	Zentral	Schulter	NebAuf	Übergang
MIT_Links6s_3s	0,77	0,30	0,21	0,21	0,21	0,42	0,65	0,48	0,29	0,99
OHNE_Links6s_3s	1,02	0,49	0,00	0,29	0,21	0,31	0,92	0,45	0,21	1,21
MIT_Rechts4s_3s	0,67	0,00	0,33	0,41	0,00	0,52	0,49	0,00	0,20	0,82
OHNE_Rechts4s_2s	0,71	0,20	0,33	0,33	0,00	0,57	0,49	0,00	0,00	0,94

### 6.3.3.5 Mittlere Verweildauer bei Systemgrenze (SG)

Abbildung 6-21 zeigt die mittlere Verweildauer auf die AOIs im Zeitintervall von der Übernahmeaufforderung bis zur Hälfte des Zeitbudgets. Unterhalb der Diagrammachse sind die Mittelwerte tabellarisch aufgeführt. In Tabelle 6-6 sind die Standardabweichungen für beide Szenarien dargestellt.

Im Szenario Links6s fällt der Unterschied im AOI Szenerie mit einer um ca. 90 ms geringeren mittleren Verweildauer für MIT\_kHUD sehr gering aus. Die kürzere Verweildauer kann durch die selteneren Blickzuwendungen erklärt werden. Auf dem AOI Schild wird MIT\_kHUD im Mittel 260 ms kürzer verweilt als OHNE\_kHUD. Auf dem AOI Zentral wird MIT\_kHUD im Mittel 440 ms länger verweilt als OHNE\_kHUD.

Im Szenario Rechts4s wird in der Bedingung MIT\_kHUD fast 240 ms kürzer im AOI Szenerie und 170 ms im AOI Schild verweilt als OHNE\_kHUD. Dafür wird MIT\_kHUD 480 ms länger im AOI Zentral verweilt als OHNE\_kHUD.

Die mittlere Verweildauer im AOI Übergang zeigt keinen Einfluss der Anzeige. Für die AOIs SpieLinks, SpieRechts, InnenSpie, Tacho und Schulter gelten die Aussagen zur prozentualen Verweildauer aus Kapitel 6.3.3.2.

- ➔ E: Im Szenario Links6s hat die Anzeige keinen Einfluss auf die mittlere Verweildauer im AOI Szenerie. Die kürzere absolute Verweildauer erklärt sich durch die geringere Blickhäufigkeit.
- ➔ E: Im Szenario Links6s wird MIT\_kHUD im Mittel kürzer auf dem AOI Schild verweilt als OHNE\_kHUD. Die kürzere absolute Verweildauer erklärt sich durch die geringere Blickhäufigkeit und die geringere mittlere Verweildauer.
- ➔ E: Im Szenario Links6s wird MIT\_kHUD im Mittel länger auf dem AOI Zentral verweilt als OHNE\_kHUD. Die längere absolute Verweildauer erklärt sich nur durch die längere mittlere Verweildauer.
- ➔ E: Im Szenario Rechts4s ist die mittlere Verweildauer im AOI Szenerie MIT\_kHUD kürzer als OHNE\_kHUD. Die kürzere absolute Verweildauer erklärt sich durch die geringere mittlere Verweildauer.
- ➔ E: Im Szenario Rechts4s ist die mittlere Verweildauer im AOI Schild MIT\_kHUD kürzer als OHNE\_kHUD. Die kürzere absolute Verweildauer erklärt sich durch die geringere Blickhäufigkeit und die geringere mittlere Verweildauer.
- ➔ E: Im Szenario Rechts4s ist die mittlere Verweildauer im AOI Zentral MIT\_kHUD länger als OHNE\_kHUD. Die längere absolute Verweildauer erklärt sich durch die größere Blickhäufigkeit und die längere mittlere Verweildauer.

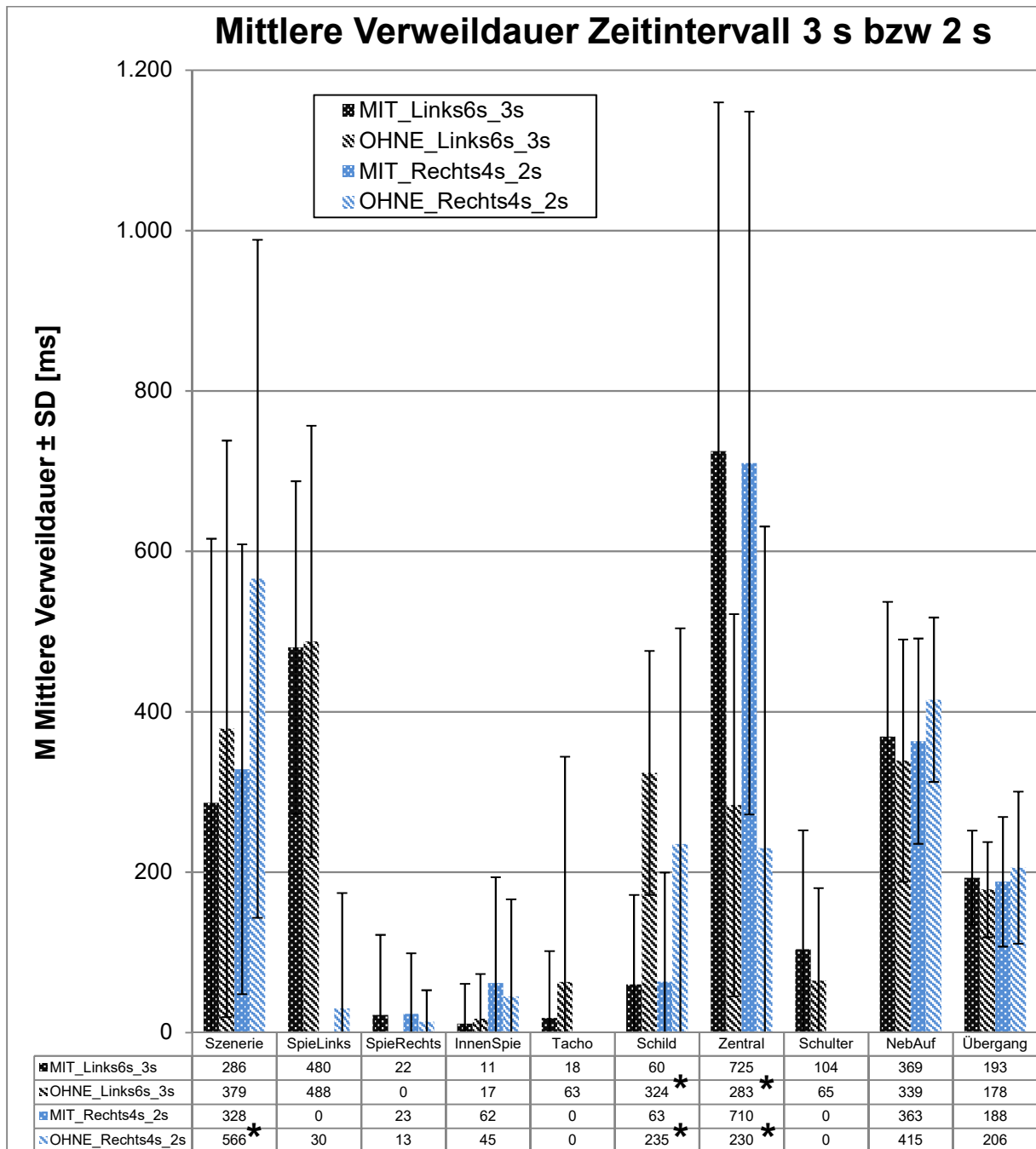


Abbildung 6-21: Mittlere Verweildauer auf die unterschiedlichen AOIs für die Bedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD und die Szenarien Links6s (Zeitbudget 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget 4 Sekunden). Die Mittelwerte sind tabellarisch aufgeführt.  $N_{Links6s}=20$  und  $N_{Rechts4s}=24$ .

Tabelle 6-8: Standardabweichungen der mittleren Verweildauer für die Bedingungen MIT\_kHUD und OHNE\_kHUD in den Szenarien Links6s (Zeitbudget 6 Sekunden) und Rechts4s (Zeitbudget 4 Sekunden).

Standardabweichung	Szenerie	SpielLinks	SpielRechts	InnenSpie	Tacho	Schild	Zentral	Schulter	NebAuf	Übergang
MIT_Links6s_3s	329	207	100	50	83	112	435	149	168	59
OHNE_Links6s_3s	359	269	0	56	281	152	238	115	151	59
MIT_Rechts4s_3s	280	0	76	132	0	136	438	0	128	81
OHNE_Rechts4s_2s	423	144	39	121	0	269	401	0	103	95

### 6.3.3.6 Zusammenfassung der Blickkenngößen bei Systemgrenze (SG)

Für diese Studie zu Systemgrenzen wurde das 50 %-Zeitbudget angewendet, das in der vorausgehenden Studie zu Fehlfunktionen als Ende des Betrachtungsintervalls festgelegt worden war (siehe Kapitel 5.3.3.2). Es ergibt sich ein Betrachtungsintervall von 3 Sekunden für das Szenario Links6s und 2 Sekunden für das Szenario Rechts4s. MIT\_kHUD wird in beiden Szenarien länger auf dem AOI **Zentral** verweilt. Hier ist die kontaktanaloge Anzeige positioniert. Der Anstieg ergibt sich im Szenario Links6s durch eine längere mittlere Verweildauer und im Szenario Rechts4s durch eine längere mittlere Verweildauer und häufigere Blickzuwendung. Für Fahrer OHNE\_kHUD ist der zentrale Bereich vor dem Fahrzeug auch von Bedeutung, da sie mit einem Zeitanteil von 11–16 % auf dieses AOI blicken.

- ➔ E: Unabhängig vom Zeitbudget wird MIT\_kHUD ein größerer Zeitanteil auf dem AOI Zentral verweilt.
- ➔ E: Die kontaktanaloge Anzeige hat eine fokussierende Wirkung.
- ➔ E: OHNE\_kHUD werden mindestens 10 % der Intervallzeit auf das AOI Zentral geblickt.

MIT\_kHUD wird in beiden Szenarien kürzer auf dem AOI **Szenerie** verweilt: im Szenario Links6s durch weniger Blickzuwendung und im Szenario Rechts4s durch eine kürzere mittlere Verweildauer. Das AOI Szenerie war nicht in linken und rechten Fahrstreifen aufgeteilt. Dadurch konnte nicht zwischen wichtiger und unwichtiger Information unterschieden werden.

- ➔ E: Unabhängig vom Zeitbudget wird MIT\_kHUD ein kleinerer Zeitanteil auf dem AOI Szenerie verweilt.
- ➔ M: Für Szenarien mit FSW sollte das AOI Szenerie weiter unterschieden werden, um relevante Blickzeiten genauer bestimmen zu können.

MIT\_kHUD wird in beiden Szenarien prozentual kürzer auf dem AOI **Schild** verweilt. In beiden Szenarien wird das durch die geringere Häufigkeit der Blickzuwendung und die kürzere mittlere Verweildauer erklärt. Das Verkehrsschild ist für die Bedingung OHNE\_kHUD ein wichtiger Informationsgeber zur Entscheidungsfindung in der Navigationsaufgabe. MIT\_kHUD ist das AOI Schild unwichtig.

- ➔ E: Unabhängig vom Zeitbudget wird MIT\_kHUD ein kleinerer Zeitanteil auf dem AOI Schild verweilt.
- ➔ E: MIT\_kHUD verschiebt sich der Zeitanteil der Blickzuwendung von den AOIs Schild und Szenerie zum AOI Zentral.



Im Szenario Links6s hat die Anzeige keinen Einfluss auf die Blickzuwendung zum wichtigen AOI **SpieLinks**. Das Absicherungsverhalten im Außenspiegel bei einem FSW wird durch die Anzeige nicht beeinflusst.

- E: Die Anzeige hat keinen Einfluss auf das Absicherungsverhalten im AOI SpieLinks.

Im Szenario Rechts4s kann keine Aussage über den Einfluss einer Anzeige im AOI **SpieRechts** getroffen werden. Das 50 %-Zeitbudget als Ende des Betrachtungsintervalls (2 Sekunden) ist zu kurz für die Auswertung der Blickkenngöße. Darauf weist das Absicherungsverhalten aus Kapitel 6.3.2.2 hin. Außerdem könnte die Positionierung der Nebenaufgabe auf dem Beifahrersitz das Blickverhalten beeinflusst haben.

- M: Das Betrachtungsintervall von 2 Sekunden grenzt die Spiegelblicke aus und ist damit zu kurz.
- M: Die Positionierung der fahrfremden Tätigkeit sollte möglichst anwendungsnah umgesetzt werden, da sie sehr wahrscheinlich das Absicherungs- und Blickverhalten beeinflusst.
- F: Es kann vermutet werden, dass ein kürzeres Zeitbudget die Übernahmezeit verkürzt, aber nicht die Informationsaufnahmezeit. Es muss ein neues Intervallende definiert werden.

Über den Einfluss einer kontaktanalogen Anzeige auf die Blickzuwendung im AOI **InnenSpie** kann keine Aussage getroffen werden. Insgesamt wird der Innenspiegel im Betrachtungsintervall wenig angeblickt.

Das AOI **Tacho** wird in diesem zeitkritischen Szenario sehr wenig bis gar nicht angeblickt. Im Tacho wurden keine Navigationshilfen, sondern nur der Systemstatus angezeigt, der nach Bewältigung der kritischen Situation im Tacho abgefragt wurde. In der Studie zu Fehlfunktionen war die Information im Tacho und im kHUD identisch. Auch hier wurde in der kritischen Phase der Tacho fast nicht angeblickt (siehe Kapitel 5.3.3.6).

- E: In zeitkritischen Übernahmesituationen wird der Tacho sehr wenig bis gar nicht als Informationsgeber genutzt.

Über den Einfluss einer kontaktanalogen Anzeige auf die Blickzuwendung im AOI **Schulter** kann keine Aussage getroffen werden. Es wurde maximal von 30 % der Fahrer ein Schulterblick durchgeführt (siehe Kapitel 6.3.2.2). Der Schulterblick erfolgte

oft nach dem Spiegelblick und ist deswegen häufig vom Betrachtungsintervall ausgeschlossen.

Das Blickverhalten auf das AOI **NebAuf** ist für die Evaluierung eines HUD keine geeignete Kenngröße (siehe Kapitel 3.2). Sie zeigt lediglich, dass die Blickreaktion auf die Übernahmeaufforderung bei ungefähr 400 ms stattfindet und dass sie damit sehr gut den Literaturangaben aus Kapitel 3.1 entspricht.

Keine Kenngröße der **Übergangsdauer** zeigt einen Einfluss der Anzeige. Insgesamt nehmen die Übergänge einen Zeitanteil von 16–22 % ein. In dieser Zeit kann keine Information aufgenommen werden.

→ E: Die kontaktanaloge Anzeige hat keinen Einfluss auf die Übergangszeiten.

## 6.4 Hypothesenübersicht

Die Hypothesen werden in diesem Kapitel angenommen oder abgelehnt. Dies erfolgt aber ohne statistische Absicherung.

Keine der subjektiven Variablen zeigt einen Einfluss der Anzeige (Tabelle 6-9). Eventuell ist die Befragung zu allgemein gehalten, da sie sich meist auf die gesamte Fahrt bezieht. Die wahrgenommene Kritikalität, die direkt nach dem Erleben der Übernahme abgefragt wurde, zeigt eine gute Einschätzung der Situation durch die Probanden. Durch das verkürzte Zeitbudget hat sich die wahrgenommene Kritikalität nahezu verdoppelt.

Bei den Übernahmekenngrößen zeigt sich bei der Übernahme mit einem Zeitbudget von 6 Sekunden eine Verkürzung der Übernahmezeit in der Bedingung MIT\_kHUD um ca. 460 ms. Eine größere TTCmin und ein früherer Zeitpunkt der TTCmin durch ein kHUD sind nicht eindeutig vorhanden. Sie müssen aus Expertensicht eher abgelehnt werden. Es besteht die Vermutung, dass die abhängige Variable Übernahmezeit nur in einem sehr kleinen Zeitfenster den Einfluss eines kHUD belegt. Bei kleinen Zeitbudgets ist der Fahrer schon sehr nah an seiner Leistungsgrenze und zieht keinen Nutzen aus einer kontaktanalogen Anzeige. Bei größeren Zeitbudgets gestaltet sich der Fahrer die Übernahme möglichst komfortabel, indem er Handlungen langsamer ausführt (Fuller, 2005; Damböck, 2013).

Die Beschleunigungen in der Manöverausführung zeigen keinen Einfluss des kHUD. Der Zeitgewinn durch eine kürzere Übernahmezeit wird von den Fahrern sehr wahrscheinlich in eine größere TTCmin investiert und nicht in die Qualität des FSW.

Dies entspricht den Ergebnissen aus der Versuchsreihe zu Fehlfunktionen (Kapitel 5.3.2.9).

Im Blickverhalten zeigt sich für beide Szenarien, dass MIT\_kHUD der zentrale Bereich vor dem Fahrzeug länger angeblickt wird. Dafür verkürzt sich die Blickzeit auf das Richtungsschild und in die restliche Szenerie, die für den FSW zu diesem Zeitpunkt keine neue oder wichtige Information enthält. Für das Szenario Links6s zeigt sich über ein Betrachtungsintervall von 3 Sekunden, dass der linke Außenspiegel gleichbleibend beachtet wird. Für das Szenario Rechts4s ist keine Aussage möglich, da das Betrachtungsintervall die Blickdaten nicht einschließt. Die 50 %-Zeitbudgetgrenze als Ende des Betrachtungsintervalls ist für kurze Zeitbudgets ungeeignet: Hier haben sich die Übernahme und die Informationsaufnahme überlagert. Scheinbar ist das Blickverhalten nicht an die Übernahmezeit und das Zeitbudget gekoppelt.

Für beide Szenarien gilt, dass die Übergangszeiten vom kHUD unbeeinflusst sind und das Kombiinstrument kaum beachtet wird. Allerdings wurde in dieser Versuchsreihe keine für die Navigationsaufgabe relevante Information eingeblendet.

*Tabelle 6-9: Hypothesen der Versuchsreihe „Systemgrenze“ nach Kapiteln strukturiert. Ein Haken zeigt die angenommenen Hypothesen und ein Kreuz die verworfenen Hypothesen. Die Ergebnisse sind statistisch nicht abgesichert.*

Subjektive Daten bei Systemgrenze (SG) – Kapitel 6.3.1		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Beanspruchung nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Beanspruchung.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Automationsvertrauen nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Automationsvertrauen.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Kritikalitätsempfinden nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Kritikalitätsempfinden.	✗
Übernahmekenngrößen bei Systemgrenze (SG) – Kapitel 6.3.2		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Häufigkeit der bewältigten Situationen nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Häufigkeit der bewältigten Situationen.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Absicherungsverhalten nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst das Absicherungsverhalten.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Übernahmezeit nicht.	✓ ✗
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Übernahmezeit.	✗ ✓
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die TTCmin nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die TTCmin.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst den Zeitpunkt der TTCmin nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst den Zeitpunkt der TTCmin.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Beschleunigung lateral nicht.	✓
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale Beschleunigung lateral.	✗
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale resultierende Beschleunigung nicht.	✓

H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die maximale resultierende Beschleunigung.	✘
<b>Blickkenngößen bei Systemgrenze (SG) – Kapitel 6.3.3</b>		
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Verweildauer auf die AOIs nicht.	✘
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die prozentuale Verweildauer auf die AOIs.	✓
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die absolute Verweildauer auf die AOIs nicht.	✘
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die absolute Verweildauer auf die AOIs.	✓
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs nicht.	✘
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die Blickhäufigkeit auf die AOIs.	✓
H <sub>0</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Verweildauer auf die AOIs nicht.	✘
H <sub>1</sub>	Die Anzeige beeinflusst die mittlere Verweildauer auf die AOIs.	✓

## 7 Zusammenfassung und Diskussion

In Kapitel 7.1 wird die Ausgangssituation aufgegriffen und in Kapitel 7.2 werden die Ergebnisse zusammengefasst. Kapitel 7.3 zeigt den weiteren Forschungsbedarf und die Einschränkungen der Versuchsreihen auf.

### 7.1 Ausgangssituation

Aufgabenstellung war eine ganzheitliche Untersuchung des Einflusses eines kontaktanalogen Head-Up Displays auf den Fahrer bei automatisierten Fahrten. Subjektive Probandenbewertungen, Übernahmekenngößen und Blickkenngößen sollten Aufschluss über positive Effekte oder sicherheitsgefährdende Aspekte des kHUD geben.

Dazu wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt: Bei der Versuchsreihe „Fehlfunktion“ mussten Probanden während einer teilautomatisierten Fahrt bei zwei Fehlfunktionen, die durch eine Fehlerkennung des ACC-Systems ausgelöst wurden, die Fahraufgabe selbstinitiiert übernehmen. Das vorausfahrende Fahrzeug war durch eine kontaktanaloge Anzeige markiert, um dem Fahrer die Objekterkennung des ACC-Systems zu visualisieren. Die zeitnahe Wiederholung der Fehlfunktion sollte den Einfluss des kHUD auf Lerneffekte klären.

Bei der Versuchsreihe „Systemgrenze“ wurden die Probanden während einer hochautomatisierten Fahrt an mehreren kontrollierten Systemgrenzen zur Übernahme aufgefordert. Eine kontaktanaloge Navigationshilfe zeigte den erforderlichen Fahrstreifenwechsel an. Zwei Übernahmesituationen mit Zeitbudgets von 6 und 4 Sekunden wurden ausgewertet.

## 7.2 Erkenntnisgewinn

In der **Versuchsreihe „Fehlfunktion“** mit einem Zeitbudget von 6.6 Sekunden zeigte das kHUD keinen Einfluss auf die Beanspruchung, das Automationsvertrauen und das Kritikalitätsempfinden der Fahrer. Auch die Häufigkeit der Kollisionen, das Absicherungsverhalten, die Übernahmezeit, die TTCmin, der Zeitpunkt der TTCmin und die Beschleunigungen während der Manöverdurchführung blieben vom kHUD unbeeinflusst.

In einem Betrachtungsintervall von 3.3 Sekunden beginnend mit den Fehlfunktionen zeigten die Blickdaten der prozentualen Verweildauer, der Blickfrequenz und der mittleren Verweildauer in den AOIs Szenerie, FzgVor und den Übergangszeiten einen Einfluss des kHUD. MIT\_kHUD verkürzten sich die Blickzuwendungen zu unwichtiger Information aus der Szenerie und die Blickübergangszeiten, während das vorausfahrende Fahrzeug länger angeblickt wurde. Das Kombiinstrument wird in kritischen Situationen fast nicht angeblickt (siehe auch Bergmeier, 2009).

In den langen Betrachtungsintervallen der „Normalfahrt“ zeigte das kHUD in der prozentualen Blickdauer eine Zunahme auf das AOI Szenerie und den linken Außenspiegel. Damit deckt sich die fokussierende Wirkung des kHUD mit den Blickdaten während der Fehlfunktion. Das Kombiinstrument wird unabhängig von der Art der Anzeige in unkritischen Situationen regelmäßig abgefragt.

Das kHUD hatte keinen Einfluss auf die maximale Blickdauer, obwohl es Blickzuwendungen des Fahrers auf sich zieht. Dieser Effekt ist als positiv zu werten, da keine sicherheitsrelevanten Bedenken entstehen. Der horizontale Blickwinkel als Indikator für die Beanspruchung der Fahrer war MIT\_kHUD kleiner als OHNE\_kHUD. Die Literatur deutet kleinere Blickwinkel mit einer erhöhten Beanspruchung, die in der subjektiven Probandenbefragung nicht bestätigt werden konnte. Auch die Fahrerfahrung des Probandenkollektives spricht gegen eine erhöhte Beanspruchung. Hier entsteht ein Widerspruch, der in weiteren Arbeiten beachtet werden sollte. Der kleinere horizontale Blickwinkel MIT\_kHUD kann sehr gut durch die Fokussierung auf die im zentralen Sehbereich angeordneten kontaktanalogen Anzeigesymbole erklärt werden.

Der Lerneffekt durch wiederholtes Erleben einer Fehlfunktion war bei den Übernahmekenngrößen vom kHUD unbeeinflusst. Im Erstkontakt mit einer Fehlfunktion haben in beiden Bedingungen ca. 20 % der Fahrer und in der zweiten Fehlfunktion immer noch 10–15 % der Fahrer eine Kollision verursacht. Bei den

Blickdaten während der Fehlfunktion war kein bedeutender Lerneffekt zu erkennen. In den längeren Betrachtungsintervallen der Normalfahrt lässt sich eine Verschiebung der Blickzuwendung als Lerneffekt erkennen. Nach dem Erleben der ersten Fehlfunktion wurde mehr in den linken Außenspiegel geblickt und weniger in den rechten Außenspiegel und Innenspiegel. Hier kann aufgrund des kHUD eine Optimierung der Spiegelblicke stattgefunden haben. Prozentual gesehen ist die Veränderung als gering einzustufen, die keine sicherheitsrelevanten Folgen hat. Einen sehr deutlichen Lerneffekt hat die Fehlfunktion auf die maximale Blickdauer. Hier ist nach der ersten Fehlfunktion in jedem AOI unabhängig von der Anzeige eine deutliche Verkürzung der Blickdauer zu erkennen. Besonders lange Blicke werden von den verunsicherten Fahrern verkürzt.

Der Lerneffekt, der durch die Übernahmezeiten in den Fehlfunktionen auftritt, spiegelt sich gut in den Ebenen des Handlungsmodells wider. Durch wiederholtes Erleben steigt die Effizienz in der Problemlösung (Kapitel 2.2), da Handlungsentscheidungen direkter und schneller ablaufen können (Kapitel 2.3).

In der **Versuchsreihe „Systemgrenze“** mit einem Zeitbudget von 4 und 6 Sekunden zeigte das kHUD keinen Einfluss auf die Beanspruchung, das Automationsvertrauen und das Kritikalitätsempfinden der Fahrer. Die Häufigkeit der erfolgreichen Übernahmen und das Absicherungsverhalten bei einem Fahrstreifenwechsel sind durch das kHUD unbeeinflusst, während sich bei einem geringeren Zeitbudget die Häufigkeit der erfolgreichen Übernahmen reduziert und die Absicherung des Fahrstreifenwechsels verschlechtert. Bei einem Zeitbudget von 6 Sekunden wurde MIT\_kHUD 460 ms schneller übernommen als OHNE\_kHUD. Eine Tendenz dazu lässt sich auch bei der TTCmin und dem Zeitpunkt der TTCmin vermuten. Für das Zeitbudget von 4 Sekunden hatte das kHUD keinen Einfluss auf die Übernahmezeit. Die laterale und die resultierende Beschleunigung blieben vom kHUD unbeeinflusst. Die Fahrer übernahmen MIT\_kHUD bei 6 Sekunden Zeitbudget früher, ohne die gewonnene Zeit in die Qualität des Fahrstreifenwechsels zu investieren.

Für die Zeitbudgets von 6 bzw. 4 Sekunden wurden die Betrachtungsintervalle von 3 bzw. 2 Sekunden beginnend ab der Übernahmeaufforderung gewählt. MIT\_kHUD wird länger in den zentralen Bereich vor dem Fahrzeug geblickt. Hier befinden sich die kontaktanalogen Navigationshinweise. Dafür wird kürzer auf das Richtungsschild und die Szenerie geblickt. Die Fahrer MIT\_kHUD ersetzen den Blick zum Richtungsschild fast ausschließlich durch den Blick auf die kontaktanalogen Navigationssymbole.

Das Betrachtungsintervall von 2 Sekunden war an das Zeitbudget von 4 Sekunden gekoppelt und hat sich als zu kurz erwiesen. Die Informationsaufnahme aus dem relevanten rechten Seitenspiegel war nach 2 Sekunden noch nicht abgeschlossen, obwohl die Fahrer in der Lage waren, bei kurzem Zeitbudget früher einzugreifen. Der Informationsaufnahmeprozess und der Handlungsprozess werden scheinbar parallelisiert. Die Fahrer sind damit bereit, ein höheres Risiko durch schlechtere Absicherung einzugehen. Solche Situationen werden von den Probanden kritischer eingestuft. Die Übergangszeiten sind vom kHUD unbeeinflusst.

Die Einordnung der Übernahmezeiten in die Matrix aus Handlungsmodell und Fahraufgaben (Kapitel 2.2) kann auf Handlungsebene als zutreffend eingestuft werden. Durch mehrere Übernahmesituationen waren die Probanden sehr geübt. Auf der Ebene der Fahraufgabe lassen sich die Übernahmezeiten nicht eindeutig auf Führungs- oder Navigationsebene verorten. Die Navigationsaufgabe war sehr wahrscheinlich durch das eindeutige Zielführungsschild zu leicht gehalten.

**Allgemein** kann bestätigt werden, dass das kHUD eine fokussierende Wirkung hat. Blickzuwendungen werden aus anderen teilweise unwichtigen AOs abgezogen. Die Veränderung des Blickverhaltens kann als geringfügig eingestuft werden und belegt, dass die Fahrer in der Blickzuwendung auf die unterschiedlichen AOs eine gewisse Flexibilität haben, ohne Auswirkung auf die Handlungszeiten oder Qualität der Manöverdurchführung zu zeigen. Schulterblicke werden in allen Bedingungen stark vernachlässigt. Fahrstreifenwechsel werden unabhängig vom kHUD gleich gut über Spiegelblicke abgesichert. Die Daten liefern keinen Hinweis auf eine Sicherheitsgefährdung durch das veränderte Blickverhalten bei einer automatisierten Fahrt MIT\_kHUD.

Unabhängig vom kHUD wird das Kombiinstrument in kritischen Situationen fast nicht beachtet. Erst nach der Situationsauflösung wurde der Systemstatus im Kombiinstrument abgefragt. Kombiinstrument und kHUD stehen bezüglich des Blickverhaltens nicht in Konkurrenz. Sie sind als sich ergänzende Anzeigeorte zu sehen. In Übernahmesituationen darf der Fahrer nicht durch aufmerksamkeitsbindende Anzeigen im Kombiinstrument abgelenkt werden. Andererseits darf der Anzeigebereich eines kHUD nicht mit Statusanzeigen überladen werden, da das Kombiinstrument in unkritischen Situationen von den Fahrern als Informationsgeber für Statusabfragen genutzt wird.

Das kHUD verkürzt die Übernahmezeiten an einer kontrollierten Systemgrenze mit einem Zeitbudget von 6 Sekunden. Hier wurden dem Fahrer handlungsempfehlende Navigationshilfen gegeben. Bei einem Zeitbudget von 4 Sekunden war kein Effekt mehr festzustellen. Vermutlich gibt es ein Zeitfenster, innerhalb dessen das kHUD einen nachweisbaren Vorteil bei der Übernahmezeit bringt (siehe Kapitel 7.3).

Unabhängig von der Art der Anzeige gilt für Übernahme-situationen beim automatisierten Fahren, dass Informationsaufnahmezeiten von unter 3 Sekunden wegen einer schlechten Absicherung bei Fahrstreifenwechsel unbedingt zu vermeiden sind (siehe Kapitel 6.3.2.2 und 6.3.3.1).

Auf die Daten und Methodik dieser Arbeit bezogen, kann die Aussage abgeleitet werden, dass ein kHUD nicht als Grundvoraussetzung an das automatisierte Fahren gebunden, sondern als wichtiger Bestandteil der Fahrzeugautomatisierung zu sehen ist.

### **7.3 Forschungsbedarf und Versuchseinschränkungen**

Die Übernahmezeit wird durch ein kHUD wahrscheinlich in Abhängigkeit vom Zeitbudget beeinflusst. Eventuell existiert ein begrenzter Zeithorizont, in dem der Vorteil einer schnelleren Übernahme messbar ist. Oberhalb des Zeitfensters könnte eine Komfortoptimierung des Fahrers und unterhalb des Zeitfensters könnte eine angepasste Risikobereitschaft des Fahrers den Einfluss des kHUD auf die Übernahmezeit überdecken. In der Theorie der Risikohomöostase strebt der Mensch sein persönliches Risikolevel an (Wilde, 1982), das nach der Zero-Risk-Theorie in jeder Situation möglichst gering sein soll (Näätänen & Summala, 1976). Ein Fahrer kann sich dem Risikolevel entweder von oben durch Aufgabenreduktion oder von unten durch riskantere Fahrweise annähern (Schlag & Weller, 2015). Bei dem knappen Zeitbudget von 4 Sekunden hatten die Fahrer nur die Möglichkeit, Handlungsabläufe zu parallelisieren und damit ein höheres Risiko durch mangelhafte Absicherung einzugehen. Es wäre sinnvoll, die Grenzen des Zeitbudgets innerhalb dessen ein kHUD die Übernahmezeit verkürzt, weiter zu erforschen.

In der Versuchsreihe „Systemgrenzen“ stand den Fahrern MIT\_kHUD ein kontaktanaloger Navigationshinweis und den Fahrern OHNE\_kHUD nur ein pfeilförmiges Richtungsschild mit dem Schriftzug „Ziel“ zur Verfügung. Das formcodierte Schild konnte – ohne den Schriftzug explizit lesen zu müssen – leicht und schnell erkannt werden. Damit war der Vorteil des kHUD geschmälert. Weiterführende



Versuche könnten rechteckige Autobahntafeln verwenden, die mehrere Zielorte aufführen. Für Fahrer OHNE\_kHUD wäre es eine realitätsnahe Erschwernis, ohne die formcodierte Richtungsangabe das richtige Ziel aus einer Auswahl an Destinationen herauszulesen. Solch ein Versuchsaufbau könnte einen deutlichen Zeitvorteil bei der Informationsaufnahme durch ein kHUD bedeuten.

Die Versuchsreihe „Systemgrenze“ zeigte, dass ein an das Zeitbudget gebundenes Betrachtungsintervall zur Blickanalyse nicht geeignet ist, den Informationsaufnahmeprozess abzudecken. Es muss geklärt werden, ob das Zeitintervall auf einen Absolutwert, wie z. B. 3 Sekunden, festgelegt wird oder für jeden Probanden individuelle Intervalle gewählt werden, die eventuell manöverabhängig sind. Eine Koppelung an die Übernahmezeit erscheint wenig sinnvoll, da sich Übernahmezeit und Informationsaufnahme zueinander verschieben können.

In der Versuchsreihe „Fehlfunktion“ wurde eine Fehlerkennung angewendet, bei der ein regelrelevantes Objekt von der Sensorik nicht detektiert wurde. Das kHUD würde bei einer Falscherkennung des vorausfahrenden Fahrzeugs durch seine ortskorrekte Darstellung deutliche von Vorteil sein, da die kontaktanaloge Markierung nicht verschwinden, sondern ein falsches Fahrzeug markieren würde. Der Fehler könnte vom Fahrer durch das Abweichen der kontaktanalogen Markierung schneller identifiziert werden und er kann zögerungsfrei eingreifen. Von diesem Szenario wurde in der Studie abgesehen, weil ein Beschleunigungsmanöver des Ego-Fahrzeugs kinästhetisch im Fahrsimulator nicht abzubilden ist.

Der Einfluss eines kHUD als wichtiger Bestandteil der Fahrzeugautomatisierung sollte in weiteren Versuchsreihen abgesichert werden. Außerdem sollte die in dieser Arbeit verwendete Auswertemethodik hinterfragt und ergänzt werden. Völlig unbeachtet war der Aspekt der hedonischen Qualität eines kHUD, die die Wertigkeit eines automatisierten Fahrzeugs steigern könnte.

Der Vorteil einer Fahrsimulatorstudie ist die exakte Reproduzierbarkeit und die Absicherung von kritischen Situationen mit Kollisionsgefahr. Nachteilig ist die fehlende kinästhetische Rückmeldung des Fahrzeugs, die dem Fahrer bei Realfahrten zusätzlich Information liefert. Beide Versuchsreihen dieser Arbeit versuchten, diesen Nachteil durch eine entsprechende Szenariowahl gering zu halten, wodurch die Anzahl der Testszenarien eingeschränkt wurde. Für Realfahrten kann vermutet werden, dass die visuelle Rückmeldung und damit die kontaktanaloge Anzeige etwas an Einfluss

verliert. Daher ist eine Beschränkung auf große Effekte des kHUD in Simulatorstudien wahrscheinlich ausreichend und Realfahrtversuche sind anzustreben.

Bezüglich der kontaktanalogen Anzeige in einem Fahrsimulator und einem Realfahrzeug kann es zu Problemen in der Vergleichbarkeit führen. Im Fahrsimulator wurde eine virtuelle Anzeige in einem virtuellen Umfeld eingespielt, wohingegen bei einem Realfahrtversuch eine virtuelle Anzeige in einem realen Umfeld eingespielt würde. Es besteht die Möglichkeit, dass in der Simulation der künstliche Charakter der Anzeige verloren geht und der Kontrast zwischen Anzeige und Umfeld stark abgeschwächt wird. Dieser Kontrast zwischen Anzeige und Umfeld wäre in der Realfahrt größer und könnte den Fahrer noch stärker auf das kHUD fokussieren als in den hier vorgestellten Versuchsreihen.

Diese Arbeit schließt mit der Empfehlung, das kontaktanaloge Head-Up Display für die Anwendung im Bereich des automatisierten Fahrens weiterhin zu beforschen.

## 8 Literaturverzeichnis

- Abendroth, B. & Bruder, R. (2015). Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3., überarbeitete und ergänzte Auflage, S. 3–15). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Baddeley, A. (2012). Working memory: theories, models, and controversies. *Annual review of psychology*, 63, 1–29.
- Bengler, K. & Flemisch, F. O. (2011). Von H-Mode zur kooperativen Fahrzeugführung: Grundlegende ergonomische Fragestellungen. In R. Bruder & H. Winner (Hrsg.), *Mensch + Fahrzeug. Zukunft der Fahrzeugführung kooperativ oder autonom?* (S. 69–76). Stuttgart: Ergonomia Verlag.
- Bergmeier, U. (2009, 26. Mai). *Kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem: Entwicklung und experimentelle Absicherung*. Dissertation, Technische Universität München. Garching
- Bernotat, R. (1970). Plenary Session: Operation Functions in Vehicle Control – Anthropotechnik in der Fahrzeugführung, *Ergonomics* (13 (3), S. 353–377). London: Taylor & Francis.
- Billings, C. E. (1997). *Aviation automation: The search for a human-centered approach* (Human factors in transportation). Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates Publishers. Verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0738/96020189-d.html>.
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer-Lehrbuch.
- Bruder, R., Franz, B., Kauer, M. & Schreiber, M. (2011). Fahrerverhalten bei einer kooperativen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. In R. Bruder & H. Winner (Hrsg.), *Mensch + Fahrzeug. Zukunft der Fahrzeugführung kooperativ oder autonom?* (S. 1–11). Stuttgart: Ergonomia Verlag.
- Bubb, H. (1975). *Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug*. Dissertation, Technische Universität München. München

- Bubb, H. (1992). *Menschliche Zuverlässigkeit: Definitionen Zusammenhänge Bewertung* (1. Auflage). Landsberg: ecomed-Fachverlag.
- Bubb, H. (1993). Systemergonomische Gestaltung. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Ergonomie* (3., neubearb. und erw. Aufl., S. 390–420). München: Carl Hanser Verlag.
- Bubb, H. (2015a). Der Mensch als Fahrer. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (1. Aufl., S. 67–162). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bubb, H. (2015b). Systemergonomie des Fahrzeugs. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (1. Aufl., S. 259–344). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Buld, S. & Krüger, H.-P. (2002). *Wirkung von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit* (EMPHASIS Abschlussbericht).
- Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.). (1993, 23. August). *Richtlinien für die Markierung von Straßen: Teil 1: Abmessungen und geometrische Anordnung von Markierungszeichen* (Nr. RMS-1).
- Continental AG. (2017). *Augmented-Reality HUD*. Zugriff am 21.07.2017. Verfügbar unter <https://www.continental-automotive.com/de-DE/Passenger-Cars/Interior/Display-Systems/Head-Up-Displays/Augmented-Reality-HUD>.
- Crundall, D. E. & Underwood, G. (1998). Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, 41 (4), 448–458.
- Damböck, D. (2013). *Automationseffekte im Fahrzeug – von der Reaktion zur Übernahme*. Dissertation, Technische Universität München. Garching
- Damböck, D., Farid, M., Tönert, L. & Bengler, K. (2012a). Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Autofahren. In TÜV SÜD Akademie GmbH (Hrsg.), *5. Tagung Fahrerassistenz. Schwerpunkt Vernetzung* (Bd. 5). München.
- Damböck, D., Weißgerber, T., Kienle, M. & Bengler, K. (2012b). Evaluation of a Contact Analog Head-Up Display for Highly Automated Driving. In AHFE (Hrsg.), *4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (S. 6011–6020)

- Donges, E. (1982). Aspekte der Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie* (27), 183–190.
- Donges, E. (2015). Fahrerhaltensmodelle. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3., überarbeitete und ergänzte Auflage, S. 17–26). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Dosch, M. J. (2013). *Entwicklung und Evaluation eines kontaktanalogen Head-Up-Displays für die kooperative Fahrzeugführung an Systemgrenzen*. Diplomarbeit, Technische Universität München. Garching
- Drummond, A. E. (1989). *An overview of novice driver performance issues: A literature review* (Report Nr. 9), Monash University Accident Research Centre, Victoria
- Endsley, M. R. & Kiris, E. O. (1995). The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. In W. C. Howell (Hrsg.), *Human Factors* (Bd. 37, 37 (2), S. 381–394)
- Färber, B. (1986). Abstandswahrnehmung und Bremsverhalten von Kraftfahrern im fließenden Verkehr. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 32 (1), 9–13.
- Flemisch, F. O., Adams, C. A., Conway, S. R., Goodrich, K. H., Palmer, M. T. & Schutte, P. C. (Dezember 2003). *The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction* (NASA Center for AeroSpace Information, Hrsg.) (NASA/TM - 2003-212672 Nr. 301-621-0390). Hanover, Maryland: NASA Langley Research Center, Hampton.
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident; analysis and prevention*, 37 (3), 461–472.
- Gasser, T. M. (2012). Ergebnisse der Projektgruppe Automatisierung: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. In TÜV SÜD Akademie GmbH (Hrsg.), *5. Tagung Fahrerassistenz. Schwerpunkt Vernetzung* (Bd. 5). München.
- Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Eier, J., Flemisch, F. et al. (2012). *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW (Berichte der BASt, Reihe Fahrzeugtechnik, Heft F 83).

- Gasser, T. M., Seeck, A. & Smith, B. W. (2015). Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3., überarbeitete und ergänzte Auflage, S. 27–54). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Gasser, T. M., Seeck, A. & Smith, B. W. (2016). Framework Conditions for the Development of Driver Assistance Systems. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbook of Driver Assistance Systems. Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort* (S. 35–68). Switzerland: Springer.
- Gasser, T. M. & Westhoff, D. (2012, Juli). *BASt-study: Definitions of Automation and Legal Issues in Germany*. Road Vehicle Automation Workshop.
- Geiser, G. (1985). Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, 87 (2), 77–84.
- Geyer, S., Baltzer, M., Franz, B., Hakuli, S., Kauer, M., Kienle, M. et al. (2014). Concept and development of a unified ontology for generating test and use-case catalogues for assisted and automated vehicle guidance. *IET Intelligent Transport Systems*, volume 8 (issue 3), 183–189.
- Gish, K. W. & Staplin, L. (1995). *Human Factors Aspects of Using Head Up Displays in Automobiles: A Review of the Literature* (Report No. DOT HS 808 320). Washington D.C.: National Highway Traffic Safety Administration; U.S. Department of Transportation.
- Gold, C. (2016). *Modeling of Take-Over Performance in Highly Automated Vehicle Guidance*. Dissertation, Technische Universität München. Garching
- Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L. & Bengler, K. (2013). "Take over!": How long does it take to get the driver back into the loop?, In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*.
- Gregersen, N. P. (1994). Systematic cooperation between driving schools and parents in driver education, an experiment. *Accident Analysis & Prevention*, 26 (4), 453–461.

- Hale, A. R., Stoop, J. & Hommels, J. (1990). Human error models as predictors of accident scenarios for designers in road transport systems. *Ergonomics*, 33, 1377–1387.
- Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Hrsg.), *Human Mental Workload* (Advances in Psychology, Bd. 52, S. 139–183). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- HAVEit. (2011). *Highly automated vehicles for intelligent transport: Deliverable D61.1 Final Report* (Continental Automotive GmbH, Hrsg.).
- IHRA Working Group on ITS. (2010, 22. November). *Design Principles for Advanced Driver Assistance Systems: Keeping Drivers In-the-Loop* (Informal document Nr. ITS-19-07). : International Harmonized Research Activities (IHRA).
- Israel, B. (2012). *Potenziale eines kontaktanalogen Head-up Displays für den Serieneinsatz*. Dissertation, Technische Universität München. Garching
- Kienle, M., Damböck, D., Bubb, H. & Bengler, K. (2012). The ergonomic value of a bidirectional haptic interface when driving a highly automated vehicle. *Cognition, Technology & Work*.
- Kienle, M., Damböck, D., Kelsch, J., Flemisch, F. O. & Bengler, K. (2009). *Towards an H-Mode for Highly Automated Vehicles: Driving with Side Sticks*. AutomotiveUI'09, Essen.
- Lange, C. (2008). *Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*. Dissertation, Technische Universität München. Garching
- Lee, J. D. & See, K. A. (2004). Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 46 (1), 50–80.
- Lorenz, L., Kerschbaum, P. & Schumann, J. (2014). Designing take over scenarios for automated driving: How does augmented reality support the driver to get back into the loop? *Human Factors and Ergonomics Society*, 58 (1), 1681–1685.

- Mayhew, D. R. & Simpson, H. M. (1996). *Effectiveness and role of driver education and training in a graduated licensing system*. Zugriff am 02.05.2017. Verfügbar unter <http://www.drivers.com/article/305/>.
- Michon, J.A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In L. Evans & R. C. Schwing (Hrsg.), *Human behavior and traffic safety* (S. 485–520). New York: Plenum Press.
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, E77 (12), 1321–1329.
- Müller-Limmroth, W. (1993). 1.4 Nervensystem. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Ergonomie* (3., neubearb. und erw. Aufl., S. 47–57). München: Carl Hanser Verlag.
- Näätänen, R. & Summala, H. (1976). *Road-user behavior and traffic accidents*. Amsterdam, New York: North-Holland Pub. Co; American Elsevier Pub. Co.
- NHTSA. (2013). *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles* (National Highway Traffic Safety Administration, Hrsg.). Verfügbar unter [https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/automated\\_vehicles\\_policy.pdf](https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/automated_vehicles_policy.pdf).
- Pfannmüller, L. (2017). *Anzeigekonzepte für ein kontaktanaloges Head-up Display*. Dissertation, Technische Universität München. Garching
- Ranney, T. A. (1994). Models of driving behavior: A review of their evolution. *Accident Analysis & Prevention*, 26 (6), 733–750.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules and Knowledge: Signals, Signs and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-13 (3), 257–266.
- Reichart, G. & Haller, R. (1995). Mehr aktive Sicherheit durch neue Systeme für Fahrzeug und Straßenverkehr. In W. Fastenmeier (Hrsg.), *Autofahrer und Verkehrssituation. Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme* (S. 199–215). Köln: Verlag TÜV Rheinland.
- ISO/TS, 15007-2 (2001, 15. Dezember). *Road vehicles – Measurement of driver visual behaviour with respect to transport information and control systems – Part 2: Equipment and procedures*.



- SAE International. (2014). *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems* (Surface Vehicle Information Report Nr. J3016).
- Sarter, N. B. & Woods, D. D. (1995). How in the World Did We Ever Get into That Mode?: Mode Error and Awareness in Supervisory Control. In W. C. Howell (Hrsg.), *Human Factors* (Bd. 37, Jg. 37(1), S. 5–19)
- Schablitzki, L. (2015). *Versuchsaufbau und -vorbereitung zum teilautomatisierten Fahren mit kontaktanalogem Head-Up Display*. Bachelorarbeit, Technische Universität München. Garching
- Schlag, B. & Weller, G. (2015). Verhaltenswissenschaftliche Aspekte von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3., überarbeitete und ergänzte Auflage, S. 71–83). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schmidtke, H. (1993). Wachsamkeitsprobleme. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Ergonomie* (3., Neubearb. und erw. Aufl., S. 160–170). München: Carl Hanser Verlag.
- Schneid, M. (2008, 01. Juli). *Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-Up-Displays im Fahrzeug*. Dissertation, Technische Universität München. Garching
- Weißgerber, T. (2011). *Erprobung einer kontaktanalogen Anzeige für Fahrerassistenzsysteme beim hochautomatisierten Fahren*. Diplomarbeit, Technische Universität München. Garching
- Weißgerber, T. & Bengler, K. (2017). Kontaktanaloges Head-Up Display bei Fehlfunktion einer Fahrzeugautomation. *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*, 94–103.
- Weißgerber, T., Damböck, D., Kienle, M. & Bengler, K. (2012a). Auswirkung einer kontaktanalogen Anzeige auf die Querführung hochautomatisierter Fahrzeuge. In VDI-Verlag (Hrsg.), *28. VDI/VW-Gemeinschaftstagung* (S. 75–86)
- Weißgerber, T., Damböck, D., Kienle, M. & Bengler, K. (2012b). Erprobung einer kontaktanalogen Anzeige für Fahrerassistenzsysteme beim hochautomatisierten

- Fahren. In TÜV SÜD Akademie GmbH (Hrsg.), *5. Tagung Fahrerassistenz. Schwerpunkt Vernetzung* (Bd. 5). München.
- Wickens, C. D. & Hollands, J. G. (2000). *Engineering psychology and human performance* (3. Aufl.). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
- Wickens, C. D. & McCarley, J. S. (2008). *Applied attention theory*. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- Wilde, G. J. S. (1982). The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health, *Risk Analysis* (Bd. 2, S. 209)
- Willmes-Lenz, G. (2002). Internationale Erfahrungen mit neuen Ansätzen zur Absenkung des Unfallrisikos junger Fahrer und Fahranfänger. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Mensch und Sicherheit* (Heft M 144).
- Winner, H. (2012, 16. Mai). *Formcodierung der gestrichelten Trajektorie durch eine Kette von Dreiecken* (mündlich).
- Winner, H. (2015). Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3., überarbeitete und ergänzte Auflage, S. 893–912). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Young, M. S. & Stanton, N. A. (2007, 15. Januar). Back to the future: Brake reaction times for manual and automated vehicles. *Ergonomics*, 50 (1), 46–58.