

Studie

# Standardisierungsvorhaben

Sicherheitsanforderungen für  
Steer-by-Wire-Lenksysteme



Die beigefügte wissenschaftliche Studie wurde als Grundlage für einen künftigen DIN-Standard durch den vom VDA getragenen DIN-Arbeitskreises NA 052-00-33-18 AK „Sicherheitsanforderungen an ein Steer-by-Wire Lenksystem“ beim fka beauftragt.

Die folgenden Unternehmen und Organisationen haben sich an der Finanzierung der Erarbeitung dieser Studie beteiligt:



AUDI AG



BMW AG

Bosch  
Automotive Steering GmbH

Ford-Werke GmbH



HELLA GmbH &amp; Co. KGaA



JTEKT Europe

HL Mando Corporation  
Europe GmbH

Mercedes-Benz AG



Nexteer Automotive Germany GmbH



Schaeffler Technologies AG &amp; Co. KG



thyssenkrupp

ThyssenKrupp Presta AG

Volkswagen AG  
PKW

Volkswagen Group Components

ZF Automotive  
Germany GmbH

**Durchführung von  
Probandenstudien für den  
DIN-AK NA 052-00-33-18 AK**

**Bericht 217750**

fka GmbH – Fahrwerk & NVH

ika, RWTH Aachen University – Verkehrspsychologie & Akzeptanz

## **Abschlussbericht**

# Durchführung von Probandenstudien für den DIN-AK NA 052-00-33-18 AK

Projektnummer

217750

### **Auftraggeber**

DIN-Arbeitskreis NA 052-00-33-18 AK

„Sicherheitsanforderungen an ein Steer-by-Wire Lenksystem“

#### **Projektbearbeiter\*in:**

Lotte Saupp M.Sc.

Julia Pelzer M.Sc.

Dipl.-Ing. Jörn Lützwow

Dipl.-Ing. Tobias Sandmann

Anna-Lena Köhler M.Sc.

#### **Projektleiter\*in:**

Dr.-Ing. Daniel Wegener

Dr. phil. Stefan Ladwig

Dr.-Ing. Daniel Wegener

Head of Chassis & NVH

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced and/or published without the previous written consent of fka GmbH.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein

Vorsitzender des Beirates

Dr.-Ing. Jens Kotte

Managing Director

Aachen, November 2022

**Inhalt**

1	Einleitung und Zielsetzung.....	4
2	Methodisches Vorgehen.....	7
2.1	Studiendesign – Einzelstudien.....	7
2.2	Fehlerbilder.....	9
2.3	Manöver, Fahraufgabe und Parcours.....	10
2.4	Messgrößen.....	13
2.4.1	Spurabweichung.....	13
2.4.2	Objektive Messgrößen.....	14
2.4.3	Subjektive Messgrößen.....	17
2.5	Studienablauf.....	19
2.6	Auswahlkriterien für die Stichprobe.....	22
2.7	Definition valider Datensätze.....	23
3	Ergebnisse.....	26
3.1	Studie 1.....	26
3.1.1	Stichprobe.....	26
3.1.2	Ergebnisse.....	26
3.1.3	Zusammenfassung Studie 1.....	46
3.2	Studie 2.....	47
3.2.1	Stichprobe.....	47
3.2.2	Ergebnisse.....	47
3.2.3	Zusammenfassung Studie 2.....	65
3.3	Studie 3.....	66
3.3.1	Stichprobe.....	66
3.3.2	Ergebnisse.....	66
3.3.3	Zusammenfassung Studie 3.....	84
3.4	Studie 4.....	85
3.4.1	Stichprobe.....	85
3.4.2	Ergebnisse.....	85

---

3.4.3	Zusammenfassung Studie 4.....	103
3.5	Studie 5 .....	104
3.5.1	Stichprobe.....	104
3.5.2	Ergebnisse.....	104
3.5.3	Zusammenfassung Studie 5.....	123
3.6	Studie 6 .....	124
3.6.1	Stichprobe.....	124
3.6.2	Ergebnisse.....	124
3.6.3	Zusammenfassung Studie 6.....	144
4	Diskussion .....	146
5	Literaturverzeichnis .....	154
6	Anhang.....	156
6.1	Vorbefragung.....	157
6.2	Zwischenbefragung – Befragungszeitpunkte 1 & 3 .....	160
6.3	Zwischenbefragung – Befragungszeitpunkte 2 & 4 .....	162
6.4	Nachbefragung .....	165
6.5	Darstellung Spurverlassen – Limousine (FBA Sprung) .....	167
6.6	Darstellung Spurverlassen – SUV 2 (RWA Rechteckschwingung).....	168

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Die Technologie des Steer-by-Wire eröffnet neue Möglichkeiten, die Interaktion zwischen Fahrerenden und Fahrzeug neu zu gestalten. Dies ermöglicht die Entwicklung neuer Fahrfunktionen im Kontext des teilautomatisierten bis hin zum vollautomatisierten Fahren. So wird es zukünftig beispielsweise vermehrt einen Wechsel zwischen (teil)automatisierten und manuellen Fahrabschnitten geben, sodass innovative Lenkkonzepte an Bedeutung gewinnen, die den Fahrenden während der (teil)automatisierten Fahrt mehr Freiraum gewähren und dabei eine intuitive Handhabung gewährleisten.

Gegenüber der konventionellen mechanischen Lenkung sind bei einem Steer-by-Wire System neue sicherheitsrelevante Aspekte zu betrachten. So muss ein solches System so ausgelegt sein, dass ein *Fail-Operational* Betrieb gewährleistet ist. Im Kern geht es um das Auftreten spezifizierter Fehlerbilder, die durch geeignete Fallback-Strategien zu adressieren sind. Hierbei muss zwischen dem Fehler auf der Komponentenebene und den Auswirkungen auf der System- und Gesamtfahrzeugebene unterschieden werden, welche durch den Fahrenden beherrscht werden müssen (controlability). Beispielhaft kann ein auf Komponentenebene entstandener Fehler auf Systemebene zu einem veränderten Radlenkwinkel führen, der in Abhängigkeit des Fahrer-Fahrzeugverhaltens zu einer Gesamtfahrzeugreaktion führt. Ein Sicherheitskriterium bezüglich der Gesamtfahrzeugreaktion kann z.B. die Spurabweichung in einer bestimmten Fahrsituation sein.

Die Menge an möglichen Einflussfaktoren, die sich in vielfältigen Fahrszenarien auswirken könnten, steht jedoch einer holistischen Durchführung von Kontrollierbarkeitsstudien mit Normalfahrenden entgegen. So wird die Systemauslegung klassischer Weise durch Experten im Mehraugenprinzip erarbeitet, welche den Aspekt der Kontrollierbarkeit praxisorientiert approximieren und final ein entsprechendes Automotive Safety Integrity Level (ASIL, ISO 26262) festlegen. Kontrollierbarkeit wird dort standardmäßig gemäß ISO 26262 durch den Parameter C charakterisiert, in Stufen von C0 – C3. Dabei steht C0 für „Sichere Beherrschung“, C1 für „Einfache Beherrschbarkeit“, C2 für „Normale Beherrschbarkeit“ und C3 für „Schwierige Beherrschbarkeit“. Des Weiteren ist C0 durch den Zusatz „Alle Fahrerenden beherrschen die Situation“ definiert. Die entsprechenden Definitionen aller Level sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1

*Level der Beherrschbarkeit nach ISO 26262*

Klasse	C0	C1	C2	C3
Beschreibung	Sichere Beherrschung	Einfache Beherrschbarkeit	Normale Beherrschbarkeit	Schwere Beherrschbarkeit
Definition	Alle Fahrenden beherrschen diese Situation.	Mehr als 99% der Fahrenden können die Situation beherrschen.	Mehr als 90% der Fahrenden können die Situation beherrschen.	Weniger als 90% der Fahrenden beherrschen die Situation.

Die Klassifikation in vier Level von C0 – C3 gemäß ASIL deckt sich in großen Teilen mit einer komplementären Klassifikationsform, dem Response 3 – Code of Practice (Brockmann, 2009). Hierbei handelt es sich um ein breit akzeptiertes Rahmenwerk, das sich ebenfalls mit der Einschätzung der Wahrscheinlichkeit befasst, dass Fahrer\*innen nicht in der Lage sind, ein anspruchsvolles Ereignis zu kontrollieren und sich damit außer Kontrolle zu geben, Verletzungen oder Beschädigungen zu vermeiden. Auch hier stellt C0 das niedrigste Level mit dem Label „Generell kontrollierbar“ dar.

Die expertenbasierte Herangehensweise umfasst auch hochdynamische Fahrsituationen, die Auswirkungen einer etwaigen Systemfehlersituation angemessen darstellen. Die Beurteilung der Kontrollierbarkeit durch Normalfahrer\*innen in den entsprechenden Situationen wird dabei durch Experten unter Verwendung der oben beschriebenen Level vorgenommen. Hier stellt sich aus wissenschaftlicher Sicht die Frage, inwiefern eine durch Expertenurteile parametrisierte Systemfehlerauswirkung mit Blick auf die Übertragbarkeit auf Normalfahrer\*innen an empirischer Gültigkeit gewinnen kann.

Neben der nachzuweisenden, durch Experten festgelegten Parametrisierung der Fehlerintensität in Antizipation der Kontrollierbarkeit durchschnittlicher Fahrer\*innen kommt auch den Human-Faktoren wie Akzeptanz, Vertrauen und subjektiv empfundene sowie objektiv beobachtete Kontrollierbarkeit hinsichtlich des Übergangs von einem potentiellen Systemfehler in einen degradierten Systemzustand eine besondere Bedeutung zu. Zwar gibt es nach bestem Wissen und Gewissen der Autor\*innen keine öffentlich zugänglichen und gleichzeitig belastbaren Untersuchungen zu entsprechend gelagerten Studien, die hier präzise Hinweise geben könnten. Jedoch ist aus der Literatur bekannt, dass die psychologischen Konstrukte Akzeptanz und Vertrauen im Zuge der Interaktion des Menschen mit Systemen systematisch mit der subjektiv empfundenen Systemreliabilität variieren (Numan, 1998; Chavaillaz et al., 2016). Weiter gilt der Zusammenhang von Akzeptanz und Vertrauen auf der einen Seite und Systemverhalten auf der anderen Seite in mannigfaltigen Bereichen des automobilen Sektors als sehr gut untersucht, insbesondere wenn es um empirische Studien im Themenkomplex automatisiertes Fahren geht (vgl. exemplarisch Numan, 1998; Pavlou, 2003; Ghazizadeh et al. 2012b; Hegener et al. 2019). Hegener et al. (2019) untersuchten u.a. den Zusammenhang zwischen Technologie-Vertrauen und der Intention, automatisierten Fahrzeugen die Kontrolle vertrauensvoll zu übergeben. Die Ergebnisse zeigen, dass Vertrauen in Technologie und etwaige Bedenken, die Kontrolle an ein automatisiertes Fahrzeug zu übergeben, hoch korrelieren. Da ein etwaig wahrnehmbarer Fehler im Lenksystem eines Fahrzeugs einen objektiven Aspekt des (kurzzeitigen) Kontrollverlusts darstellen kann, scheint ein entsprechender Zusammenhang mit dem Konstrukt erwartbar.

Somit lässt sich aus wissenschaftlicher Sicht eine zweite Frage ableiten, die einen Zusammenhang der durch Expertenurteile parametrisierten Systemfehlerausprägung und den subjektiven Konstrukten Akzeptanz sowie Vertrauen von Normalfahrer\*innen adressiert.



Um die oben umrissenen Fragen systematisch zu untersuchen, widmet sich das vorliegende Projekt der Durchführung von  $N = 6$  Einzelstudien zur Untersuchung der Kontrollierbarkeit und Akzeptanz eines durch Experten parametrisierten Steer-by-Wire Systems bei Auftreten spezifizierter Fehlerbilder und der daraus abgeleiteten Fallback-Strategien. Den  $N = 6$  Einzelstudien liegt die folgende, gemeinsame Hypothese zu Grunde:

„Ein durch Experten festgelegtes C0-Level hinsichtlich einer Fehlerausprägung in einem Steer-by-Wire Lenksystem führt bei Normalfahrenden in vordefinierten Fahrmanövern nicht zu Fahrerverhalten, dass das Verlassen eines durch den Experten vorgegebenen Fahrkorridors innerhalb eines definierten Zeitabschnittes ab Fehleraufschaltung beinhaltet.“

Die Überprüfung dieser Hypothese ist Grundlage der vorliegenden Versuchsreihe. Für diese legte der Arbeitskreis die Auswahl der Fahrzeuge, Manöver und Fehlerbilder fest und teilte diese den Autor\*innen des vorliegenden Berichts mit. Im Anschluss wurde ein entsprechendes Studiendesign in enger Kooperation mit dem Arbeitskreis Steer-by-Wire ausgearbeitet. Die Methodik soll im Folgenden ausführlich vorgestellt werden.

## 2 Methodisches Vorgehen

Das zur Prüfung der in Abschnitt 1 aufgestellten Forschungshypothese entwickelte methodische Vorgehen steht im Fokus des folgenden Abschnittes. Insgesamt teilt die gewählte Methodik das Forschungsvorhaben in sechs einzelne Studien auf, die im Zeitraum vom 28.03.2022 bis zum 20.05.2022 auf der Fahrdynamikfläche des Aldenhoven Testing Centers durchgeführt wurden. Pro Einzelstudie wurde ein Fahrzeug, gestellt von jeweils einem der beteiligten Unternehmen des Arbeitskreises, mit zwei verschiedenen Fehlerarten untersucht. Die Hypothesenprüfung erfolgte einzeln für jede Fahrzeug-Fehler-Kombination, sodass die Prüfung in insgesamt 12 Fällen vorgenommen wurde. Die Herleitung der gewählten Methodik sowie der detaillierte Aufbau und Ablauf der Studien werden im Folgenden erläutert.

### 2.1 Studiendesign – Einzelstudien

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Kontrollierbarkeit sowie die fahrerseitige Reaktion auf verschiedene Fehler in einem Steer-by-Wire Lenksystem zu untersuchen. Mit Hilfe der erhobenen Daten sollte die in Abschnitt 1 aufgestellte Hypothese, dass ein durch Experten festgelegtes C0-Level bei Normalfahrenden in vordefinierten Fahrmanövern nicht zu Fahrerverhalten führt, dass das Verlassen eines durch den Experten vorgegebenen Fahrkorridors innerhalb eines definierten Zeitabschnittes nach Fehleraufschaltung beinhaltet, geprüft werden. Wie aus der Hypothese hervorgeht, werden sowohl die zu untersuchenden Fehlerbilder als auch die zugehörigen Fahrmanöver durch die Experten des Arbeitskreises vorgegeben. Diese Vorgabe umfasste insgesamt sechs Fehlerbilder, drei Fehler des *Feedback-Actuators (FBA)* sowie drei Fehler des *Roadwheel-Actuators (RWA)*, deren Kontrollierbarkeit im Rahmen der Studie zu untersuchen war. Für die Aufschaltung wurde für jedes Fehlerbild durch den Arbeitskreis eins von drei möglichen Fahrmanövern (Geradeausfahrt, Kreisfahrt, Slalom) ausgewählt. Die einzelnen Fehlerbilder sowie ihre Kombination mit den gewählten Fahrmanövern werden in den Abschnitten 2.2 und 2.3 detailliert erläutert.

Die systematische Untersuchung der sechs Fehlerbilder als unabhängige Variable erforderte die Entwicklung eines Versuchsdesigns, welches mehrere Aspekte beachtet. Zunächst erschien die Präsentation multipler Fehlerereignisse in einer Testfahrt pro Versuchsperson nicht sinnvoll. Grund dafür ist die Notwendigkeit des Überraschungsmoments zur validen Messung der initialen Reaktion der Fahrenden auf ein Fehlerereignis. Mit der Präsentation mehrerer Fehlerbilder war davon auszugehen, dass die Versuchspersonen eine Erwartungshaltung im Versuchsverlauf entwickeln und somit möglicherweise vorgespannt und anders auf eine Fehleraufschaltung reagieren, als sie dies in einer unvorbereiteten Situation tun würden. Damit einhergehend ist mit einem starken Reihenfolgeeffekt zu rechnen, der zusätzlich Einfluss auf die Ergebnisse nehmen kann. Um dieses Problem zu umgehen und dennoch dem Aspekt der Testökonomie Rechnung zu tragen, wurden jeweils zwei Fehlerbilder kombiniert, die pro Versuchsperson in randomisierter Reihenfolge getestet wurden. Diese Kombination der Fehlerbilder wurde ebenfalls durch die Experten des Arbeitskreises vorgenommen. Dabei wurde darauf geachtet, jeweils einen RWA- und einen FBA-Fehler

miteinander zu kombinieren, die in ihrer spürbaren Auswirkung auf den Fahrenden voneinander unterschiedlich sind sowie in unterschiedlichen Fahrmanövern aufgeschaltet werden. Somit ergaben sich für das Versuchsdesign sowohl Innersubjektfaktoren, da eine Versuchsperson zwei Fehler innerhalb einer Testfahrt erlebte, als auch Zwischensubjektfaktoren, da die insgesamt drei FBA-/RWA-Fehler-Kombinationen auf verschiedene Gruppen von Versuchspersonen aufgeteilt wurden.

Neben dem Faktor der unterschiedlichen Fehlerbilder spielt auch die Abstimmung der Parametrierung auf das betroffene Fahrzeug eine entscheidende Rolle für die Spürbarkeit der Fehleraufschaltung. Um diesen Faktor in der Studie zu berücksichtigen, wurden insgesamt sechs verschiedene Fahrzeuge aus den teilnehmenden Häusern des Arbeitskreises in das Versuchsdesign aufgenommen und mit den Fehlerpaaren kombiniert. Dabei wurde diese Kombination so vorgenommen, dass jedes Fehlerpaar in zwei Fahrzeugen unterschiedlicher Fahrzeugklassen (SUV, Kompaktklasse, Limousine) untersucht wurde. Nachfolgend werden diese als SUV 1, SUV 2, Kompakt 1, Kompakt 2, Kompakt 3 und Limousine bezeichnet. Die Parametrierungen der Fehler wurden im Vorfeld der Studiendurchführung durch die Experten des jeweiligen Hauses vorgenommen. Die Kombination der genannten Faktoren – Fehlerbilder mit zugehörigen Fahrmanövern sowie ausgewählte Fahrzeuge – wurde zu dem übergeordneten Versuchsdesign zusammengefasst, welches in Abbildung 1 dargestellt ist.

Abbildung 1

*Übergeordnetes Versuchsdesign*

Fahrzeugklasse	Fehlerbild A	Fehlerbild B	Fehlerbild A	Fehlerbild B	Fehlerbild A	Fehlerbild B
	– Manöver –	– Manöver –	– Manöver –	– Manöver –	– Manöver –	– Manöver –
	Geblockter FBA	Rechteckschwingung RWA	FBA Sprung	Ungeregelter RWA	FBA Selfsteer + Loss of Feedback	Geblockter RWA
	– Slalom –	– Geradeaus –	– Slalom –	– Kreis –	– Kreis –	– Slalom –
SUV 1						<i>n</i> = 28
Kompakt 1						<i>n</i> = 28
Kompakt 2				<i>n</i> = 28		
Limousine				<i>n</i> = 28		
Kompakt 3		<i>n</i> = 28				
SUV 2		<i>n</i> = 28				

Wie Abbildung 1 zu entnehmen ist, entstehen im Rahmen des Versuchsdesigns sechs Einzelstudien, die jeweils zwei Kombinationen aus Fahrzeug, Fehlerbild und Fahrmanöver untersuchen. Die aufgestellte Forschungshypothese wird im Verlauf der Datenauswertung für jede dieser insgesamt zwölf Kombinationen einzeln getestet. Das Kriterium, nach dem über die Annahme der Hypothese entschieden wird, wurde in Anlehnung an Brockmann (2009) gewählt. Eine Hypothese wird nach Brockmann dann beibehalten, wenn 100% der Versuchspersonen in der Lage waren, das Fahrzeug weiterhin zu kontrollieren und die durch das Manöver vorgegebene Fahrspur nach Fehleraufschaltung nicht zu verlassen. Dabei müssen diese 100% mindestens *n* = 20 Versuchspersonen umfassen, deren Datensätze nach a priori festgelegten Kriterien (siehe Abschnitt 2.7) als valide angesehen werden. Sobald

eine Versuchsperson die Fahrspur in Folge des Fehlers verlässt, wird die Hypothese abgelehnt. Um sicherzustellen, dass die Minimalanzahl von 20 validen Datensätzen in jeder Einzelstudie erreicht wird und eventuelle Verluste durch Ausfälle, Nichterscheinen und kriterienbasierten Ausschluss von Datensätzen ausgeglichen werden können, wurden jeweils  $n = 28$  Versuchspersonen zu den Testungen eingeladen. Der Gesamtumfang der geplanten Stichprobe aller sechs Einzelstudien betrug somit  $N = 168$  Versuchspersonen.

## 2.2 Fehlerbilder

Die in den Studien verwendeten Steer-by-Wire-Fehlerbilder, die hinsichtlich ihrer Kontrollierbarkeit sowie der fahrerseitigen Reaktion untersucht wurden, wurden in Art und Parametrierung durch die Experten im Arbeitskreis festgelegt. Insgesamt wurden sechs verschiedene Fehlertypen, darunter drei Fehler des *Feedback-Actuator* (FBA-Fehler) und drei Fehler des *Road-Wheel-Actuator* (RWA-Fehler), in die Studie aufgenommen. Zudem erfolgte vor der Testung in der Probandenstudie eine gemeinsame Abstimmung der Parametrierung der Fehlerbilder für das spezifische Fahrzeug im Zusammenschluss mehrerer Experten nach dem Mehraugenprinzip. Die einzelnen Fehlerbilder für die FBA- und RWA-Fehler sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 beschrieben.

Tabelle 2

### FBA-Fehlerbilder

Fehlerbild (Fahrmanöver)	Fahrzeug	Beschreibung Fehlerbild
Geblockter FBA (Slalom 60 km/h)	Kompakt 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Blockieren des FBA in der aktuellen Winkellage</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: -15° FBA-Lenkwinkel (Lenken nach rechts)</li> <li>▪ Aufschaltdauer: 100 ms</li> </ul>
	SUV 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Blockieren des FBA in der aktuellen Winkellage (Halten des Lenkwinkels mit 25 Nm)</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: 5° FBA-Lenkwinkel (Lenken nach links)</li> <li>▪ Aufschaltdauer: 200 ms</li> </ul>
FBA Sprung (Slalom 60 km/h)	Kompakt 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Momentensprung am FBA (Reduzierung des aktuellen Lenkmoments am FBA um 1,5 Nm)</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: 0° FBA-Lenkwinkel (beim Umlenken von rechts nach links, 2 Pylone)</li> <li>▪ Aufschaltdauer: bis Fahrzeugstillstand (manuelle Abschaltung)</li> </ul>
	Limousine	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Momentensprung am FBA (Erhöhung des aktuellen Lenkmoments am FBA um 2,2 Nm)</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: 3 Pylone (Linkskurve)</li> <li>▪ Aufschaltdauer: 10 s</li> </ul>
FBA Selfsteer + Loss of Feedback (Kreisfahrt 50 km/h)	SUV 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Momentensprung am FBA (23,5 Nm für 10 ms) und anschließende Dämpfung</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: manuell bei definierter Pylone</li> <li>▪ Aufschaltdauer: Momentensprung 10 ms, Dämpfung bis Stillstand</li> </ul>
	Kompakt 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Momentensprung am FBA (6-8 Nm für 20 ms) und anschließende Dämpfung (0,01 Nm/deg/s)</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: manuell bei definierter Pylone</li> <li>▪ Aufschaltdauer: Momentensprung 20 ms, Dämpfung bis Stillstand</li> </ul>

Tabelle 3  
RWA-Fehlerbilder

Fehlerbild (Fahrmanöver)	Fahrzeug	Beschreibung Fehlerbild
RWA Rechteckschwingung (Geradeausfahrt 80 km/h)	Kompakt 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Selbstlenken des RWA (Rechtecksinus, 3 Perioden a 700 ms)</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: manuell während Geradeausfahrt</li> <li>▪ Aufschaltdauer: 2100 ms</li> </ul>
	SUV 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Selbstlenken des RWA (Rechtecksinus, 3 Perioden a 700 ms)</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: manuell während Geradeausfahrt</li> <li>▪ Aufschaltdauer: 2100 ms</li> </ul>
Ungeregelter RWA (Kreisfahrt 50 km/h)	Kompakt 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Momentensprung auf 0 Nm RWA-Moment (RWA-Lenkwinkel frei)</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: manuell bei definierter Pylone</li> <li>▪ Aufschaltdauer: 150 ms</li> </ul>
	Limousine	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Momentensprung auf 0 Nm RWA-Moment (RWA-Lenkwinkel frei)</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: manuell bei definierter Pylone</li> <li>▪ Aufschaltdauer: 150 ms</li> </ul>
Geblockter RWA (Slalom 60 km/h)	SUV 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Blockieren des RWA in der aktuellen Winkellage</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: 20° FBA-Lenkwinkel (Lenken nach links)</li> <li>▪ Aufschaltdauer: 200 ms</li> </ul>
	Kompakt 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Blockieren des RWA in der aktuellen Winkellage</li> <li>▪ Aufschaltzeitpunkt: 15° FBA-Lenkwinkel (Lenken nach links)</li> <li>▪ Aufschaltdauer: 150 ms</li> </ul>

### 2.3 Manöver, Fahraufgabe und Parcours

Die Fahrmanöver, in denen die ausgewählten Fehlerbilder aufgeschaltet wurden, wurden im Vorfeld der Studie durch den Arbeitskreis definiert. Ausgewählt wurden drei für die jeweiligen Fehlerbilder relevante Fahrmanöver:

- eine stationäre Geradeausfahrt mit 80 km/h;
- eine stationäre Kreisfahrt mit 50 km/h sowie
- ein 36 m Slalom mit 50 km/h.

Abgesteckt wurden die Manöver mit Hilfe von Pylonen auf einem abgesperrten Teststreckengelände (siehe Abbildung 3). Zudem wurde jedem Fahrmanöver eine spezifische Richtgeschwindigkeit zugeordnet, die über die gesamte Länge des abgesteckten Manövers konstant gehalten werden sollte. Hierbei galt als Leitkriterium, eine Richtgeschwindigkeit zu wählen, die für Alltagsfahrende in den jeweiligen Manövern unter angemessenem Aufwand leistbar ist. Jedes der sechs in Abschnitt 2.2 beschriebenen Fehlerbilder wurde durch den Arbeitskreis mit einem dieser drei Manöver kombiniert, während dessen Durchfahrt der Fehler aufgeschaltet werden sollte. Die resultierenden Kombinationen (Fehler, Richtgeschwindigkeit, Manöver) wurden so gewählt, dass das Auftreten eines Fehlers eine für die Fahrenden spürbare Auswirkung auslöst.

Die Geradeausfahrt wurde für die Aufschaltung des Fehlers *RWA-Rechteckschwingung* ausgewählt. Realisiert wurde das Manöver durch eine gerade Gasse, die eine

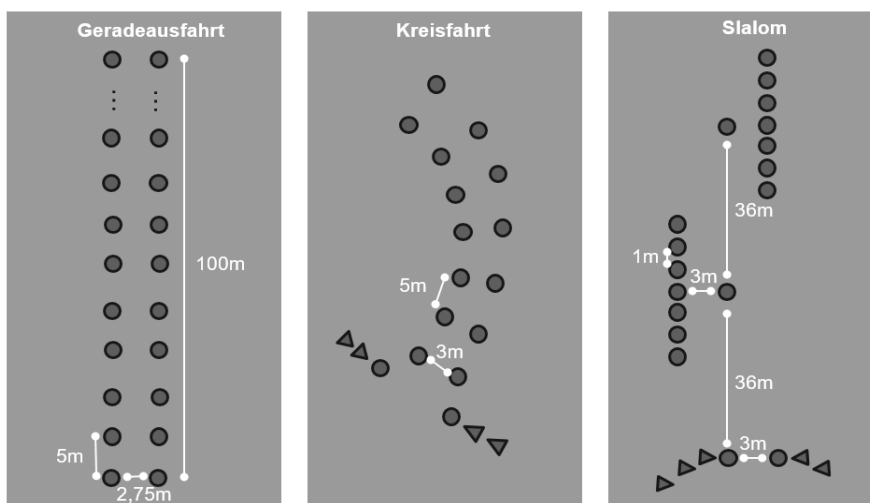
Gesamtaufbaulänge von 100m in Anspruch nahm. Dabei wurde die Gassenbreite von 2,75m zu beiden Seiten durch Pylonen (zwischen beiden Innenkanten der Standfüße der Pylonen) begrenzt. In Längsrichtung wurden diese Pylonen in einem Abstand von 5m zueinander platziert (Pylonenmittelpunkt bis Pylonenmittelpunkt). Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung des Aufbaus der Geradeausfahrt. Die einzuhaltende Richtgeschwindigkeit in der Geradeausfahrt betrug 80km/h.

Die Kreisfahrt wurde als Manöver zur Aufschaltung der Fehler *Ungeregelter RWA* und *FBA Selfsteer + Loss of Feedback* definiert. Hier wurde eine Pylonengasse mit einem Radius von 60m und einer Gassenbreite von 3m (Innenkanten) installiert. In Längsrichtung betrug der Abstand der Pylonen zueinander analog zur oben beschriebenen Kreisfahrt 5m (Pylonenmittelpunkt, Innenseite der Kreisfahrt). Die resultierende Gesamtlänge dieses Manövers betrug 180m. Die Einfahrt in die Kreisfahrt wurde mit liegenden Pylonen zur besseren Orientierung für die Versuchspersonen markiert. Abbildung 2 zeigt eine schematische Zeichnung des Aufbaus der Kreisfahrt. Die einzuhaltende Richtgeschwindigkeit betrug 50km/h.

Im Manöver Slalom wurden die Fehler *Geblockter FBA*, *FBA Sprung* und *Geblockter RWA* aufgeschaltet. Der Slalom bestand aus insgesamt 5 Toren, die sinusförmig durchfahren werden sollten. Die Einfahrt in das erste Tor wurde durch liegende Pylonen markiert. Die Tore wurden in einem Abstand von 36m (Innenkanten) abgesteckt. Ein Tor bestand aus einer Pylone an der Innenseite sowie sieben Pylonen im Abstand von jeweils einem Meter (Pylonenmittelpunkt) in Längsrichtung, die die Außenseite des Tores begrenzten. Die Gesamtlänge des abgesteckten Slalommanövers betrug 160m. Eine schematische Darstellung der einzelnen Manöveraufbauten zeigt Abbildung 2. Als Richtgeschwindigkeit waren 60 km/h einzuhalten.

Abbildung 2

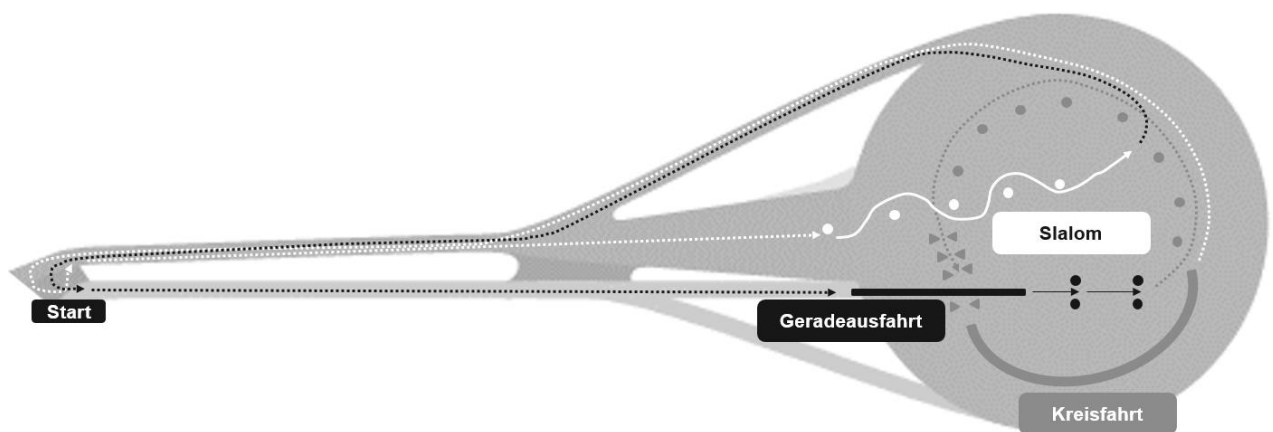
*Schematische Darstellung des Aufbaus der drei Fahrmanöver*



Da das Ziel der Studie in der subjektiven und objektiven Erfassung der initialen Reaktion von Normalfahrenden auf ein unerwartetes Fehlerereignis bestand, sollte der Zeitpunkt der Fehleraufschaltung für die Versuchspersonen nicht vorhersehbar sein. Aus diesem Grund wurden die Manöver auf der Teststrecke zu einem Parcours zusammengefügt. Durch das Absolvieren mehrerer Manöver sollten die Zeitpunkte der Fehleraufschaltung für die Versuchsperson maskiert werden. Dies diente dem Zweck der Wahrung eines Überraschungsmoments, analog zum etwaigen Auftreten im Alltagsgebrauch. Zudem konnte somit erreicht werden, dass die Fahraufgabe über alle Versuchsperson hinweg konstant blieb. Eine Darstellung der Anordnung des Parcours aus der Vogelperspektive bietet Abbildung 3.

Abbildung 3

*Darstellung des Parcours aus der Vogelperspektive*



In der Anordnung des Parcours auf der Teststrecke stellte die Geradeausfahrt das erste zu durchfahrende Manöver dar. Vom Startpunkt (siehe Abbildung 3, linke Seite) aus sollte auf einer ca. 350m langen Zufahrtsstrecke auf die geforderte Richtgeschwindigkeit von 80 km/h beschleunigt werden. Nach Durchfahrt der Geradeausfahrt mit den geforderten 80 km/h gaben zwei Pylonentore die Bremspunkte vor. Die Versuchspersonen wurden aufgefordert, bei Erreichen des ersten Pylonentores (circa 33m nach der Geradeausfahrt) so abzubremsen, dass sie nach circa 70m am zweiten Pylonentor mit einer Restgeschwindigkeit von 20-30 km/h nach links abbiegen konnten. In Hinführung auf die doppelt abgesteckte Kreisfahrt konnten sich die Versuchspersonen an Pylonen orientieren, die bereits auf einem Halbkreis im Radius von 60m aufgestellt waren. Hierbei waren die Versuchspersonen aufgefordert, auf die in der Kreisfahrt zu haltende Richtgeschwindigkeit von 50 km/h zu beschleunigen. Durch das Einfahrtstor gelangten die Versuchspersonen in das zweite Manöver, die stationäre Kreisfahrt. Im Anschluss an diese führte der Parcours über eine Rückführung (oberer Teil der Abbildung 3) zum Startpunkt zurück. Zur abschließenden Durchfahrt des Slaloms wurde dort gewendet und die mittlere Zufahrt als Anfahrtsstrecke gewählt (siehe Abbildung 3), weiß gestrichelte Markierung). Auf einer Länge von 320m konnten die Versuchspersonen die geforderte Richtgeschwindigkeit von 60 km/h erreichen, bevor sie in das erste Slalomtor einfuhren. Nach

Durchfahrt des Manövers führte der Parcours erneut über die Rückführung zum Startpunkt zurück. Die Gesamtlänge des Parcours durch alle drei Manöver betrug ca. 2910m.

## 2.4 Messgrößen

Um die Reaktion der Fahrenden auf die Aufschaltung der verschiedenen Fehler in den Fahrmanövern zu erheben, wurden drei Arten von Messgrößen in die Studie aufgenommen. Um die Kontrollierbarkeit der Fehlersituation zu evaluieren, wurde zunächst die Spurabweichung operationalisiert. Darüber hinaus wurden objektive Fahrzeugparameter sowie subjektive Daten über Befragung der Versuchspersonen erhoben. Die einzelnen Messgrößen werden im Folgenden näher beschrieben.

### 2.4.1 Spurabweichung

Die Kontrollierbarkeit der Fehlersituation für die Fahrenden wurde über die Abweichung von der vorgegebenen Fahrspur operationalisiert. Eine solche Abweichung lag dann vor, wenn Versuchspersonen die Pylonen, die jeweils den Fahrkorridor eines Manövers begrenzen, berührt (Reifen berührt den Standfuß einer Pylone) oder überfahren haben. Erhoben wurde dieses Kriterium auf zwei Arten. Zum einen wurde die Anzahl der berührten oder überfahrenen Pylonen während der Testung durch die Versuchsleitung protokolliert. Zum anderen wurde die Protokollierung anhand von Videoaufzeichnungen der Fahrt post-hoc überprüft (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4

*Kameraeinstellungen für die Videoaufzeichnung*





Zwei Kameras wurden dazu auf beiden Seiten des Fahrzeugs angebracht und rückwärts auf die Räder des Fahrzeugs ausgerichtet. Eine dritte Kamera filmte die Fahrt aus dem Innenraum des Fahrzeugs nach vorne in Fahrtrichtung. Aus Datenschutzgründen war die Kamera so ausgerichtet, dass nur die Hände der Versuchspersonen zu sehen sind (Abbildung 9). Die Videoaufzeichnung war während der gesamten Fahrtdauer aktiv, sodass in der nachfolgenden Auswertung bei Bedarf alle Fahrten aus verschiedenen Perspektiven nachvollzogen werden konnten. Abbildung 4 zeigt die verschiedenen Kameraeinstellungen.

#### 2.4.2 Objektive Messgrößen

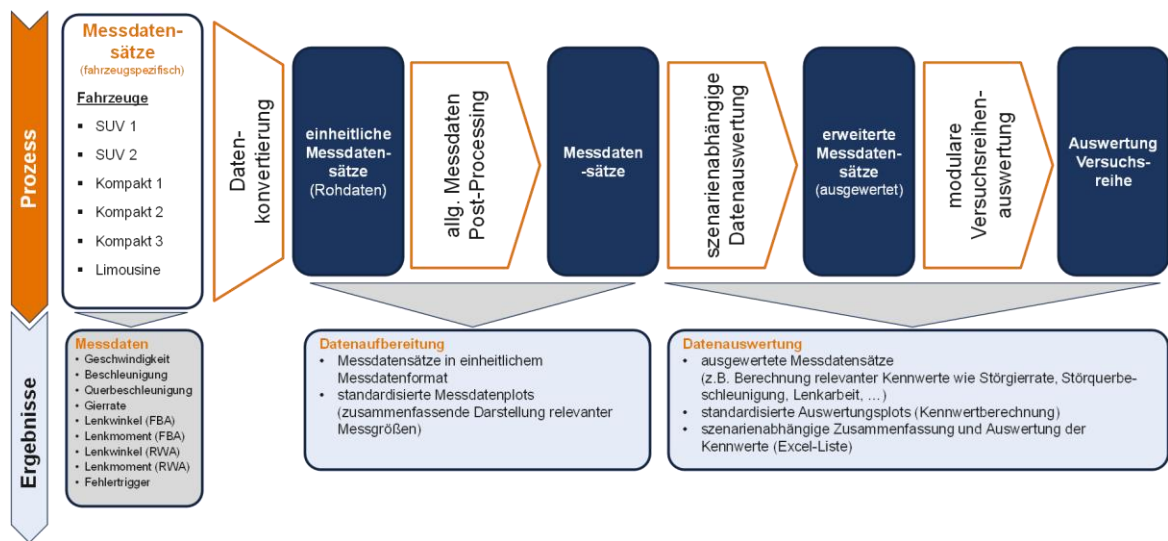
Zur objektiven Erfassung der Einflüsse der Fehleraufschaltungen auf die Fahrereingaben und die resultierende Fahrdynamik des jeweiligen Versuchsfahrzeugs wurden im Rahmen der Versuche ausgewählte Fahrzeugmessgrößen aufgezeichnet. Die Erfassung der Messdaten erfolgte dabei mit der in den Fahrzeugen integrierten Messtechnik der jeweiligen Häuser. Bei den aufgezeichneten Messgrößen handelt es sich um:

- die Fahrzeuggeschwindigkeit;
- die Fahrzeuglängs- und Fahrzeugquerbeschleunigung;
- die Gierrate;
- die Stellwerte des *Feedback-Actuators (FBA)* (Lenkwinkel, Lenkmoment);
- die Stellwerte des *Roadwheel-Actuators (RWA)* (Lenkwinkel, Lenkmoment);
- einen Fehlertrigger (Erfassung des Zeitpunkts der Fehleraufschaltung).

Die Aufzeichnung und anschließende Bereitstellung der Fahrzeugmessdaten erfolgte während der Versuche der jeweiligen Studie durch die Fahrzeugbetreuer des jeweiligen Hauses. Hierbei wurden die Daten je nach Haus in unterschiedlichen Messdatenformaten und mit unterschiedlichen Aufzeichnungsparameter (z.B. Signalabtastrate, Namenskonvention bezüglich der Messgrößen) aufgezeichnet. Mit dem Ziel die aufgezeichneten Fahrzeugmessdaten aller Versuche zu harmonisieren, wurde eine nachgelagerte Messdatenaufbereitung durchgeführt und die fahrzeugspezifischen Messdatensätze in ein einheitliches Messdatenformat überführt. Anschließend wurden die aufbereiteten Messdatensätze einer fahrmanöverabhängigen Datenauswertung zugeführt. Im Zuge der Datenauswertung wurden relevante Kennwerte berechnet sowie standardisierte Auswertungsplots der relevanten Fahrzeugmessgrößen erstellt. Der Ablauf der einzelnen Prozessschritte der Messdatenaufbereitung und -auswertung ist in Abbildung 5 zusammenfassend dargestellt.

Abbildung 5

Ablauf der Messdatenaufbereitung und -auswertung der objektiven Fahrzeugmessdaten



Die Überführung der Messdatensätze in ein einheitliches Messdatenformat umfasste die folgenden Konvertierungs- und Aufbereitungsschritte:

- allg. Signalkonvertierungen und Resampling der Messdaten auf eine einheitliche Abtastrate von 500 Hz;
- allg. Berechnungen (z.B. Berechnung des Querrucks und der Gierbeschleunigung);
- Signalfilterung (Butterworth-Tiefpass, 10. Ordnung, 6,5 Hz Eckfrequenz) für ausgewählte Messgrößen (z.B. Querbeschleunigung, Gierrate, Lenkrate);
- Zuschnitt der Messdateien auf den relevanten Zeitbereich (5 s vor/nach der Fehleraufschaltung);
- Erstellung standardisierter Messdatenplots relevanter Messgrößen;
- Speicherung der Messdatensätze in einer einheitlichen Datenstruktur und einem einheitlichen Datenformat.

Nach der Datenaufbereitung lagen alle Messdatensätze der durchgeführten Versuche in einem einheitlichen Datenformat (Matlab-Datenformat) vor und können der fahrmanöverabhängigen Datenauswertung zugeführt werden.

Im Rahmen der Messdatenauswertung wurden anhand der zur Verfügung stehenden Fahrzeugmessdaten relevante Kennwerte zur objektiven Beurteilung der Einflüsse der Fehleraufschaltungen auf die Fahrereingaben und die resultierende Fahrdynamik ermittelt beziehungsweise berechnet. Darüber hinaus dienen einzelne Kennwerte (z.B. die ermittelte Fahrgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung) als Kriterium für die Definition valider Versuchsdatensätze (siehe Abschnitt 2.7). Die Auswertung der Messdatensätze umfasst dabei die folgenden Auswertungsschritte:

- Ermittlung allgemeiner Kennwerte
  - Fahrgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung;

- Lenkradwinkel und -rate zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung.
- Berechnung versuchsabhängiger Kennwerte (gemäß AK-Vorgaben)
  - Störeinfluss Lenkradwinkel;
  - max. Lenkrate nach Fehleraufschaltung („Störtenrate“);
  - „Lenkarbeit“ vor/nach Fehleraufschaltung (nur bei den Manövern Kreisfahrt und Geradeausfahrt);
  - Störquerbeschleunigung;
  - Störquerruck;
  - Störgierrate;
  - Störgierbeschleunigung.
- Erstellung standardisierter Auswertungsplot (Kennwertberechnung).

Die Berechnung der szenarienabhängigen Kennwerte wurde durch den Arbeitskreis vorgegeben. Hierbei kamen für die Berechnung des Störeinflusses auf den Lenkradwinkel, die Störquerbeschleunigung, den Störquerruck, die Störgierrate und die Störgierrate die folgenden Berechnungsvorschriften zur Anwendung (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6

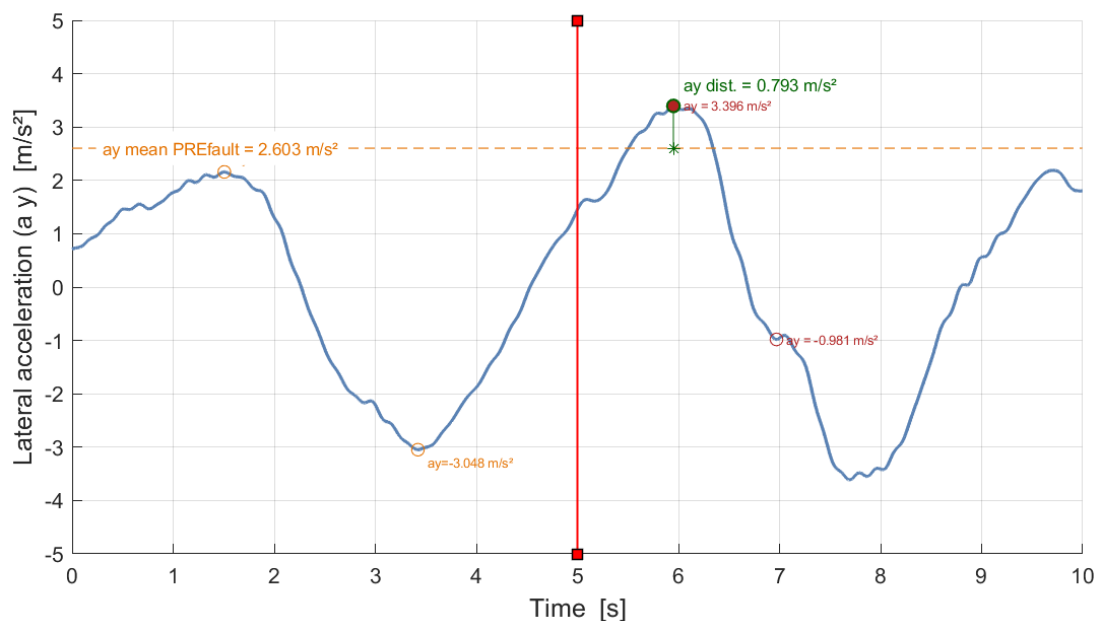
*Berechnungsvorschriften Objektivdaten*

<b>Auswertungsgrößen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Störeinfluss Lenkwinkel: Lenkwinkel</li> <li>▪ Störquerbeschleunigung: Querbeschleunigung</li> <li>▪ Störquerruck: Querruck (zeitliche Ableitung der Querbeschleunigung)</li> <li>▪ Störgierrate: Gierrate</li> <li>▪ Störgierbeschleunigung: Gierbeschleunigung</li> </ul>	
<b>Fehlerbilder:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geblockter FBA</li> <li>▪ FBA Sprung</li> <li>▪ Geblockter RWA</li> </ul>	<b>Fehlerbilder:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ RWA Rechteckschwingung</li> <li>▪ Ungeregelter RWA</li> <li>▪ FBA Selfsteer + Loss of feedback</li> </ul>
<b>Fahrmanöver:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Slalom</li> </ul>	<b>Fahrmanöver:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kurvenfahrt</li> <li>▪ Geradeausfahrt</li> </ul>
<u>Auswertung vor Fehleraufschaltung</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auswertungsbereich 5 s vor Fehleraufschaltung</li> <li>▪ Bildung des Mittelwerts der Absolutwerte der zwei ausgeprägten Peaks der Auswertungsgröße</li> </ul> <u>Auswertung nach Fehleraufschaltung</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auswertungsbereich nach Fehleraufschaltung               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geblockter FBA: 5 s</li> <li>- FBA Sprung: 2 s</li> <li>- Geblockter RWA: 5 s</li> </ul> </li> <li>▪ Identifizierung der zwei ausgeprägten Peaks der Auswertungsgröße</li> </ul> <u>Berechnung der Störgröße</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Differenz zwischen dem Mittelwert vor der Fehleraufschaltung und dem Absolutwert des größten Peaks nach der Fehlerausschaltung entspricht der Störgröße</li> </ul>	<u>Auswertung vor Fehleraufschaltung</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auswertungsbereich 5 s vor Fehleraufschaltung</li> <li>▪ Bildung des Mittelwerts der Auswertungsgröße</li> </ul> <u>Auswertung nach Fehleraufschaltung</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auswertungsbereich nach Fehleraufschaltung               <ul style="list-style-type: none"> <li>- RWA Rechteckschwingung: 3 s</li> <li>- Ungeregelter RWA: 2 s</li> <li>- FBA Selfsteer + Loss of feedback: 2 s</li> </ul> </li> <li>▪ Identifizierung des betragsmäßig größten Peaks der Auswertungsgröße</li> </ul> <u>Berechnung der Störgröße</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Differenz zwischen dem Mittelwert der Auswertungsgröße vor der Fehleraufschaltung und dem Absolutwert des größten Peaks nach der Fehlerausschaltung entspricht der Störgröße</li> </ul>

Abbildung 7 zeigt exemplarisch die relevanten Messpunkte für die Ermittlung der Störquerbeschleunigung für einen Messdatensatz (FBA Sprung während eines Slaloms). Die Fehleraufschaltung erfolgt zum Zeitpunkt  $t = 5$  s. Aus der Mittelwertbildung der Absolutwerte der zwei identifizierten Peaks der Querbeschleunigung im Zeitbereich 5 s vor der Fehleraufschaltung ergibt sich der Referenzwert  $a_{y \text{ mean PREfault}} = 2,603 \text{ m/s}^2$ . Der Betrag des größten Peaks im Zeitbereich 2 s nach der Fehleraufschaltung beträgt der  $a_y = 3,396 \text{ m/s}^2$ . Die sich aus der Differenz dieser zwei Werte ergebenden Störquerbeschleunigung ist  $a_{y \text{ dist}} = 0,793 \text{ m/s}^2$ .

Abbildung 7

Ermittlung der Störquerbeschleunigung für eine FBA Sprung Situation (Slalom)



Die Ermittlung der maximalen Lenkraten nach Fehleraufschaltung erfolgt für den Zeitbereich vom 0,1 s nach der Fehleraufschaltung. Die „Lenkarbeit“ wird nur für die annähernd stationären Fahrmanöver Gerade- und Kurvenfahrt berechnet. Die Berechnung erfolgt durch zeitliche Integration des Lenkwinkelsignals über ein festes Zeitintervall von 5 s vor und nach der Fehleraufschaltung. Die ermittelten Werte der Lenkarbeit vor und nach der Fehleraufschaltung werden anschließend in Relation zueinander betrachtet, um so die Zunahme bzw. Abnahme der Lenkarbeit infolge der Fehleraufschaltung bewerten zu können.

Alle im Rahmen der Auswertung der Fahrversuchsdaten ermittelten und berechneten Kennwerte der jeweiligen Versuche wurden nach Studiendurchführung in einer Ergebnisdatei für den Arbeitskreis zusammengefasst und bereitgestellt.

### 2.4.3 Subjektive Messgrößen

Zur Erfassung der subjektiven Reaktion auf die Fehleraufschaltung wurden verschiedene subjektive Messgrößen herangezogen. Im Folgenden werden die Instrumente beschrieben.

Eine vollständige Darstellung des Befragungskonzeptes inklusive der verwendeten Ausformulierung der einzelnen Items befindet sich in Anhang 6.1 bis 6.4.

Um einschätzen zu können, als wie anspruchsvoll die vorgegebenen Fahrmanöver von Normalfahrenden unabhängig von der Fehleraufschaltung empfunden wurden, wurden drei Items angelehnt an den NASA-TLX (Hart, 2006) in das Befragungskonzept aufgenommen. Dort sollten die Versuchspersonen auf einer zwanzigstufigen Skala angeben, wie hoch die mentalen und körperlichen Anforderungen waren und wie gut sie ihre eigene Leistung im jeweiligen Manöver einschätzen. Neben der Schwierigkeit der einzelnen Manöver waren die Versuchspersonen auch dazu aufgefordert, die Schwierigkeit des Gesamtparcours als Ganzes mit Hilfe eines weiteren Items einzuschätzen („Wie anspruchsvoll empfinden Sie den Parcours insgesamt?“). Ebenfalls mit einem Einzelitem, angelehnt an den Trust in Automation Questionnaire nach Körber (2018), wurde das Ausmaß des Vertrauens in das Fahrzeug operationalisiert („Wie sehr stimmen Sie der folgenden Aussage zu: Ich vertraue dem Fahrzeug?“). Beide Einzelitems wurden jeweils auf einer siebenstufigen Skala beantwortet (Schwierigkeit Gesamtparcours: (1) „Überhaupt nicht anspruchsvoll“ bis (7) „Sehr anspruchsvoll“; Vertrauen: (1) „Stimme gar nicht zu“ bis (7) „Stimme voll zu“).

Die Reaktion der Versuchspersonen auf die Fehleraufschaltung wurde sowohl qualitativ als auch quantitativ erhoben. Auf der qualitativen Ebene wurde durch die Versuchsleitung eine Verhaltensbeobachtung der initialen Reaktion der Fahrenden durchgeführt. Zusätzlich wurde die subjektiv empfundene Reaktion durch Befragung der Versuchspersonen auf affektiver („Was haben Sie während des Ereignisses gefühlt?“), kognitiver („Was haben Sie während des Ereignisses gedacht?“) und behavioraler Ebene („Was haben Sie aufgrund des Ereignisses getan?“) gemessen. Bezogen auf die behaviorale Ebene wurde zusätzlich erfragt, ob und wenn ja, warum Personen anders handeln würden, sollte sich ein solches Ereignis wiederholen. Zur Erhebung der quantitativen Reaktion auf die Fehleraufschaltung wurde zum einen die Neukum-Skala (Neukum & Krüger, 2003) und zum anderen Subskalen des CTAM (Osswald et al., 2012) eingesetzt. Die Neukum-Skala zur Erfassung der empfundenen Kritikalität einer Fahrsituation besteht aus einer elfstufigen Skala, wobei die Skalenpunkte sich steigernden Kategorien zugeordnet sind. Während der Skalenpunkt 0 in der Kategorie „Nichts bemerkt“ eingeordnet ist, drücken die Punkte 1 bis 3 eine „Spürbarkeit“ und die Punkte 4 bis 7 eine „Störung des Fahrens“ aus. Die Ratings 7 bis 9 stehen für eine „Gefährlichkeit“ und mit der Angabe des Wertes 10 kann ausgedrückt werden, dass das „Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar“ war. Angelehnt an die Subskalen „Perceived Safety“ (5 Items) und „Anxiety“ (6 Items) der CTAM nach Osswald et al. (2012) wurden die Konstrukte wahrgenommene Sicherheit („Ich glaube, dass ein solches Ereignis gefährlich wäre.“) und Ängstlichkeit („Das Auftreten dieses Ereignisses wäre für mich beängstigend.“) in der Fehlersituation erfasst. Dazu wurden die für den Anwendungskontext passende Items ausgewählt, ins Deutsche übersetzt und in ihrer Formulierung so angepasst, dass sie sich auf das Fehlerereignis beziehen. Hinsichtlich der Reliabilität zeigte die angepasste Subskala „Perceived Safety“ über alle sechs Einzelstudien hinweg ein zufriedenstellendes Cronbach's Alpha von  $\alpha = ,620$  bis  $\alpha = ,949$ . Zur Verbesserung der Reliabilität ( $\alpha = ,740$  bis  $\alpha = ,926$ ) wurde ein Item der Subskala „Anxiety“

(„Ich würde befürchten, dass ich ein solches Ereignis nicht verstehe.“) von der Datenanalyse ausgeschlossen.

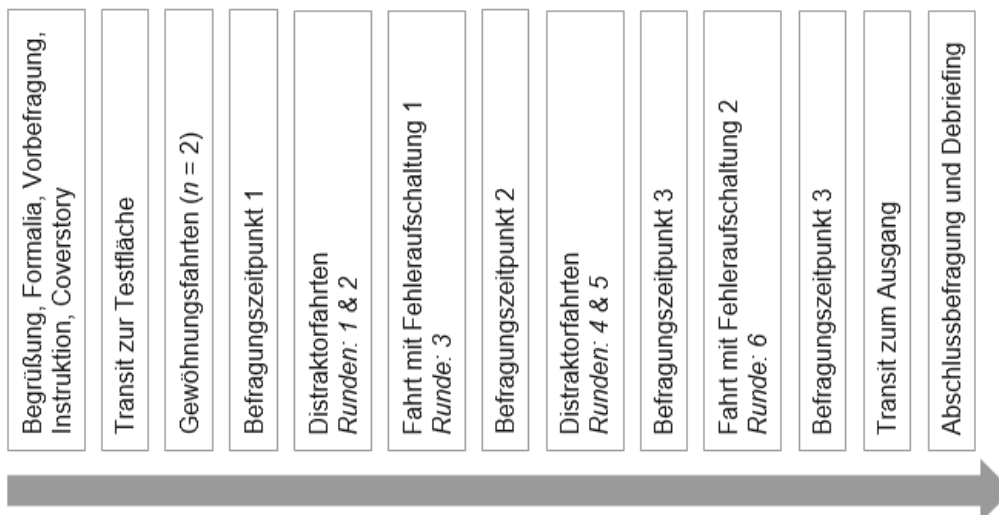
Die Nachbefragung diente dem Vergleich des jeweils erlebten FBA- und RWA-Fehlers. Es wurden pro Fehler drei Items erhoben, in denen angegeben werden konnte, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Fahrzeug mit einem solchen Fehler genutzt beziehungsweise nach Erleben des betreffenden Fehlers eine Werkstatt aufgesucht wird. Darüber hinaus wurden die Fehler direkt hinsichtlich ihrer Kritikalität verglichen („Welchen Fehler empfinden Sie als kritischer?“). Eine Begründung dieses Vergleichs wurde abschließend über ein qualitatives, offenes Item erhoben („Bitte begründen Sie Ihre Entscheidung.“)

## 2.5 Studienablauf

Im folgenden Abschnitt wird der Testablauf detailliert beschrieben. Abbildung 8 zeigt den Ablauf in einer Übersicht.

Abbildung 8

### *Ablauf der Testung*

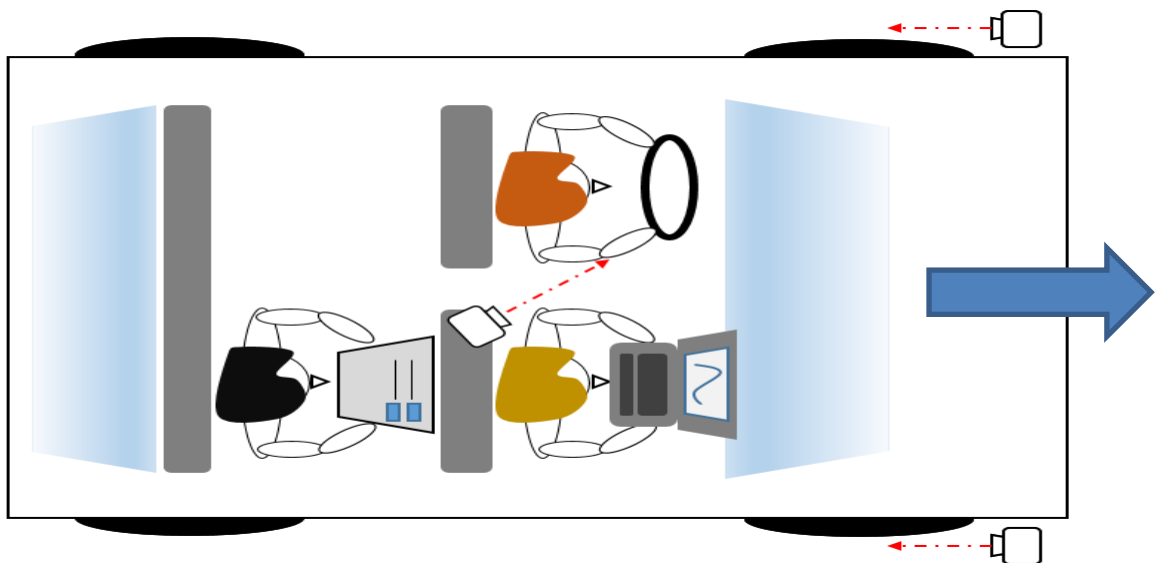


Zu Beginn wurden die Versuchspersonen durch die Versuchsleitung begrüßt und zu einer Befragungsstation außerhalb des eigentlichen Teststreckengeländes geführt. Vor Ort erfolgte zunächst entsprechend dem Hygienekonzept die Kontrolle des 2G+ Nachweises (dreifacher Impfschutz bzw. zweifacher Impfschutz mit zusätzlichem tagesaktuellen, negativen Schnelltest) sowie eine Händedesinfektion. Anschließend füllten die Versuchspersonen die formalen Dokumente und eine kurze Vorbefragung zu soziodemografischen Daten (Alter, Geschlecht), Fahrgewohnheiten (Führerscheinwerb, jährliche Fahrleistung) sowie zur Erfahrung mit Fahrerassistenzsystemen aus (siehe Anhang 6.1).

Im Anschluss präsentierte die Versuchsleitung den Versuchspersonen eine Coverstory, um den wahren Hintergrund der Studie zunächst zu verschleiern und so den Fokus weg, von einer möglichen „Fehlersuche“ der Versuchspersonen zu lenken. Die Versuchspersonen bekamen die Information, dass es in der Studie um die Weiterentwicklung des automatisierten Fahrens ginge. Dazu würden Daten von menschlichen Fahrern benötigt werden, um die automatisierte Fahrfunktion auf die menschliche Fahrweise abzustimmen und so die spätere Nutzerakzeptanz zu erhöhen. Neben der Coverstory erhielten die Versuchspersonen grundlegende Informationen zum Ablauf der Testfahrten. Anschließend an die Instruktionen verbrachte die Versuchsleitung die Versuchspersonen in einem Transitfahrzeug auf die Fahrdynamikfläche des Testgeländes. Auf der Fahrdynamikfläche erfolgte der Umstieg in das eigentliche Versuchsfahrzeug. In diesem wartete der für das Aufschalten der Fehler zuständige, geschulte Fahrzeugbetreuer auf dem Beifahrersitz. Dieser wurde im Sinne der Coverstory den Versuchspersonen als eine Person vorgestellt, die für die Aufnahme der Fahrdaten verantwortlich sei. Vor dem Einstieg wurde der Fahrerplatz sowie alle Kontaktflächen an der Außenseite des Fahrzeugs im Sinne des Hygienekonzepts durch die Versuchsleitung desinfiziert. Anschließend stiegen die Versuchspersonen auf der Fahrerseite ein, während die Versuchsleitung auf dem hinteren rechten Sitz diagonal zum Versuchspersonen Platz nahm (siehe Abbildung 9).

Abbildung 9

*Versuchsaufbau im Fahrzeug*



Im Fahrzeug hatten die Versuchspersonen zunächst Gelegenheit, sich den Sitz und die Spiegel korrekt einzustellen. Im Anschluss erfolgte eine Einweisung in die Bedienelemente des Fahrzeugs und eine weiterführende Instruktion durch die Versuchsleitung. Den Versuchspersonen wurden die drei Manöver gezeigt und ihre Reihenfolge im Parcours erklärt. Wie in Abschnitt 2.3) dargestellt, startete der Parcours mit der Durchfahrt der Geradeausfahrt, woran sich die Kreisfahrt und der Slalom anschlossen. Eine Runde durch den Parcours entsprach somit dem Absolvieren aller drei Manöver in der vorgegebenen Reihenfolge. Die Versuchspersonen wurden angewiesen, in den einzelnen Manövern die jeweils vorgegebene Richtgeschwindigkeit von 80 km/h (Geradeausfahrt),

50 km/h (Kreisfahrt) und 60 km/h (Slalom) konstant einzuhalten, die mit Pylonen abgesteckten Fahrspuren möglichst mittig und präzise zu durchfahren und nach Möglichkeit keine der Pylonen zu überfahren. Dabei wurde eine standardisierte Handhaltung am Lenkrad („Viertel vor Drei Stellung“, bei der beide Hände zu beiden Seiten des Lenkrades auf Höhe von 9 und 3 Uhr platziert werden) durch die Instruktion vorgegeben. Nach der Klärung von möglichen Verständnisfragen wurden zwei Eingewöhnungsfahrten durch den Parcours absolviert. Diese dienten ausschließlich der Gewöhnung an das Fahrzeug sowie dem Erlernen des Parcours und waren für die spätere Datenauswertung nicht relevant. In der ersten Eingewöhnungsfahrt lag der Fokus besonders auf der korrekten Durchfahrt der Manöver in einer selbstgewählten Geschwindigkeit, während die Versuchspersonen in der zweiten Fahrt bereits aufgefordert waren, die korrekten Richtgeschwindigkeiten einzuhalten.

Nach der Eingewöhnungsphase fand die erste Befragung der Versuchspersonen durch die Versuchsleitung statt. Zum besseren Verständnis konnten die Versuchspersonen den Fragebogen mitlesen, während ihre mündlichen Antworten direkt durch die Versuchsleitung protokolliert wurden. Im Zuge des ersten Befragungszeitpunktes wurden die Versuchspersonen zur subjektiv wahrgenommenen Schwierigkeit der einzelnen Manöver sowie zu ihrem Empfinden hinsichtlich des Gesamtparcours und des Vertrauens in das Fahrzeug befragt (siehe Anhang 6.2). Im Anschluss starteten die Versuchspersonen in die eigentlichen Experimentalfahrten. Entlang der Coverstory wurden die Versuchspersonen informiert, dass ab diesem Zeitpunkt die Messdatenerfassung ihrer menschlichen Fahrweise startet und sie insgesamt sechs Runden durch den Parcours fahren sollen. Zudem wurde ihnen mitgeteilt, dass sie die Versuchsleitung zu verschiedenen Zeitpunkten auffordern wird, das Fahrzeug anzuhalten, um erneut eine kurze Befragung zum subjektiven Empfinden im Parcours durchzuführen. Die Versuchspersonen hatten jederzeit die Möglichkeit, sich nach den korrekten Richtgeschwindigkeiten zu erkundigen und erhielten im Falle von Orientierungsschwierigkeiten Unterstützung durch die Versuchsleitung. Die ersten beiden Runden dienten der Distraction, sodass in diesen keine Fehler aufgespielt wurden. Aufgabe der Versuchsleitung in diesen und allen weiteren Runden war es, die gegebenenfalls überfahrenen Pylonen zu protokollieren und bei Bedarf wieder neu aufzustellen. In der dritten Runde wurde der erste Fehler, der jeweiligen Randomisierungslogik der Einzelstudien folgend, im zugehörigen Manöver aufgeschaltet. Die direkte Reaktion der Versuchspersonen wurde durch die Versuchsleitung protokolliert. Nach Durchfahrt des Manövers, in dem der Fehler aufgeschaltet wurde, wurden die Versuchspersonen zum Anhalten aufgefordert und zum zweiten Mal befragt (siehe Anhang 6.3). Der zweite Befragungszeitpunkt hatte in Abhängigkeit der Fehlerdetektion einen unterschiedlichen Umfang. Dazu wurden die Versuchspersonen zunächst befragt, ob sie während der Durchfahrt der Manöver etwas Besonderes bemerkt hätten. Wurde dies verneint, wurde analog zum Befragungszeitpunkt 1 die Schwierigkeit des zuletzt gefahrenen Manövers, die wahrgenommene Schwierigkeit des Gesamtparcours sowie das aktuelle Ausmaß des Vertrauens in das Fahrzeug erfasst. Die Kritikalität des Fehlers auf der Neukum-Skala wurde darüber hinaus durch die Versuchsleitung mit einer Null („Nichts bemerkt“) erfasst. Ging aus der Beschreibung der Versuchspersonen hervor, dass sie den Fehler bemerkt haben, wurden die Versuchspersonen insofern aufgeklärt, dass es sich um ein



durch die Versuchsleitung initiiertes Ereignis gehandelt hat. Dieses Ereignis wurde gezielt nicht näher erläutert, um eine Beeinflussung der folgenden subjektiven Urteile durch das negativ konnotierte Wort „Fehler“ zu vermeiden. Im weiteren Verlauf wurden die Versuchspersonen zusätzlich zu den bereits genannten Items hinsichtlich ihrer affektiven, kognitiven und behavioralen Reaktion auf dieses initiierte Ereignis befragt. Zudem sollten sie die Kritikalität mit Hilfe der Kategorien der Neukum-Skala einschätzen sowie die Items bezüglich der Konstrukte „wahrgenommene Sicherheit“ und „Ängstlichkeit“ beantworten und sich dabei vorstellen, ein solches Ereignis würde im realen Fahrkontext auftreten.

Nach der zweiten Befragung beendeten die Versuchspersonen die unterbrochene dritte Runde und durchfuhren die nächsten beiden Distraktorrunden (Runde 4 und 5) ohne weitere Fehleraufschaltung. Im Anschluss an die Runde 5 folgte der Befragungszeitpunkt 3, der sich analog zum Zeitpunkt 1 gestaltete (Subjektive Schwierigkeit der Manöver, Schwierigkeit des Gesamtparcours, Vertrauen in das Fahrzeug; siehe Anhang 6.2). Um die Coverstory weiter aufrechtzuerhalten, wurden die Versuchspersonen informiert, dass nur noch eine weitere Runde benötigt wird, um genügend Daten aufgezeichnet zu haben. In dieser letzten Runde erfolgte im zugehörigen Manöver die zweite Fehleraufschaltung. Zu diesem Fehler wurden die Versuchspersonen im vierten Befragungszeitpunkt analog zum beschriebenen Vorgehen im Befragungszeitpunkt 2 befragt (siehe Anhang 6.3). Nach Abschluss der Befragung wurden die Versuchspersonen aufgefordert, die Runde zu beenden und beim Transitfahrzeug zum Halten zu kommen. Versuchsleitung und Versuchspersonen stiegen dort in das Transitfahrzeug um und kehrten zur Befragungsstation außerhalb der Teststrecke zurück. Dort angekommen, wurden die Versuchspersonen gebeten, die Nachbefragung auszufüllen. Wenn nur ein Fehler durch die Versuchspersonen bemerkt wurde, wurden nur die Items zugehörig zu diesem Fehler bearbeitet. Wurde kein Fehler bemerkt, wurde die Nachbefragung nicht durchgeführt. Anschließend wurden die Versuchspersonen über den wahren Hintergrund der Studie aufgeklärt, incentiviert und verabschiedet.

## **2.6 Auswahlkriterien für die Stichprobe**

Die Rekrutierung der insgesamt  $N = 168$  Versuchspersonen erfolgte über einen professionellen Dienstleister. Um eine möglichst breite Stichprobe für jede Einzelstudie zu ziehen, wurden für die Rekrutierung verschiedene Zielgrößen vorgegeben. Diese umfassten die folgenden soziodemografischen Charakteristiken: Neben einer ausgeglichenen Geschlechterverteilung wurde im Rekrutierungsprozess auf eine Verteilung des Alters über die Gruppen 20 bis 35 Jahre, 35 bis 50 Jahre und 50 bis 65 Jahre geachtet. Voraussetzung für die Teilnahme war zum einen der Besitz eines Führerscheins der Klasse B sowie eine jährliche Fahrleistung von mindestens 2500 Kilometern. Durch die Aufteilung der Gesamtstichprobe auf die Einzelstudien, ergibt sich jeweils eine eigene soziodemografische Verteilung. Aus diesem Grund werden die einzelnen Stichprobenbeschreibungen für jede Einzelstudie im Rahmen der Ergebnisdarstellung (Abschnitt 3) individuell berichtet.

## 2.7 Definition valider Datensätze

Um zu definieren, welche Datensätze als valide angesehen werden und somit in die Datenauswertung eingehen können, wurden drei verschiedene Kriterien aufgestellt. Dabei beziehen sich die Kriterien auf a) die Nachweisbarkeit der standardisierten Fehleraufschaltung, b) auf die Einhaltung der Richtgeschwindigkeit und c) die Fahrperformanz im Bereich der Spureinhaltung ohne Fehleraufschaltung. Die drei Kriterien werden im Folgenden detailliert beschrieben.

Das erste Kriterium behandelt die Nachweisbarkeit der standardisierten Aufschaltung der Fehler in der Testsituation, wie sie in Abschnitt 2.2 beschrieben wurde. Ziel dieses Kriteriums war es, die Daten um diejenigen Datensätze zu bereinigen, bei denen der Fehler zum falschen Zeitpunkt aufgeschaltet wurde, die Auswirkung des Fehlers in den objektiven Fahrparametern nicht (korrekt) erkennbar war oder der objektive Messdatensatz nicht beziehungsweise nur fehlerhaft vorhanden war.

Während das erste Kriterium im Besonderen auf die technische Fehlerfreiheit der Daten abzielt, beziehen sich die Kriterien 2 und 3 auf die Fahrperformanz der Versuchspersonen. Mit Hilfe dieser Kriterien sollten Versuchspersonen ausgeschlossen werden, die aufgrund ihres Fahrvermögens nicht in der Lage waren, die verschiedenen Manöver mit den zugehörigen Instruktionen unabhängig von einer Fehleraufschaltung zuverlässig korrekt zu absolvieren. Im Zuge dessen bezieht sich das Kriterium 2 auf die Einhaltung der korrekten, vorgegebenen Richtgeschwindigkeit in den einzelnen Manövern, um sicherzustellen, dass sich die Fehlerbilder in der angedachten Dynamik verlässlich für die Versuchspersonen auswirken und über die Studie hinweg möglichst exakt reproduzierbar sind. So legte Kriterium 2 fest, dass diejenigen Versuchspersonen auszuschließen sind, die sich zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung außerhalb eines Toleranzbereichs der Richtgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 2.3)  $\pm 5$  km/h befanden. Dieses a priori festgelegte Kriterium erwies sich für die beiden weniger anspruchsvollen, stationären Manöver Geradeausfahrt und Kreisfahrt als sinnvoll anwendbar. Für das Manöver Slalom wurde das Kriterium post-hoc erweitert, da das Halten der Richtgeschwindigkeit über die gesamte Länge des Manövers für viele Versuchspersonen eine große Herausforderung darstellte. Im Mittel erreichten die Versuchspersonen zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung im Slalom eine Geschwindigkeit von 56-57 km/h. Da dies die Fahrperformanz der gesamten Stichprobe und nicht nur einzelner Ausreißer widerspiegelt, wurde sich dafür entschieden, den Toleranzbereich für den Slalom nach unten auszuweiten und nur Versuchspersonen auszuschließen, die mehr als zwei Standardabweichungen langsamer als die mittlere Geschwindigkeit gefahren sind. Somit konnten dennoch diejenigen Datensätze ausgeschlossen werden, bei denen die Geschwindigkeit im Vergleich deutlich zu gering waren, und somit die dynamischen Auswirkungen der Fehlerbilder nicht vergleichbar waren.

Das dritte Kriterium behandelt die Fahrperformanz der Versuchspersonen in Bezug auf die Spureinhaltung. Es ist davon auszugehen, dass ein Spurverlassen durch Überfahren der Pylonen nach Fehleraufschaltung sowohl auf die Auswirkungen des Fehlers als auch auf das

fahrerische Können der Versuchsperson zurückführbar sein kann. Um die Wahrscheinlichkeit für zufällige fahrerische Fehler im Sinne der Untersuchung der Auswirkungen des Fehlerbildes zu minimieren, wurde betrachtet wie häufig der vorgegebene Fahrkorridor ohne Fehleraufschaltung über den gesamten Versuch verlassen wurde. Im Zuge dessen wurden Versuchspersonen ausgeschlossen, die mehr als zwei Standardabweichungen häufiger als der Mittelwert der Stichprobe pro Einzelstudie die Spur in einem einzelnen Manöver verlassen haben. Dazu wurde für jede der sechs Runden ausgewertet, wie häufig ein spezifisches Manöver nicht korrekt durchfahren wurde. Ein Manöver galt als nicht korrekt durchfahren, sobald mindestens eine Pylone bei der Durchfahrt berührt oder überfahren wurde. Aus der sich daraus ergebenden Verteilung wurden die Ausreißer identifiziert, die ohne Einwirkung eines Fehlers ein gewisses Manöver nicht reliabel durchfahren haben, und somit von der Auswertung ausgeschlossen.

Abbildung 10

*Übersicht über den Ausschluss von Versuchspersonen auf Basis des Kriteriums 3*

Partner	Manöver	M Anzahl defizitärer Manöver	SD	Cut-Off (M defizitäre Manöver + 2 SD)	Anzahl invalider Datensätze	Defizitäre Manöver pro invalidem Datensatz
SUV 1	Geradeausfahrt	0,04	0,19	0,41	1	1
	Kreisfahrt	0,18	0,55	1,27	2	2
	Slalom	0,68	1,25	3,18	1	6
Kompakt 2	Geradeausfahrt	0,00	0,00	0,00	0	/
	Kreisfahrt	0,04	0,19	0,41	1	1
	Slalom	0,04	0,19	0,41	1	1
Kompakt 1	Geradeausfahrt	0,00	0,00	0,00	0	/
	Kreisfahrt	0,12	0,44	1,00	2	1 x 1 1 x 2
	Slalom	0,12	0,33	0,78	3	1
Kompakt 3	Geradeausfahrt	0,00	0,00	0,00	0	/
	Kreisfahrt	0,18	0,47	1,11	1	2
	Slalom	0,04	0,19	0,41	1	1
Limousine	Geradeausfahrt	0,04	0,19	0,41	1	1
	Kreisfahrt	0,11	0,42	0,94	2	1 x 1 1 x 2
	Slalom	0,11	0,31	0,74	3	1
SUV 2	Geradeausfahrt	0,07	0,26	0,59	2	1
	Kreisfahrt	0,04	0,19	0,41	1	1
	Slalom	0,04	0,19	0,41	1	1

In Abbildung 10 ist eine Übersicht über den durchgeführten Ausschluss von Versuchspersonen auf Basis des dritten Kriteriums dargestellt. Die jeweiligen Daten sind pro Partner und Manöver aufgeschlüsselt. In der dritten Spalte ist der Mittelwert der Anzahl der defizitären Manöver pro Einzelstichprobe aufgelistet (theoretische Spanne: 0 - 6). In der vierten Spalte sind die Standardabweichungen für jeden dieser Mittelwerte zu finden, gefolgt vom Cut-Off Wert, berechnet aus dem Mittelwert plus zwei Standardabweichungen. In den letzten beiden Spalten ist zum einen die Anzahl der Versuchspersonen, die aufgrund des Überschreitens des jeweiligen Cut-Offs in Hinsicht auf die defizitären Manöver als invalide definiert wurden, sowie

die deskriptive Anzahl an Manövern, die durch diese Personen nicht korrekt bewältigt wurden, aufgeführt. Hier zeigte sich ein sehr homogenes Bild, mit der Ausnahme der Kombination des SUV 1 und Slalom. Die dort ausgeschlossene Versuchsperson hat in jeder der sechs Durchfahrten mindestens eine der Slalompylonen berührt und stellt somit einen extremen Ausreißer dar, der den Cut-Off Wert für diese Stichprobe nach oben verzerrt. Dennoch wiesen alle anderen Personen in der Stichprobe maximal zwei mangelhafte Manöver auf.

Zusammenfassend wurden Datensätze als valide angesehen und in die Datenauswertung eingeschlossen, bei denen

- die standardisierte Fehleraufschaltung mit Hilfe der objektiven Parameter nachgewiesen werden konnte (Kriterium 1),
- bei denen die Versuchspersonen zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung der definierten Geschwindigkeitstoleranz entsprochen haben (Kriterium 2) und
- bei denen im gesamten Verlauf der Testung im Vergleich zur Gesamtstichprobe kein gemäß dem Kriterium auffällig häufiges Spurverlassen im spezifischen Manöver gefunden wurde (Kriterium 3).

Der Ausschluss der Datensätze erfolgte dabei manöverspezifisch. Entsprach eine Versuchsperson für einen der beiden Fehlerarten seines Versuchs den Kriterien nicht, konnten die Daten für den anderen Fehler bei erfolgreicher Validierung dennoch verwendet werden. Nach Ausschluss der invaliden Datensätze zeigte sich das nachfolgende Bild hinsichtlich der Stichprobengrößen der Einzelstudien (siehe Abbildung 11).

Abbildung 11  
*Ausschluss invalider Datensätze*

Fehlerbild	Fahrzeug	Anzahl der erhobenen Probanden	Kriterium 1 Korrekte Datenaufzeichnung	Vollständige Datensätze	Kriterium 2 Geschwindigkeit & Kriterium 3 Spureinhaltung	Finale Stichprobengröße
Geblockter FBA	Kompakt 3	$n = 28$	Ausschluss: 7	$n = 21$	Ausschluss: 1	$n = 20$
	SUV 2	$n = 28$	Ausschluss: 0	$n = 28$	Ausschluss: 2	$n = 26$
Rechteckschwingung RWA	Kompakt 3	$n = 28$	Ausschluss: 0	$n = 28$	Ausschluss: 0	$n = 28$
	SUV 2	$n = 28$	Ausschluss: 0	$n = 28$	Ausschluss: 4	$n = 24$
FBA Sprung	Kompakt 2	$n = 28$	Ausschluss: 0	$n = 28$	Ausschluss: 2	$n = 26$
	Limousine	$n = 27$	Ausschluss: 3	$n = 24$	Ausschluss: 2	$n = 22$
Ungeregelter RWA	Kompakt 2	$n = 28$	Ausschluss: 1	$n = 27$	Ausschluss: 5	$n = 22$
	Limousine	$n = 27$	Ausschluss: 0	$n = 27$	Ausschluss: 2	$n = 25$
FBA Selfsteer & Loss of Feedback	SUV 1	$n = 28$	Ausschluss: 0	$n = 28$	Ausschluss: 4	$n = 24$
	Kompakt 1	$n = 25$	Ausschluss: 1	$n = 24$	Ausschluss: 2	$n = 22$
Geblockter RWA	SUV 1	$n = 28$	Ausschluss: 1	$n = 27$	Ausschluss: 2	$n = 25$
	Kompakt 1	$n = 25$	Ausschluss: 8	$n = 17$	Ausschluss: 2	$n = 15$

Die angestrebte Stichprobengröße konnte für fast alle Einzelstudien erreicht werden. Ausschließlich im Falle der Kombination *Geblockter RWA* im Fahrzeug Kompakt 1 konnte die Stichprobengröße aufgrund schlechter Wetterbedingungen bei Testdurchführung sowie aufgrund technischer Probleme bei der Fehleraufschaltung nicht erreicht werden.

### 3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse separat pro Teilstudie in der Reihenfolge ihrer Durchführung berichtet. Die Auswertung erfolgte mittels der Statistiksoftware IBM SPSS Statistics (Version 27) (IBM, 2020) und Matlab (Version R2018b).

#### 3.1 Studie 1

Der erste Studienteil fand im Zeitraum 28. bis 31. März 2022 unter Verwendung des Versuchsfahrzeugs SUV 1 statt. Bei den ausgewählten Fehlerbildern handelte es sich um den FBA-Fehler *Selfsteer + Loss of Feedback*, welcher im Manöver Kreisfahrt aufgeschaltet wurde sowie um den RWA-Fehler *Geblockter RWA* im zugehörigen Manöver Slalom. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Studienteils detailliert dargestellt.

##### 3.1.1 Stichprobe

Die Stichprobengröße umfasst  $N = 28$  Teilnehmende, davon sind 11 Personen weiblich. Das mittlere Alter beträgt  $M = 36,71$  Jahre ( $SD = 12,94$  Jahre), wobei die jüngste Versuchsperson 20 Jahre und die älteste 63 Jahre alt ist. Die mittlere jährliche Fahrleistung beträgt  $M = 21.428,57$  km ( $SD = 14.317,64$  km) mit einer Spannweite von 8.000 km bis 65.000 km. Keine der Versuchspersonen gibt an eine nicht korrigierte Seh- oder Hörbeeinträchtigung zu haben.

##### 3.1.2 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt aufgeteilt in die beiden Abschnitte fehlerunabhängige und fehlerspezifische Ergebnisse. Zunächst erfolgt der Bericht von Ergebnissen, welche sich von den Fehleraufschaltungen unabhängig, auf die allgemeine Schwierigkeit der gewählten Manöver im Sinne der Prüfung des gewählten Versuchsdesigns beziehen. Anschließend erfolgt die Darstellung der fehlerspezifischen Ergebnisse. In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Ergebnisse zur Prüfung der Kontrollierbarkeit beider Fehler (FBA und RWA) eingegangen. Darauf folgend werden die subjektiven Versuchsdaten hinsichtlich des Erlebens der Fehleraufschaltung, sowie die objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehleraufschaltung zunächst für den FBA- und darauf folgend für den RWA-Fehler berichtet.

###### 3.1.2.1 Fehlerunabhängige Ergebnisse

Die Erhebung der allgemein empfundenen Schwierigkeit der Manöver erfolgte in Anlehnung an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) über drei Items, bezogen auf die mentalen Anforderungen, die körperlichen Anforderungen sowie die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Skala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch). Der Fragebogen wurde zu Beginn der Testung (im Anschluss an die Eingewöhnungsfahrt) sowie vor Beendigung der Testung (im Anschluss an die Fahrt 5) eingesetzt. Zur inferenzstatistischen Analyse der Lernkurve erfolgte ein Vergleich der Anforderungen von

Beginn und Ende der Fahrt mittels gepaartem  $t$ -Test. In die Analyse einbezogen wurden alle Versuchspersonen, welche für beide Fehlerfälle valide Datensätze aufwiesen.

Zu beiden Befragungszeitpunkten wurden die drei Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom bezogen auf die mentalen Anforderungen in einem niedrigen bis mittleren Bereich auf der 20-stufigen Skala eingeordnet. Das Manöver Slalom erscheint mit den vergleichsweise höchsten mentalen Anforderungen einherzugehen und die Geradeausfahrt mit den geringsten. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 4. Im Vergleich zum Beginn der Testung werden alle drei Manöver vor der letzten Fahrt (nach Runde 5) als mental signifikant weniger anspruchsvoll empfunden (Geradeausfahrt:  $t(21) = 5,1$ ,  $p < ,001$ ,  $d = 1,09$ ; Kreisfahrt:  $t(21) = 4,83$ ,  $p < ,001$ ,  $d = 1,03$ ; Slalom:  $t(21) = 4,7$ ,  $p < ,001$ ,  $d = 1,01$ ).

Tabelle 4

*Mentale Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Mentale Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	22	5,50	3,29	1	12
	Vor der letzten Runde	22	3,14	1,86	1	9
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	22	9,36	3,81	2	15
	Vor der letzten Runde	22	6,50	3,56	2	15
Slalom	Nach Eingewöhnung	22	11,18	3,94	2	16
	Vor der letzten Runde	22	8,14	4,32	2	19

Auch bezogen auf die körperlichen Anforderungen werden alle drei Manöver über die Testung hinweg als niedrig bis mittel anforderungsreich auf der 20-stufigen Skala empfunden. Auch hier wird das Manöver Slalom als am anforderungsreichsten bewertet, gefolgt von der Kreisfahrt und der Geradeausfahrt. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 5. Vor der letzten Fahrt werden alle drei Manöver als signifikant weniger körperlich anspruchsvoll empfunden als zu Beginn der Testung (Geradeausfahrt:  $t(21) = 2,1$ ,  $p = ,024$ ,  $d = 0,45$ , Kreisfahrt:  $t(21) = 2,97$ ,  $p = ,007$ ,  $d = 0,63$ ; Slalom:  $t(21) = 3,24$ ,  $p = ,004$ ,  $d = 0,69$ ).

Tabelle 5

*Körperliche Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Körperliche Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	22	3,45	2,67	1	9
	Vor der letzten Runde	22	2,77	1,63	1	8
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	22	6,95	3,17	2	13
	Vor der letzten Runde	22	5,64	3,20	2	12
Slalom	Nach Eingewöhnung	22	10,00	4,41	3	17
	Vor der letzten Runde	22	8,00	4,13	2	17

Ihre eigene Leistung schätzen die Versuchspersonen über den Verlauf der Testung und für alle Manöver in einem hohen Bereich auf der 20-stufigen Skala ein, wobei die Leistung am höchsten für das Manöver Geradeausfahrt und am vergleichsweise geringsten für das Manöver Slalom eingeschätzt wurde. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 6. Am Ende der Testung werden die Leistungen im Vergleich zum Beginn der Testung in jedem Manöver signifikant besser eingeschätzt (Geradeausfahrt:  $t(21) = -4,37$ ,  $p < ,001$ ,  $d = -0,93$ ; Kreisfahrt:  $t(21) = -3,78$ ,  $p = ,001$ ,  $d = -0,81$ ; Slalom:  $t(21) = -4,37$ ,  $p < ,001$ ,  $d = -0,93$ ).

Tabelle 6

*Einschätzung der eigenen Leistung in den Manövern Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Einschätzung der eigenen Leistung						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	22	17,14	2,70	10	20
	Vor der letzten Runde	22	18,50	1,82	13	20
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	22	14,95	3,18	8	20
	Vor der letzten Runde	22	17,32	2,15	13	20
Slalom	Nach Eingewöhnung	22	14,18	3,66	8	20
	Vor der letzten Runde	22	16,41	2,46	12	20

### 3.1.2.2 Fehlerspezifische Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Ergebnisse zur Prüfung der Kontrollierbarkeit der beiden Fehlerbilder *FBA Selfsteer + Loss of Feedback* und *Geblockter RWA* eingegangen. Im Anschluss erfolgt separat für beide Fehler zunächst die Darstellung der subjektiven Ergebnisse hinsichtlich des Erlebens der Fehleraufschaltung und daran anschließend der objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehlerereignisse.

#### 3.1.2.2.1 Kontrollierbarkeit – Hypothesenprüfung

Für die erste Teilstudie gilt sowohl für den im Manöver Kreisfahrt aufgeschalteten FBA-Fehler *Selfsteer + Loss of Feedback*, als auch für den im Slalom aufgeschalteten RWA-Fehler *Geblockter RWA*, dass 100% der Versuchspersonen, welche valide Datensätze aufwiesen, die Fahrspur nach Fehleraufschaltung nicht verlassen haben. 100% der Datensätze umfassen dabei mindestens  $N = 20$  Datensätze. Die Hypothese kann somit für die in diesem Studienteil ausgewählte Kombination aus Fahrzeug und Fehlern beibehalten werden. Im Rahmen der durchgeführten Studie waren beide Fehler auf dem von Experten festgelegten C0-Level für alle Versuchspersonen kontrollierbar.

#### 3.1.2.2.2 Fehlerbild: FBA Selfsteer + Loss of Feedback

Bezogen auf das Fehlerbild *FBA Selfsteer + Loss of Feedback* werden nachfolgend die Ergebnisse hinsichtlich der objektiven Fahrzeugmessdaten zur Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge des Fehlers sowie der subjektiven Wahrnehmung der Aufschaltung berichtet.

#### 3.1.2.2.3 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistischen Verteilungen der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das Fehlerbild *FBA Selfsteer + Loss of Feedback* im SUV 1 sind in Abbildung 12 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierrate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug bei dem untersuchten Fehlerbild sind zusätzlich in Tabelle 7 zusammengefasst. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 12 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig.

Im vorliegenden Fall zeigt der SUV 1 im Vergleich zum Kompakt 1 bezüglich des Fehlerbildes *FBA Selfsteer + Loss of Feedback* tendenziell etwas geringere Störeinflüsse in Bezug auf die Lenkreaktion der Fahrer und die resultierende Fahrzeugdynamik. Hierbei ist allerdings zu



beachten, dass die Aufschaltdauer des Momentensprungs im SUV 1 mit 10 ms auch nur halb so lang wie die Aufschaltdauer des Momentensprungs im Kompakt 1 ist.

Abbildung 12

*Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störlenrate, Störquerbeschleunigung und Störgierrate für das Fehlerbild FBA Selfsteer + Loss of Feedback*

(grau: SUV 1; weiß: Kompakt 1)

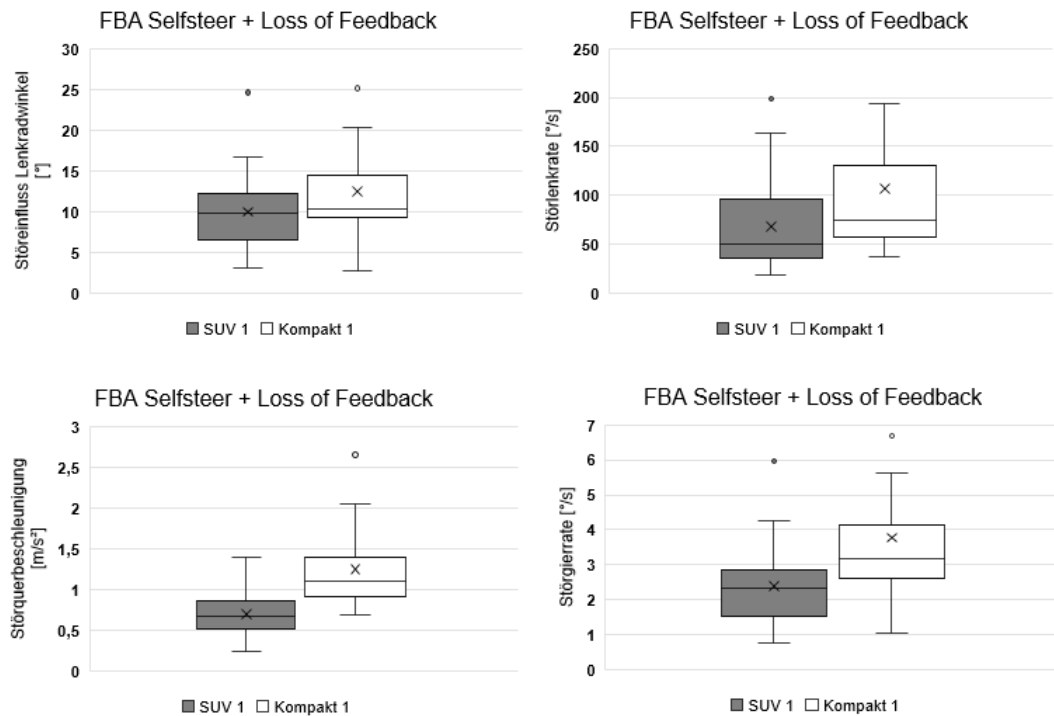


Tabelle 7

*Deskriptive Statistikennwerte Fehlerbild FBA Selfsteer + Loss of Feedback (SUV 1)*

Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
SUV 1	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	24	10,01	4,70	9,77	3,13	24,64
	Störlenrate [°/s]	24	68,47	46,76	50,63	19,44	198,88
	Störquerbeschleunigung [m/s²]	24	0,70	0,27	0,67	0,24	1,40
	Störgierrate [°/s]	24	2,41	1,16	2,32	0,78	5,98

### 3.1.2.2.4 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

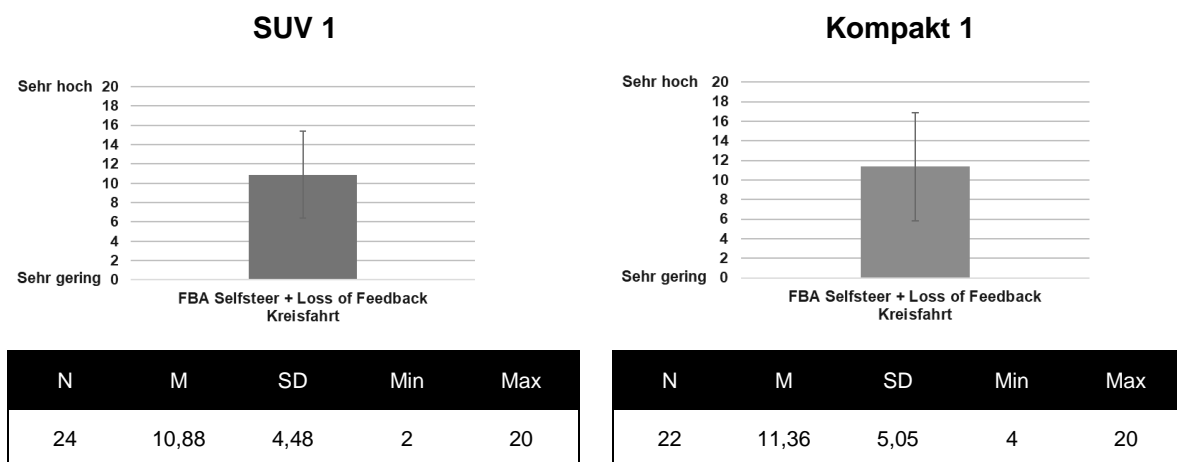
Im Folgenden wird zunächst auf die wahrgenommene Schwierigkeit des Manövers Kreisfahrt im Kontext der Aufschaltung des Fehlers eingegangen. Die Erhebung erfolgte über die drei Items angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) hinsichtlich der erlebten mentalen und körperlichen Anforderungen sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung

mittels einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch). Aufgrund dessen, dass der gleiche Fehlertyp auch in der Teilstudie 3 (für Details siehe 4.3) unter Verwendung des Versuchsfahrzeugs Kompakt 1 erfolgte, werden im Folgenden die Ergebnisse dieser Teilstudie bereits hier hinsichtlich der wahrgenommenen Schwierigkeit des Manövers im Fehlerfall als Vergleichsbasis dargestellt. Es sei an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass potentielle Unterschiede in den Ergebnissen beider Teilstudien lediglich dargestellt jedoch nicht erklärt werden können. Eine Erklärung ist aufgrund der gleichzeitigen Manipulation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nicht möglich. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze.

In der Teilstudie mit dem Versuchsfahrzeug SUV 1 und dem verwendeten X6 als Versuchsfahrzeug wurden im Anschluss an die Aufschaltung des Fehlers *FBA Selfsteer + Loss of Feedback* im Manöver Kreisfahrt die mentalen Anforderungen durchschnittlich im mittleren Bereich der 20-stufigen Skala eingeordnet ( $M = 10,88$ ,  $SD = 4,48$ ). Ebenso wurden die mentalen Anforderungen in der Teilstudie mit dem Kompakt 1 als Versuchsfahrzeug durchschnittlich im mittleren Bereich der Antwortskala eingeordnet ( $M = 11,36$ ,  $SD = 5,05$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 13.

Abbildung 13

*Mentale Anforderungen des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers FBA Selfsteer + Loss of Feedback erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

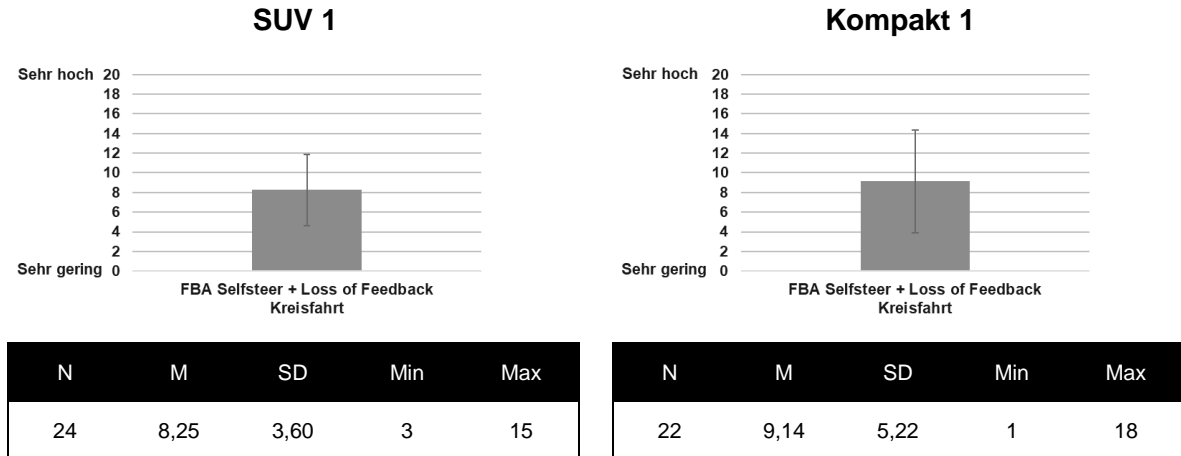


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Kreisfahrt wurden mit Fehleraufschaltung in der Teilstudie mit dem Versuchsfahrzeug SUV 1 im mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala eingeschätzt ( $M = 8,25$ ,  $SD = 3,60$ ). Dies war ebenfalls der Fall in der Teilstudie mit dem Versuchsfahrzeug Kompakt 1 ( $M = 9,14$ ,  $SD = 5,22$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 14.

Abbildung 14

*Körperliche Anforderungen des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers FBA Selfsteer + Loss of Feedback erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2016).*

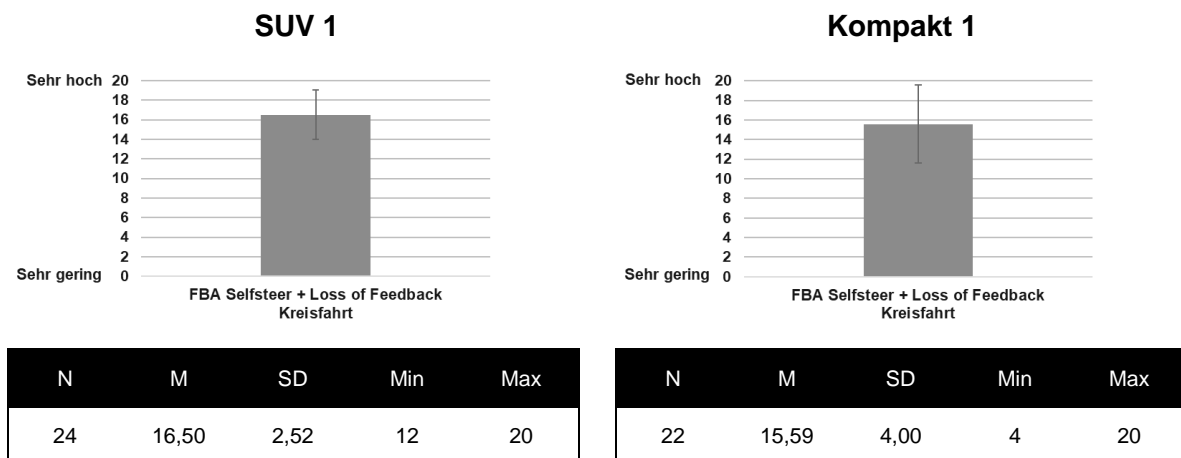


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Kreisfahrt mit Fehleraufschaltung wurde in beiden Teilstudien im mittleren bis hohen Bereich auf der 20-stufigen Antwortskala eingeschätzt (SUV 1:  $M = 16,50$ ,  $SD = 2,52$ ; Kompakt 1:  $M = 15,59$ ,  $SD = 4,00$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 15.

Abbildung 15

*Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers FBA Selfsteer + Loss of Feedback erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

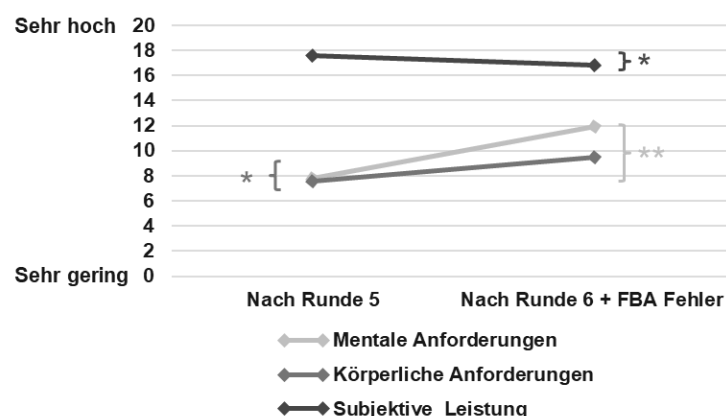


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Mit dem Ziel, den Einfluss des Fehlers auf die wahrgenommene Schwierigkeit des Manövers herauszufinden, wurden die wahrgenommenen mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie die subjektive Leistungseinschätzung nach Runde 5 ohne Fehleraufschaltung mit jenen nach erfolgter Fehleraufschaltung in Runde 6 verglichen. Es wurde angenommen, dass die Lernkurve der Versuchspersonen hinsichtlich der Absolvierung der Manöver zu diesem Zeitpunkt der Testung abgeflacht ist und Unterschiede zwischen den Bewertungen somit auf die Fehleraufschaltung zurück zu führen sind. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der randomisierten Aufschaltung der beiden Fehler (RWA- und FBA-Fehler) auf die Runden 3 und 6, lediglich die Hälfte der generierten validen Datensätze (in denen die Aufschaltung des jeweiligen Fehlers in Runde 6 erfolgte) in die Analyse einbezogen werden konnten. Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs der beiden Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem  $t$ -Test. In der Teilstudie 1 wurde deutlich, dass sowohl die mentalen, als auch die körperlichen Anforderungen in der letzten Runde mit Aufschaltung des FBA-Fehlers *Selfsteer + Loss of Feedback* im zugehörigen Manöver Kreisfahrt im Vergleich zur Absolvierung des Manövers in der vorherigen Runde 5 signifikant anstiegen, wenngleich sie den mittleren Ausprägungsbereich nicht überschritten (mentale Anforderungen:  $t(10) = 3,56$ ,  $p = ,003$ ,  $d = 1,08$ ; körperliche Anforderungen:  $t(10) = 2,06$ ,  $p = ,034$ ,  $d = 0,62$ ). Darüber hinaus sank die subjektiv empfundene Leistung signifikant, wurde jedoch nach wie vor in einem hohen Bereich wahrgenommen ( $t(10) = -2,19$ ,  $p = ,027$ ,  $d = -0,66$ ). Für eine graphische Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 16.

Abbildung 16

Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Kreisfahrt in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des FBA-Fehlers *Selfsteer + Loss of Feedback*. (Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)



Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	11	7,82	3,66	3	15
	Nach Runde 6 + Fehler	11	11,91	4,87	2	20
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	11	7,55	2,98	3	12
	Nach Runde 6 + Fehler	11	9,45	3,24	3	14
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	11	17,55	1,92	15	20
	Nach Runde 6 + Fehler	11	16,82	2,48	12	20

Mit Aufschaltung des Fehlers erfolgte eine Verhaltensbeobachtung der Versuchspersonen durch die Versuchsleitung hinsichtlich einer initialen Fahrer\*innen-Reaktion auf das Ereignis. Hier zeigten 75% der Versuchspersonen im unmittelbaren Zeitraum des Auftretens des FBA-Fehlers eine für die Versuchsleitung merkbare Reaktion, welche in der überwiegenden Mehrheit in Form einer verbalen Äußerung deutlich wurde ( $n = 14$ ) und seltener durch eine wahrgenommene körperliche Reaktion, etwa „Zusammensucken“ ( $n = 2$ ). Um herauszufinden, ob die Versuchspersonen die Fehleraufschaltung bemerkt haben, wurden sie im Anschluss an die Absolvierung des Manövers Kreisfahrt in dem die Fehleraufschaltung erfolgte, gefragt, ob sie etwas Besonderes bemerkt haben. Diese Frage bejahten 100% der Versuchspersonen. Bei der Beschreibung des Ereignisses wurde am häufigsten ein Eingriff bzw. ein Schlag an der Lenkung erwähnt ( $n = 18$ ). Ebenfalls wiederholt, erfolgte die Erwähnung eines Knackens in der Lenkung ( $n = 7$ ) und zudem wurde mehrfach die Vermutung geäußert eine Pylone oder etwas Anderes überfahren zu haben ( $n = 5$ ).

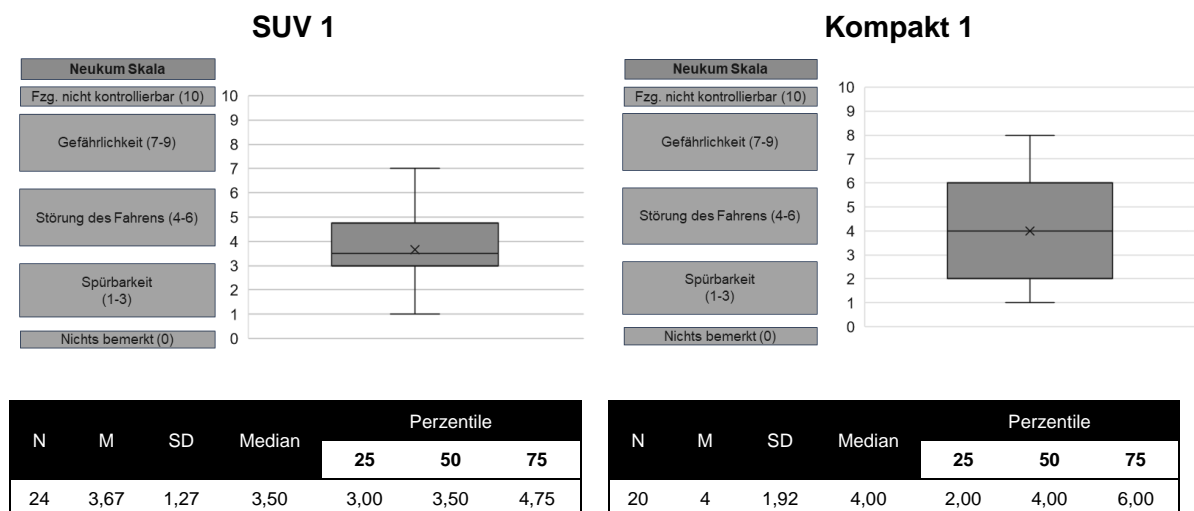
Anschließend an die initiale Beschreibung des erlebten Ereignisses erfolgte eine Auseinandersetzung mit der Reaktion auf die Fehleraufschaltung. Dies wurde in die drei Aspekte der affektiven, kognitiven und behavioralen Reaktion unterteilt. Zur Erfassung der affektiven Reaktion wurden die Versuchspersonen gebeten zu beschreiben welche Gefühle mit der Fehleraufschaltung einhergingen.  $n = 15$  Personen erwähnten in diesem Kontext ein Gefühl des Erschreckens bzw. der Überraschung.  $n = 7$  Personen äußerten, dass sie keine Angst empfunden hätten, sondern das Ereignis eher mit einer neutralen Haltung wahrgenommen hätten. Jeweils  $n = 3$  Personen gaben entweder an Besorgnis / Angst empfunden zu haben oder eine Verwirrung hinsichtlich des gerade Geschehenen. Die Erfassung der kognitiven Reaktion erfolgte über die Frage was die Personen zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung gedacht haben. Die am häufigsten genannte Antwort war, die Annahme eine Pylone oder etwas Anderes umgefahren zu haben ( $n = 11$ ).  $n = 5$  Mal wurde der Gedanke geäußert, dass etwas Anders / nicht in Ordnung sei. Jeweils  $n = 3$  Mal wurde angemerkt, dass es mit Bemerkten des Ereignisses zu der Auseinandersetzung mit der Frage „Was war das?“ oder gedanklichen Fahrhinweisen (z.B. „Kontrolle behalten“) gekommen sei. Zur Erfassung der behavioralen Reaktion wurden die Versuchspersonen gebeten zu beschreiben was sie infolge des Ereignisses getan haben. Die häufigste Antwort ( $n = 11$ ) lautete normal / ruhig weitergefahren. Am zweit-häufigsten ( $n = 8$ ) wurde eine Reduktion der Geschwindigkeit erwähnt und am dritt-häufigsten ( $n = 5$ ) berichteten die Versuchspersonen

das Lenkrad fester gehalten / kontrolliert zu haben. Sollte sich das Ereignis wiederholen würden 66,67 % ( $n = 16$ ) der Versuchspersonen wieder genauso reagieren wie von ihnen beschrieben und 33,33 ( $n = 8$ ) % würden anders reagieren. Von den Personen, die anders reagieren würden, war die häufigste Nennungen ( $n = 4$ ), dass sie sich weniger erschrecken und entsprechend ruhiger reagieren würden. Jeweils  $n = 2$  Mal wurde erwähnt, dass entweder keine Reduktion der Geschwindigkeit erfolgen würde, oder es zu einer Kontrolle kommen würde weshalb das Ereignis geschehen ist.

Die Erhebung der subjektiv empfundenen Kritikalität der Fehleraufschaltung erfolgte mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003). Auch an dieser Stelle erfolgt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Ergebnissen welche für den gleichen Fehlertyp in der Teilstudie 3 (für Details siehe 3.3) mit dem Fahrzeug Kompakt 1 erfolgte. Wiederum muss hierbei berücksichtigt werden, dass potentielle Unterschiede in den Ergebnissen der beiden Teilstudien lediglich dargestellt jedoch, aufgrund der gleichzeitigen Manipulation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung, nicht erklärt werden können. Für die Analyse wurden alle validen Datensätze berücksichtigt. Die mittlere subjektiv wahrgenommene Kritikalität bei Erleben der Fehleraufschaltung im SUV 1 wurde auf der 11-stufigen Skala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar) im Bereich eines hohen Niveaus in der Kategorie Spürbarkeit bis zu einer niedrigen Ausprägung in der Kategorie Störung des Fahrens eingeordnet ( $M = 3,67$ ,  $SD = 1,27$ ). Auch bei der Teilstudie welche mit dem Fahrzeug Kompakt 1 durchgeführt wurde, wurde das Ereignis der Fehleraufschaltung durchschnittlich im Bereich eines leichten Niveaus der Kategorie Störung des Fahrens eingeordnet ( $M = 4$ ,  $SD = 1,92$ ). Die Streuung der Werte um den Mittelwert erscheint hier etwas breiter. Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 17.

Abbildung 17

*Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlertypen FBA Selfsteer + Loss of Feedback in den beiden Teilstudien mit den Fahrzeugen SUV 1 und Kompakt 1 erhoben mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003).*



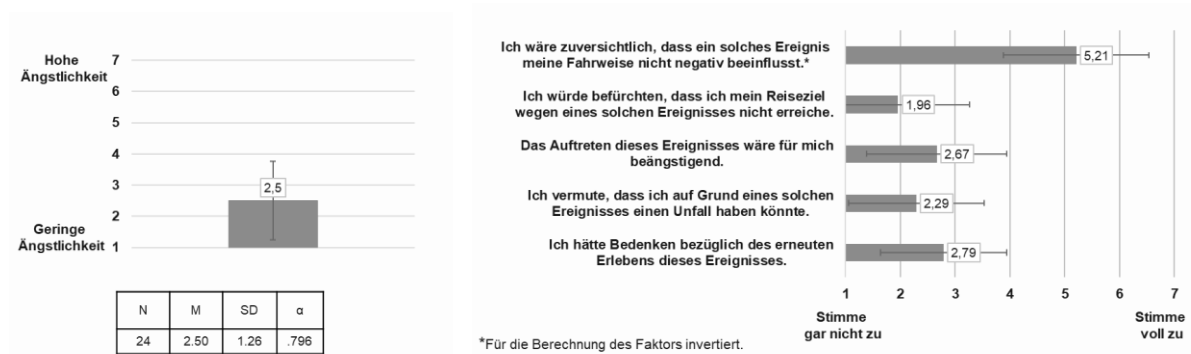
*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die Erhebung des Situationserlebens erfolgte mittels angepasster Ratingskalen der Faktoren *Anxiety* und *Perceived Safety* des *Car Technology Acceptance Models* (Osswald et al., 2012). Erhoben wurden diese Daten von allen Versuchspersonen, die angegeben haben, den Fehler bemerkt zu haben.

Die Ängstlichkeit mit Auftreten des Fehlerereignisses wurde von den Versuchspersonen durchschnittlich in einem niedrigen Bereich der 7-stufigen Skala (1 = geringe Ängstlichkeit – 7 = hohe Ängstlichkeit) eingeordnet ( $M = 2,50$ ;  $SD = 1,26$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors *Anxiety* und der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 18.

Abbildung 18

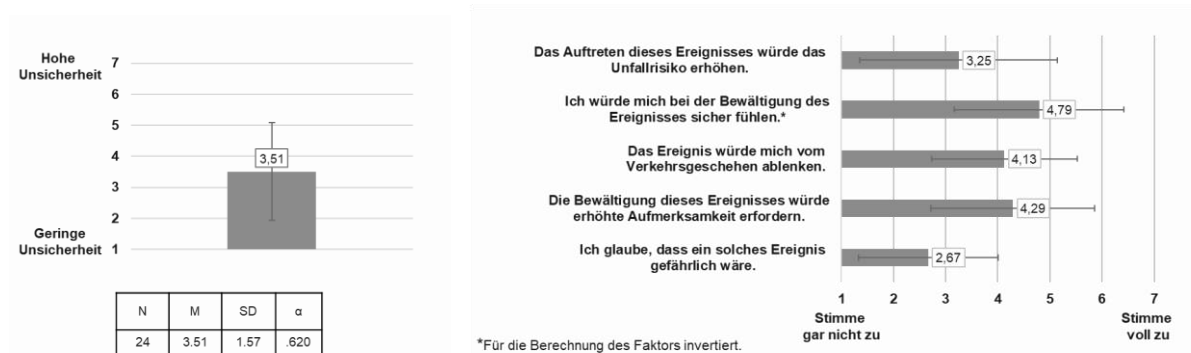
Ergebnisse des Faktors *Anxiety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses *FBA Selfsteer + Loss of Feedback*.



Die wahrgenommene Unsicherheit mit Auftreten des Fehlers wurde in einem mittleren Bereich der 7-stufigen Skala (1 = geringe Unsicherheit – 7 = hohe Unsicherheit) eingeordnet ( $M = 3,51$ ;  $SD = 1,57$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* und der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 19.

Abbildung 19

Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses *FBA Selfsteer + Loss of Feedback*.



### 3.1.2.2.5 Fehlerbild: *Geblockter RWA*

Nachfolgend werden die Ergebnisse hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung der Fehleraufschaltung, sowie die objektiven Ergebnisse zur Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge der Aufschaltung des Fehlerbildes *Geblockter RWA* im Manöver Slalom beschrieben.

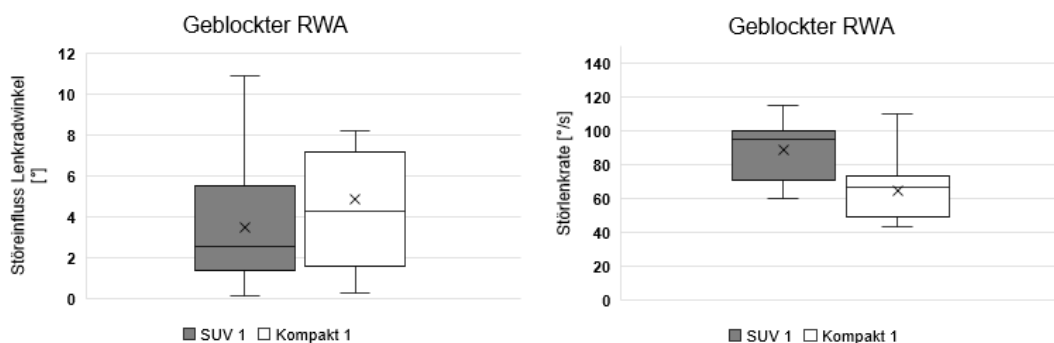
### 3.1.2.2.6 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistischen Verteilungen der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das Fehlerbild *Geblockter RWA* im SUV 1 sind in Abbildung 20 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug bei dem untersuchten Fehlerbild sind zusätzlich in Tabelle 8 zusammengefasst. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 20 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig.

Im vorliegenden Fall zeigt der SUV 1 im Vergleich zum Kompakt 1 bezüglich des Fehlerbildes *Geblockter RWA* tendenziell einen etwas geringeren Störeinfluss hinsichtlich des Lenkwinkels. Die infolge der Fehleraufschaltung gemessenen Störleakraten fallen dagegen etwas größer als im Kompakt 1 aus. Hinsichtlich der fahrdynamischen Störgrößen Störquerbeschleunigung und Störgierate sind keine großen Unterschiede zwischen den beiden Fahrzeugen erkennbar.

Abbildung 20

*Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störleakrate, Störquerbeschleunigung und Störgierate für das Fehlerbild Geblockter RWA (grau: SUV 1; weiß: Kompakt 1)*





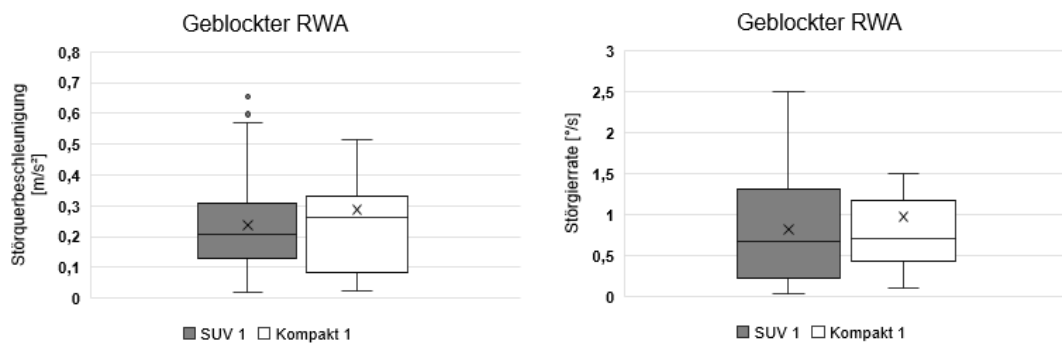


Tabelle 8

*Deskriptive Statistik* Kennwerte Fehlerbild Geblockter RWA (SUV 1)

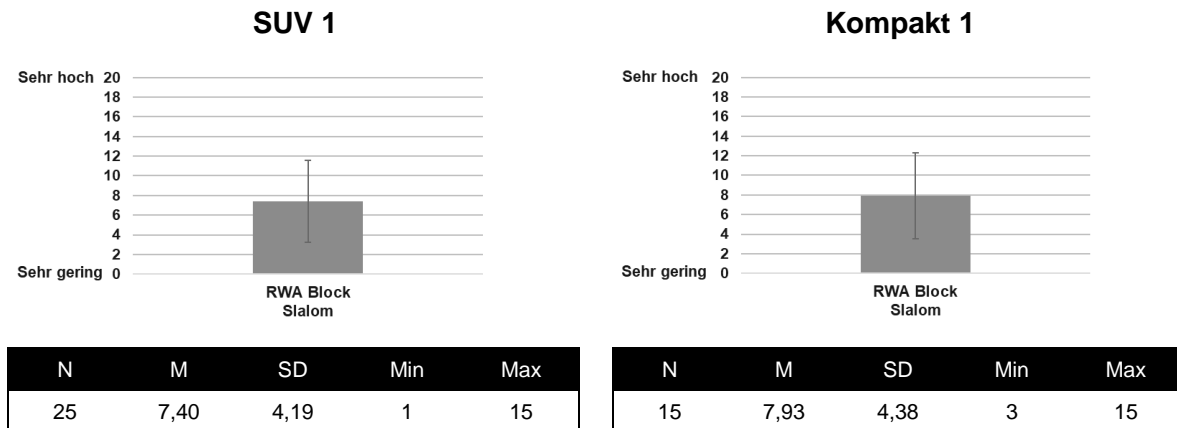
Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
SUV 1	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	25	3,48	2,98	2,53	0,15	10,87
	Störlenkrate [°/s]	25	88,77	15,87	94,93	60,20	114,97
	Störquerbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	25	0,24	0,16	0,21	0,02	0,65
	Störgierrate [°/s]	25	0,81	0,69	0,67	0,03	2,50

### 3.1.2.2.7 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

Zunächst wird die wahrgenommene Schwierigkeit des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung beschrieben, welche mittels der drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnten Items hinsichtlich der erlebten mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch) erhoben wurde. Wiederum erfolgt an dieser Stelle neben der Darstellung der Ergebnisse für den Studienteil mit dem Fahrzeug SUV 1 eine Darstellung der Ergebnisse, welche im Rahmen der Teilstudie 3 (für Details siehe 3.3) mit dem Fahrzeug Kompakt 1 für den gleichen Fehlertyp erfolgte. Eine Erklärung potentieller Unterschiede in den Ergebnissen ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug nicht möglich. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze. In beiden Teilstudien wurden mit Aufschaltung des Fehlers *Geblockter RWA* die mentalen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Slalom im mittleren Bereich der 20-stufigen Skala eingeordnet (SUV 1:  $M = 7,40$ ,  $SD = 4,19$ ; Kompakt 1:  $M = 7,93$ ,  $SD = 4,38$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 21.

Abbildung 21

*Mentale Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers Geblockter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

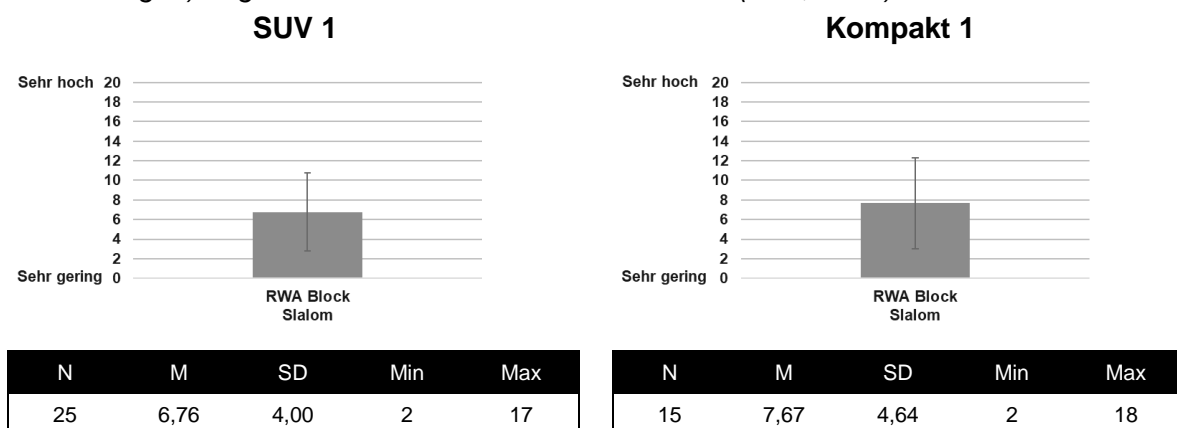


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung wurden in beiden Teilstudien in einem niedrigen bis mittleren Bereich der 20-stufigen Skala eingeschätzt (SUV 1:  $M = 6,76$ ,  $SD = 4,00$ ; Kompakt 1:  $M = 7,67$ ,  $SD = 4,64$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 22.

Abbildung 22

*Körperliche Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers Geblockter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

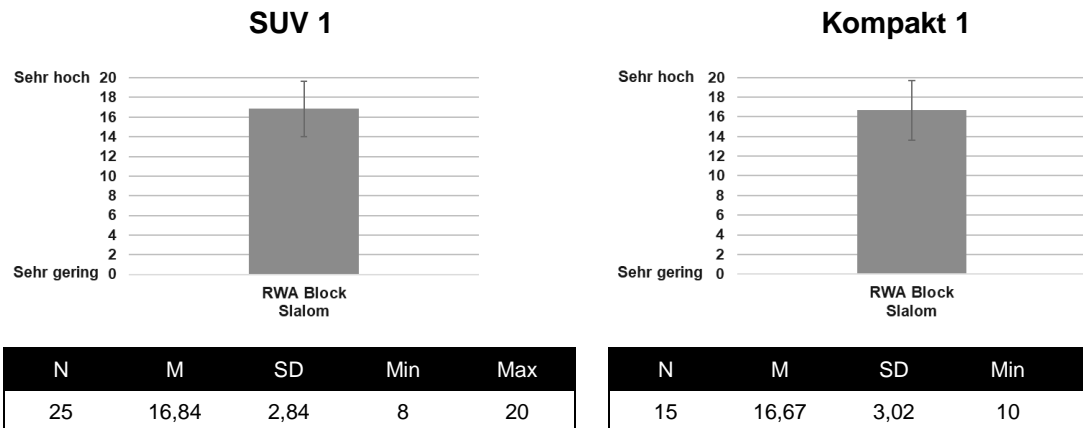


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung wurde in beiden Teilstudien im mittleren bis hohen Bereich auf der 20-stufigen Antwortskala eingeschätzt (SUV 1:  $M = 16,84$ ,  $SD = 2,84$ ; Kompakt 1:  $M = 16,67$ ,  $SD = 3,02$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 23.

Abbildung 23

Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers Geblockter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).

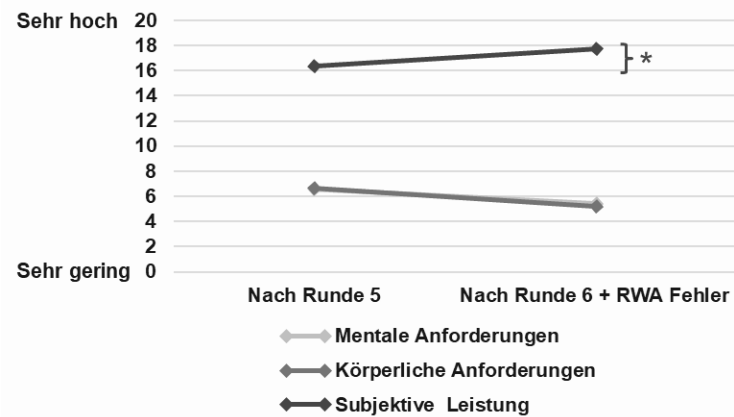


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Im Sinne der Identifikation des Einflusses der Fehleraufschaltung auf die wahrgenommene Schwierigkeit des Manövers Slalom erfolgte ein Vergleich der empfundenen mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie der subjektiven Leistungseinschätzung nach Runde 5 ohne Fehleraufschaltung mit denen nach erfolgter Fehleraufschaltung in Runde 6. Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs der beiden Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem *t*-Test. Es wurde deutlich, dass sowohl die mentalen als auch die körperlichen Anforderungen im Vergleich der vorletzten und der letzten Runde mit Aufschaltung des Fehlers *Geblockter RWA* konstant bleiben (mentale Anforderungen:  $t(11) = 1,08$ ,  $p = ,15$ ; körperliche Anforderungen:  $t(11) = 1,53$ ,  $p = ,08$ ). Gleichzeitig steigt die subjektiv empfundene Leistung signifikant an ( $t(11) = -2,24$ ,  $p = ,024$ ,  $d = -0,65$ ). Für eine graphische Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 24.

Abbildung 24

Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Slalom in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des Fehlers Geblockter RWA. (Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)



Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	12	6,58	3,55	2	15
	Nach Runde 6 + Fehler	12	5,42	3,68	1	13
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	12	6,67	3,68	2	15
	Nach Runde 6 + Fehler	12	5,17	2,95	2	11
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	12	16,33	2,46	13	20
	Nach Runde 6 + Fehler	12	17,75	2,09	13	20

Die Beobachtung des Verhaltens der Versuchspersonen zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung durch die Versuchsleitung ergab, dass keine der Versuchspersonen eine merkliche Reaktion auf die Aufschaltung des Fehlers *Geblockter RWA* zeigte. Auf die Frage, ob die Versuchspersonen im relevanten Manöver Slalom etwas Besonderes bemerkt haben, antworteten 68 % der Versuchspersonen ( $n = 17$ ), dass sie nichts bemerkt haben. 28 % ( $n = 7$ ) erwiderten, dass sie etwas bemerkt haben und die damit am häufigsten einhergehende Beschreibung war ein Eingriff in die Lenkung / Korrektur ( $n = 4$ ), gefolgt von der Annahme eine Pylone oder etwas Anderes überfahren zu haben ( $n = 2$ ). 4 % der Versuchspersonen ( $n = 1$ ) war unsicher, ob etwas Besonderes aufgefallen ist.

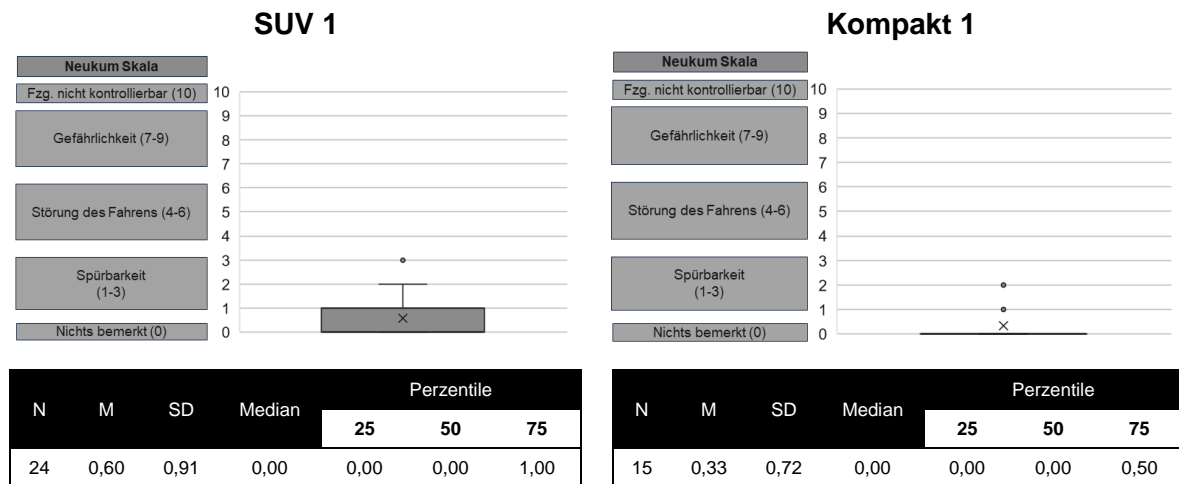
Die Versuchspersonen, welche angaben, etwas Besonderes bemerkt zu haben, wurden im Folgenden nach ihrer affektiven, kognitiven und behavioralen Reaktion auf die

Fehleraufschaltung gefragt. Die am häufigsten erwähnte Beschreibung der affektiven Reaktion war Neutral / Nichts ( $n = 5$ ), ebenso lauteten zwei weitere Einzelmeinungen (jeweils  $n = 1$ ) keine Irritation und kein unangenehmes Gefühl und wiesen damit in eine ähnliche Richtung. Weitere Einzelmeinungen (jeweils  $n = 1$ ) waren leichtes Erschrecken, Verwunderung und kurze Verunsicherung. Auch auf die Frage nach der kognitiven Reaktion war die am häufigsten erwähnte Antwort, dass an Nichts Besonderes gedacht wurde ( $n = 3$ ). Ebenso wurde mehrfach ( $n = 2$ ) erwähnt, dass gedacht wurde, über eine Pylone oder etwas Anderes gefahren zu sein. Gedanken welche jeweils von einzelnen Personen ( $n = 1$ ) erwähnt wurden, waren „Nicht schlimm“, „Ich habe die Spur verlassen“, „Was war das?“ und „Etwas ist anders“. Angesprochen auf die behaviorale Reaktion gaben die meisten der Versuchspersonen, welche die Fehleraufschaltung bemerkt habe an, unverändert weitergefahren zu sein ( $n = 7$ ). Eine Person ( $n = 1$ ) gab an das Lenkrad stärker festgehalten zu haben. Auf die Frage, ob die Versuchspersonen anders reagieren würden, sollte sich das Ereignis wiederholen, antworteten 100 % der Versuchspersonen ( $n = 8$ ) mit Nein.

Die Bewertung der subjektiv empfundenen Kritikalität des Ereignisses mittels 11-stufiger Neukum Skala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar) (Neukum & Krüger, 2003) ergab, dass der Fehler *Geblockter RWA* in der Teilstudie durchgeführt mit Fahrzeug SUV 1 entweder nicht bemerkt, oder auf einem niedrigen Niveau der Kategorie Spürbarkeit eingeordnet wurde ( $M = 0,60$ ,  $SD = 0,91$ ). Für die Analyse wurden alle validen Datensätze berücksichtigt. Zur Gegenüberstellung wird im Folgenden auf die Bewertung der subjektiven Kritikalität bei Erleben des gleichen Fehlertyps in der Teilstudie 3 (für Details siehe 3.3) mit dem Versuchsfahrzeug Kompakt 1 eingegangen. Wie oben bereits angemerkt, soll auch an dieser Stelle erwähnt werden, dass potentielle Unterschiede in den Ergebnissen der Teilstudien lediglich dargestellt, jedoch aufgrund der gleichzeitigen Manipulation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nicht erklärt werden können. Auch in der Teilstudie mit dem Kompakt 1 wurde der Fehler *Geblockter RWA* entweder nicht bemerkt oder auf einem niedrigen Niveau der Kategorie Spürbarkeit eingeordnet ( $M = 0,33$ ,  $SD = 0,72$ ). Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 25.

Abbildung 25

Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlertypen Geblockter RWA in den beiden Teilstudien mit den Fahrzeugen SUV1 und Kompakt 1 erhoben mittels Neukum-Skala (Neukum & Krüger, 2003).

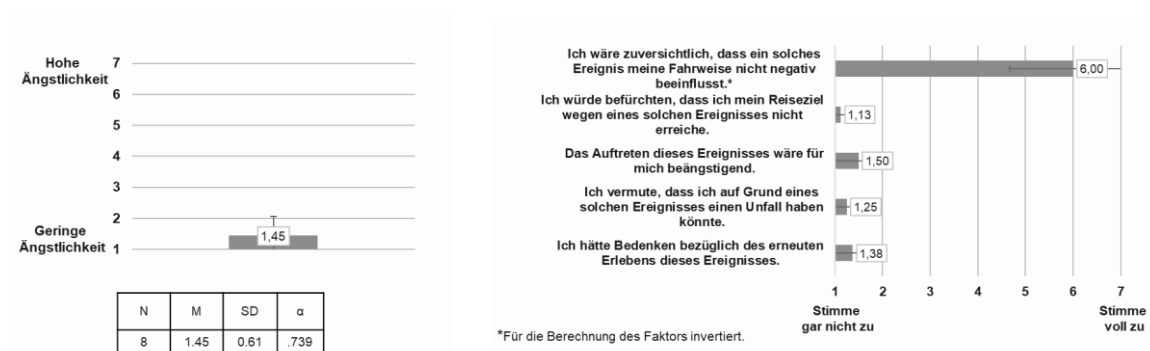


Anmerkung. Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die Ängstlichkeit bei Bemerkern des Fehlerereignisses erscheint auf einem niedrigen Niveau der 7-stufigen Ratingskala (1 = geringe Ängstlichkeit – 7 = hohe Ängstlichkeit) ( $M = 1,45$ ,  $SD = 0,61$ ). Für eine Darstellung des Faktors und der hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 26.

Abbildung 26

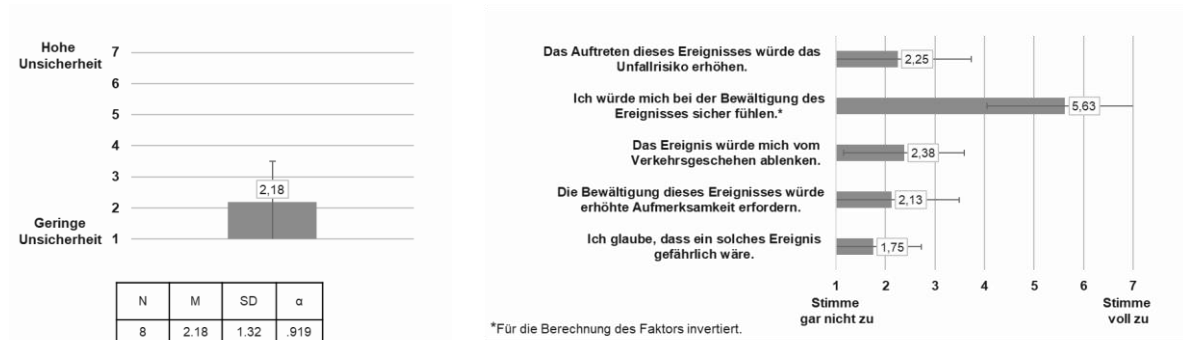
Ergebnisse des Faktors Anxiety (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses Geblockter RWA.



Die wahrgenommene Unsicherheit wird bei Bemerkern des Fehlers in einem niedrigen Bereich der 7-stufigen Ratingskala (1 = geringe Unsicherheit – 7 = hohe Unsicherheit) eingeordnet ( $M = 2,18$ ,  $SD = 1,32$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors sowie der zu Grunde liegenden Einzelitems siehe Abbildung 27.

Abbildung 27

Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses *Geblockter RWA*.

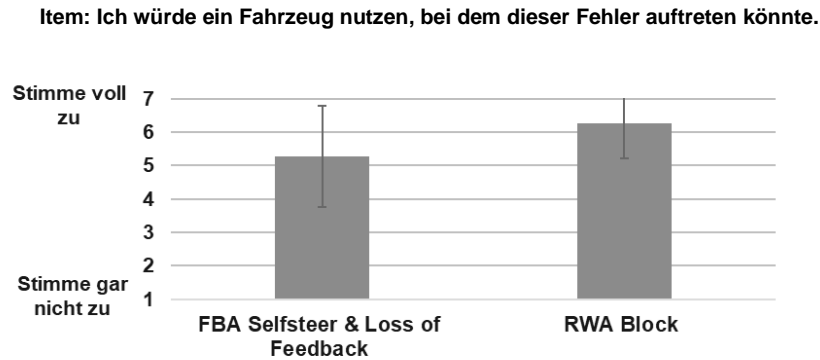


### 3.1.2.2.8 Nachbefragung

Im Anschluss an die Aufklärung der Versuchspersonen hinsichtlich des Studiengegenstands nach Durchführung der Versuchsfahrten erfolgte eine Nachbefragung. Die Versuchspersonen beantworteten die Fragen hierbei lediglich sofern sie den jeweiligen Fehler im Rahmen der Versuchsdurchführung bemerkt hatten. Zunächst wurden die Versuchspersonen gebeten anzugeben, inwiefern sie der Aussage „Ich würde ein Fahrzeug nutzen, bei dem dieser Fehler auftreten könnte“ zustimmen. Die 36,36 % der Versuchspersonen ( $n = 8$ ), welche den Fehler *Geblockter RWA* bemerkt haben, gaben auf einer 7-stufigen Skala (1 = stimme gar nicht zu – 7 = stimme voll zu) an ein Fahrzeug eher zu nutzen, bei dem ein solcher Fehler auftreten könnte ( $M = 6,25$ ,  $SD = 1,04$ ). Der FBA-Fehler *Selfsteer + Loss of Feedback* wurde von allen Versuchspersonen ( $N = 22$ ) bemerkt und die Nutzungsintention erscheint hier deskriptiv geringer auszufallen ( $M = 5,27$ ,  $SD = 1,52$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 28.

Abbildung 28

Nutzungsintention hinsichtlich eines Fahrzeuges, welches den erlebten Fehler FBA Selfsteer + Loss of Feedback oder Geblockter RWA aufweisen könnte, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.



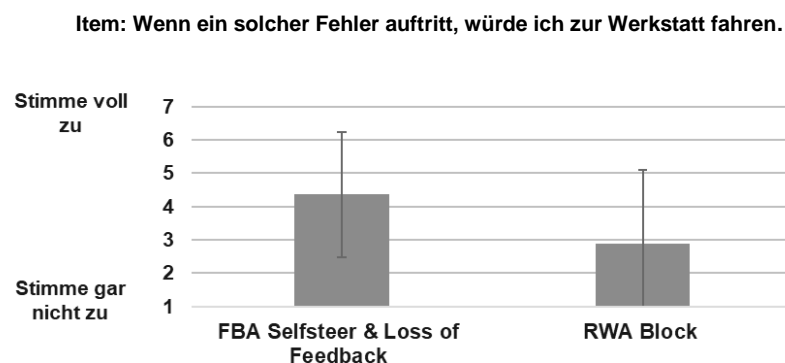
Fehler	N	M	SD	Min	Max
FBA Selfsteer + Loss of Feedback	22	5,27	1,52	2	7
RWA Block	8	6,25	1,04	5	7

Anmerkung. Die Beantwortung des Items erfolgte lediglich durch Versuchspersonen, die den jeweiligen Fehler im Versuchsdurchlauf bemerkt haben.

Darüber hinaus wurden die Versuchspersonen gebeten anzugeben, wie sehr sie der Aussage „Wenn ein solcher Fehler auftritt, würde ich zur Werkstatt fahren“ zustimmen. Die Versuchspersonen, die den RWA-Fehler bemerkt haben ( $n = 8$ ), gaben an dieser Aussage eher nicht zuzustimmen ( $M = 2,88$ ,  $SD = 2,23$ ). Für den FBA-Fehler scheinen die Versuchspersonen dieser Aussage im Durchschnitt weder zuzustimmen, noch diese abzulehnen ( $M = 4,36$ ,  $SD = 1,87$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 29.

Abbildung 29

Absicht eine Werkstatt aufzusuchen bei Auftreten der erlebten Fehler FBA Selfsteer + Loss of Feedback oder Geblockter RWA im eigenen Fahrzeug, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.





Fehler	N	M	SD	Min	Max
<b>FBA Selfsteer &amp; Loss of Feedback</b>	22	4,36	1,87	1	7
<b>RWA Block</b>	8	2,88	2,23	1	7

*Anmerkung.* Die Beantwortung des Items erfolgte lediglich durch Versuchspersonen, die den jeweiligen Fehler im Versuchsdurchlauf bemerkt haben.

### 3.1.3 Zusammenfassung Studie 1

Im Folgenden wird eine Übersicht hinsichtlich der Hauptergebnisse der durchgeführten Teilstudie 1 (Fahrzeug: SUV 1; Fehler: *FBA Selfsteer + Loss of Feedback / Geblockter RWA*) gegeben.

- Die Gestaltung des Parcours erscheint angemessen, die Versuchspersonen werden weder unter- noch überfordert.
- Es wird eine Lernkurve der Versuchspersonen über den Verlauf der Testung deutlich.
- Für beide Fehlerbilder konnte die aufgestellte Forschungshypothese beibehalten werden.
- Der Fehler *FBA Selfsteer + Loss of Feedback*
  - wurde von allen Versuchspersonen bemerkt;
  - steht in Verbindung mit einem signifikanten Anstieg der empfunden mentalen und körperlichen Anforderungen sowie einer empfundenen Verschlechterung der eigenen Leistung im betreffenden Fahrmanöver;
  - wird von den Versuchspersonen als Eingriff bzw. Schlag an der Lenkung beschrieben;
  - wird auf affektiver Ebene mehrheitlich mit Erschrecken und Überraschung assoziiert;
  - wird bezüglich der Kritikalität auf einem hohen Niveau der „Spürbarkeit“ bis zu einer leichten Ausprägung der Kategorie „Störung des Fahrens“ eingeordnet.
- Der Fehler *Geblockter RWA*
  - wurde von der Mehrheit der Versuchspersonen (68%) nicht bemerkt;
  - bewirkt keinen signifikanten Anstieg der empfunden mentalen und körperlichen Anforderungen sowie keine signifikante Verschlechterung der subjektiv empfundenen Leistung im betreffenden Fahrmanöver;
  - führte bei den Versuchspersonen, die den Fehler detektiert haben, nicht zu einer spezifischen affektiven oder behavioralen Reaktion;
  - wird bezüglich der Kritikalität auf einem niedrigen Niveau der „Spürbarkeit“ eingeordnet, wenn dieser von Versuchspersonen bemerkt wurde.

Die inhaltliche Diskussion der Ergebnisse der Teilstudien erfolgt übergeordnet für die gesamte Versuchsreihe in Abschnitt 4.

## 3.2 Studie 2

Die Durchführung des zweiten Studienteils erfolgte unter Verwendung des Versuchsfahrzeugs Kompakt 2 im Zeitraum vom 01. bis 06. April 2022. Bei den ausgewählten Fehlerbildern handelte es sich um den *FBA Sprung*, welcher im Manöver Slalom aufgeschaltet wurde und den *Ungeregelten RWA* im zugehörigen Manöver Kreisfahrt. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Studienteils detailliert dargestellt.

### 3.2.1 Stichprobe

Die Stichprobengröße beträgt  $N = 28$ , davon sind 18 Personen männlich. Das mittlere Alter beträgt  $M = 42,71$  Jahre ( $SD = 14,20$ ), wobei die jüngste Versuchsperson 21 Jahre und die älteste 63 Jahre alt ist. Die mittlere jährliche Fahrleistung beträgt  $M = 18.857,14$  km ( $SD = 10.372,56$  km) mit einer Spannbreite von 3.000 km bis 40.000 km. Keine der Versuchspersonen gibt zum Zeitpunkt der Durchführung an, eine nicht korrigierte Seh- oder Hörbeeinträchtigung zu haben.

### 3.2.2 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt aufgeteilt in die beiden Abschnitte fehlerunabhängige und fehlerspezifische Ergebnisse. Zunächst erfolgt der Bericht von Ergebnissen, welche sich von den Fehleraufschaltungen unabhängig, auf die allgemeine Schwierigkeit der gewählten Manöver im Sinne der Prüfung des gewählten Versuchsdesigns beziehen. Anschließend erfolgt die Darstellung der fehlerspezifischen Ergebnisse. In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Ergebnisse zur Prüfung der Kontrollierbarkeit beider Fehler (FBA und RWA) eingegangen. Darauf folgend werden die subjektiven Versuchsdaten hinsichtlich des Erlebens der Fehleraufschaltung, sowie die objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehleraufschaltung zunächst für den FBA- und darauf folgend für den RWA-Fehler berichtet.

#### 3.2.2.1 Fehlerunabhängige Ergebnisse

Die Erhebung der allgemein empfundenen Schwierigkeit der Manöver erfolgte angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) über drei Items bezogen auf die mentalen Anforderungen, die körperlichen Anforderungen sowie die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Skala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch) zu Beginn der Testung (im Anschluss an die Eingewöhnungsfahrt) sowie vor Beendigung der Testung (im Anschluss an die Fahrt 5). Zur inferenzstatistischen Analyse der Lernkurve erfolgte ein Vergleich der Anforderungen zu Beginn und Ende der Fahrt mittels gepaartem  $t$ -Test. In die Analyse einbezogen wurden alle Versuchspersonen, welche für beide Fehlerfälle valide Datensätze aufwiesen.

Zu beiden Befragungszeitpunkten wurden die drei Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom bezogen auf die mentalen Anforderungen in einem niedrigen bis mittleren Bereich auf der 20-stufigen Skala eingeordnet. Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Tabelle 9. Im

Vergleich zum Beginn der Testung werden alle drei Manöver vor der letzten Fahrt (nach Runde 5) als mental signifikant weniger anspruchsvoll empfunden (Geradeausfahrt:  $t(20) = 2,19$ ,  $p = ,02$ ,  $d = 0,48$ ; Kreisfahrt:  $t(20) = 1,97$ ,  $p = ,035$ ,  $d = 0,43$ ; Slalom:  $t(20) = 4,33$ ,  $p < ,001$ ,  $d = 0,94$ ).

Tabelle 9

*Mentale Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Mentale Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	21	5,76	4,00	1	15
	Vor der letzten Runde	21	4,52	3,25	1	11
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	21	9,19	4,78	1	17
	Vor der letzten Runde	21	7,76	4,66	1	15
Slalom	Nach Eingewöhnung	21	10,52	4,79	1	19
	Vor der letzten Runde	21	7,52	4,70	1	16

Ebenso werden die drei Manöver hinsichtlich der körperlichen Anforderungen über den Verlauf der Testung in einem niedrigen bis mittleren Bereich der 20-stufigen Skala eingeordnet. Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Tabelle 10. Die körperlichen Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt und Kreisfahrt bleiben über beide Befragungszeitpunkte konstant (Geradeausfahrt:  $t(20) = -0,86$ ,  $p = ,20$ ; Kreisfahrt:  $t(20) = 1,32$ ,  $p = ,10$ ), im Slalom sinken sie signifikant im Verlauf der Testung ( $t(20) = 4,3$ ,  $p < ,001$ ,  $d = 0,94$ ).

Tabelle 10

*Körperliche Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Körperliche Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	21	3,52	2,52	1	9
	Vor der letzten Runde	21	3,81	2,52	1	9
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	21	7,52	4,34	1	15
	Vor der letzten Runde	21	6,95	4,66	1	18
Slalom	Nach Eingewöhnung	21	9,33	5,17	1	19
	Vor der letzten Runde	21	7,24	4,70	1	16

Die eigene Leistung wurde für alle Manöver über den Verlauf der Testung hinweg auf einem hohen Niveau der 20-stufigen Skala eingeschätzt (siehe Tabelle 11). Zum Ende der Versuchsdurchführung werden die Leistungen in den Manövern Geradeausfahrt und Slalom als signifikant besser eingeschätzt im Vergleich zum Beginn der Testung (Geradeausfahrt:  $t(20) = -1,91$ ,  $p = ,036$ ,  $d = -0,42$ ; Slalom:  $t(20) = -1,99$ ,  $p = ,03$ ,  $d = -0,43$ ), wohingegen die Leistung in der Kreisfahrt im Verlauf als konstant eingeschätzt wird ( $t(20) = -1,53$ ,  $p = ,07$ ).

Tabelle 11

*Einschätzung der eigenen Leistung in den Manövern Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Einschätzung der eigenen Leistung						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	21	16,10	3,40	10	20
	Vor der letzten Runde	21	17,14	2,59	13	20
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	21	15,29	3,39	8	20
	Vor der letzten Runde	21	15,90	2,88	12	20
Slalom	Nach Eingewöhnung	21	14,71	4,31	6	20
	Vor der letzten Runde	21	16,00	2,85	10	20

### 3.2.2.2 Fehlerspezifische Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Ergebnisse zur Prüfung der Kontrollierbarkeit der beiden Fehlerbilder *FBA Sprung* und *Ungeregelter RWA* eingegangen. Im Anschluss erfolgt separat für beide Fehler zunächst die Darstellung der subjektiven Ergebnisse hinsichtlich des Erlebens der Fehleraufschaltung und daran anschließend der objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehlerereignisse.

### 3.2.2.3 Kontrollierbarkeit – Hypothesenprüfung

Für die zweite Teilstudie gilt sowohl für den im Manöver Slalom aufgeschalteten Fehler *FBA Sprung*, ebenso wie für den im Manöver Kreisfahrt aufgeschalteten Fehler *Ungeregelter RWA*, dass 100 % der Versuchspersonen, welche valide Datensätze aufwiesen, die Fahrspur mit Fehleraufschaltung nicht verlassen haben. 100 % der Datensätze umfassen dabei mindestens  $N = 20$  Datensätze. Die Hypothese kann somit für die in diesem Studienteil ausgewählte Kombination aus Fahrzeug und Fehlern beibehalten werden. Im Rahmen der durchgeführten Studie waren beide Fehler auf dem von Experten festgelegten C0-Level für alle Versuchspersonen kontrollierbar.

### 3.2.2.4 Fehlerbild: *FBA Sprung*

Bezogen auf das Fehlerbild *FBA Sprung* werden nachfolgend die objektiven Ergebnisse zur Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge des Fehlers berichtet, sowie die Ergebnisse hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung der Aufschaltung.

#### 3.2.2.4.1 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistischen Verteilungen der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das Fehlerbild *FBA Sprung* im Fahrzeug Kompakt 2 sind in Abbildung 30 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierrate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug bei dem untersuchten Fehlerbild sind zusätzlich in Tabelle 12 zusammengefasst. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 30 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig.

Im vorliegenden Fall zeigt das Fahrzeug Kompakt 2 im Vergleich zur Limousine bezüglich des Fehlerbildes *FBA Sprung* tendenziell etwas geringere Störeinflüsse in Bezug auf die Lenkreaktion der Fahrer und die resultierende Fahrzeugdynamik. Allerdings ist der aufgeschaltete Momentensprung im Kompakt 2 mit 1,5 Nm auch geringer als in der Limousine (2,2 Nm).

Abbildung 30

Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störleakrate, Störquerbeschleunigung und Störgierate für das Fehlerbild FBA Sprung (grau: Kompakt 2; weiß: Limousine)

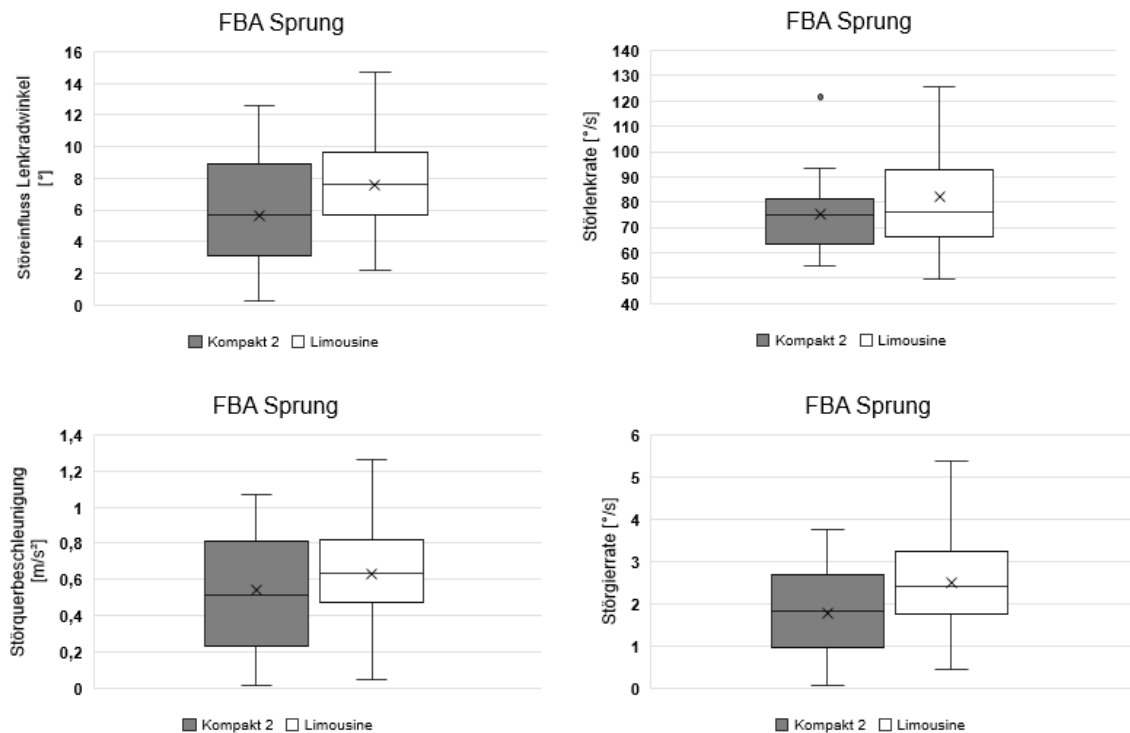


Tabelle 12

Deskriptive Statistikennwerte Fehlerbild FBA Sprung (Kompakt 2)

Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
Kompakt 2	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	26	5,63	3,44	5,67	0,25	12,63
	Störleakrate [°/s]	26	75,42	14,47	74,97	55,00	121,52
	Störquerbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	26	0,54	0,32	0,52	0,02	1,07
	Störgierate [°/s]	26	1,78	1,08	1,81	0,07	3,74

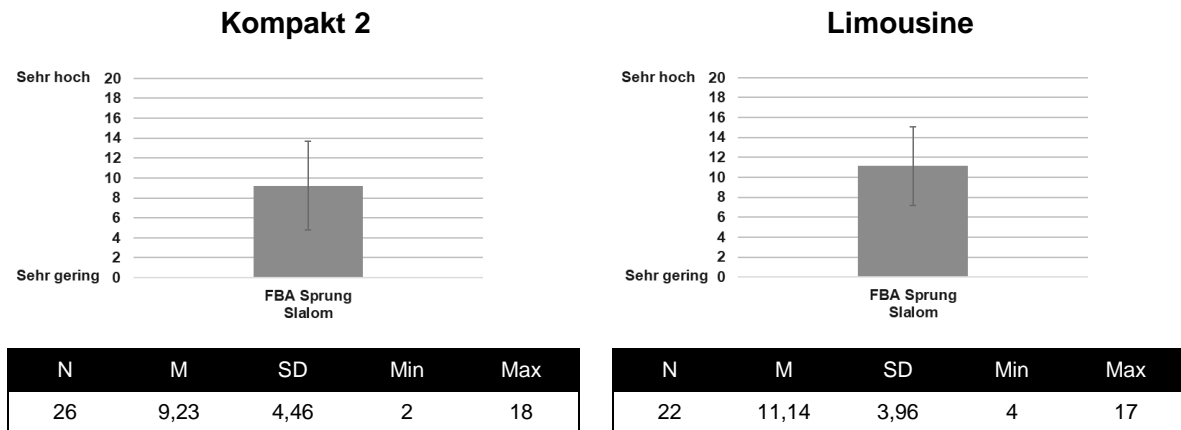
### 3.2.2.4.2 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

Nachfolgend wird die erlebte Schwierigkeit des Manövers Slalom bei Aufschaltung des Fehlers beschrieben. Die Erhebung erfolgte mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Fragen hinsichtlich der subjektiven mentalen wie körperlichen Anforderungen sowie der Einschätzung der eigenen Leistung basierend auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch). Da der gleiche Fehlertyp auch in der Teilstudie 5 (für Details siehe 3.5) unter Verwendung des Versuchsfahrzeugs Limousine verwendet wurde, erfolgt bereits hier eine Gegenüberstellung der Ergebnisse. Eine Erklärung von Unterschieden in den Ergebnissen, kann aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nicht erfolgen. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze.

Die mentalen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Slalom werden in beiden Teilstudien auf einem mittleren Niveau der 20-stufigen Skala eingeordnet (Kompakt 2:  $M = 9,23$ ,  $SD = 4,46$ ; Limousine:  $M = 11,14$ ,  $SD = 3,96$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 31.

Abbildung 31

*Mentale Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers FBA Sprung erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

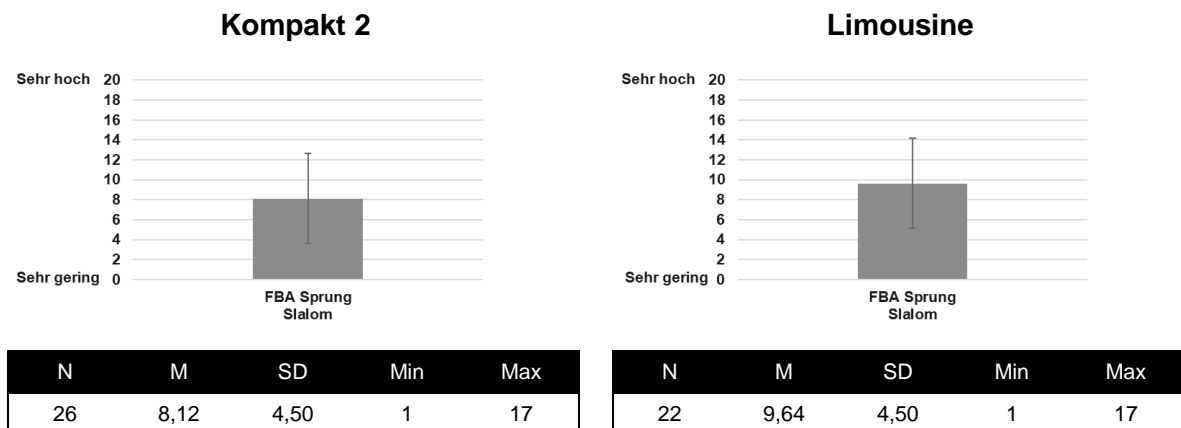


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Auch die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers *FBA Sprung* wurden durchschnittlich in beiden Teilstudien im mittleren Bereich der 20-stufigen Skala bewertet (Kompakt 2:  $M = 8,12$ ,  $SD = 4,50$ ; Limousine:  $M = 9,64$ ,  $SD = 4,50$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 32.

Abbildung 32

*Körperliche Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers FBA Sprung erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

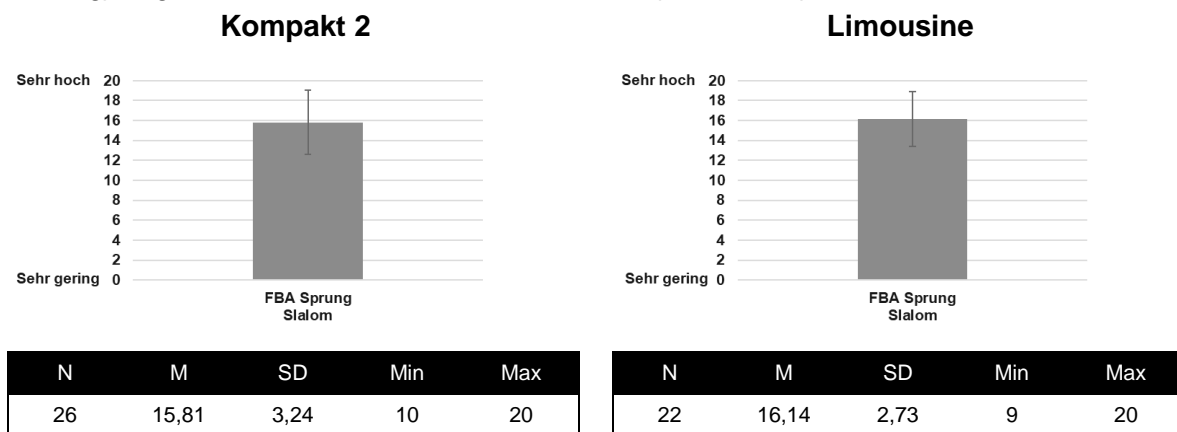


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die eigene Leistung bei der Absolvierung des Manövers mit Fehleraufschaltung wird in beiden Teilstudien auf ein mittleres bis hohes Niveau eingeschätzt (Kompakt 2:  $M = 15,81$ ,  $SD = 3,24$ ; Limousine:  $M = 16,14$ ;  $SD = 2,73$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 33.

Abbildung 33

*Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers FBA Sprung erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*



*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

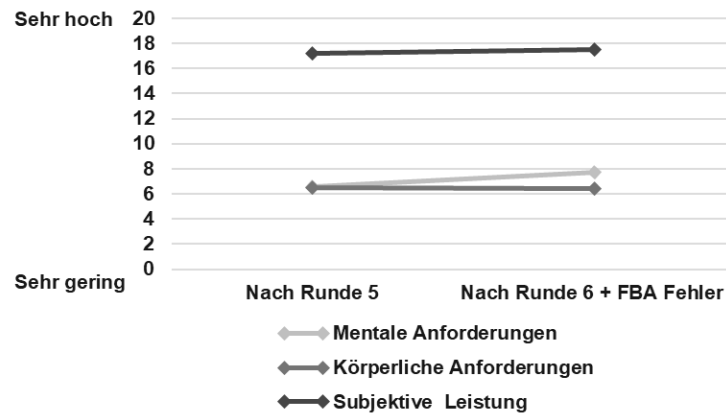
Zur Identifikation des Einflusses der Fehleraufschaltung auf die empfundene Schwierigkeit des Manövers Slalom erfolgte ein Vergleich der wahrgenommenen mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie der subjektiven Leistungseinschätzung nach Runde 5 ohne Fehleraufschaltung mit denen nach erfolgter Fehleraufschaltung in Runde 6. Basis des Vergleichs ist die Annahme, dass die Lernkurve der Versuchspersonen bei der Absolvierung der Manöver zu diesem Zeitpunkt der Versuchsdurchführung abgeflacht ist und Unterschiede zwischen den Runden auf die Aufschaltung des Fehlers zurück zu führen sind. Es ist hierbei zu berücksichtigen, dass aufgrund der randomisierten Aufschaltung von RWA- und FBA-Fehler entweder in Runde 3 oder in Runde 6, lediglich die Hälfte der generierten validen Datensätze (in denen die Aufschaltung des jeweiligen Fehlers in Runde 6 erfolgte) in die Analyse einbezogen werden konnten. Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs beider Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem  $t$ -Test. Für die Datensätze mit erfolgter Aufschaltung des Fehlers *FBA Sprung* in Runde 6 zeigten sich sowohl für die mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie für die Einschätzung der eigenen Leistung keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Runden 5 und 6 (mentale Anforderungen:  $t(11) = -1,65$ ,  $p = ,06$ ; körperliche Anforderungen:  $t(11) = 0,19$ ,  $p = ,43$ ; subjektive Leistung:  $t(11) = -0,6$ ,  $p = ,28$ ). Für eine graphische Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 34.



Abbildung 34

Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Slalom in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des Fehlers FBA Sprung.

(Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)



Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	12	6,58	3,48	2	12
	Nach Runde 6 + Fehler	12	7,75	4,62	2	15
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	12	6,50	4,34	2	15
	Nach Runde 6 + Fehler	12	6,42	3,73	2	12
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	12	17,17	3,10	10	20
	Nach Runde 6 + Fehler	12	17,50	2,54	12	20

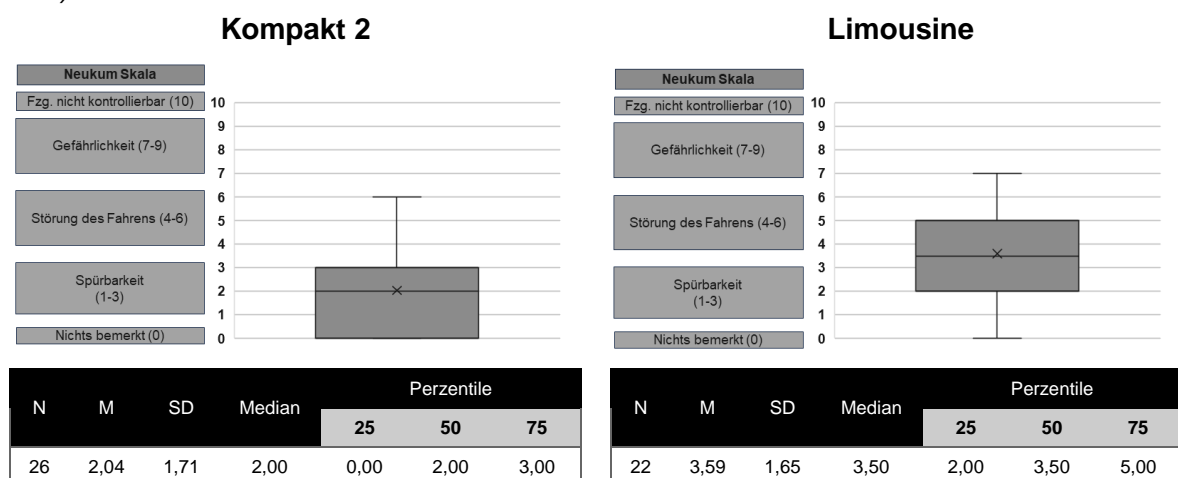
Zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung erfolgte eine Beobachtung des Verhaltens der Versuchsperson durch die Versuchsleitung bzgl. der initialen Reaktion auf das Ereignis. 19,23 % der Versuchspersonen ( $n = 5$ ) zeigten eine merkbare Reaktion, welche in allen Fällen durch eine verbale Äußerung deutlich wurde. Die überwiegende Mehrheit von 80,77 % der Versuchspersonen ( $n = 21$ ) zeigten hingegen keine für die Versuchsleitung merkbare Reaktion. Im Anschluss an die Beendigung des Manövers Slalom wurden die Versuchspersonen gefragt, ob sie während der Absolvierung des Manövers etwas Besonderes bemerkt haben. 73,08 % der Versuchspersonen ( $n = 19$ ) bejahten dies und nannten einen Eingriff in die Lenkung. 26,92 % der Versuchspersonen ( $n = 7$ ) ist nichts Besonderes aufgefallen. Die Versuchspersonen, die etwas Besonderes bemerkt hatten wurden nachfolgend gebeten ihre Reaktion auf einer affektiven, kognitiven und behavioralen Ebene zu beschreiben. Zur Erfassung der affektiven Reaktion sollten die Versuchspersonen ihre Gefühle zum Zeitpunkt des Ereignisses beschreiben. Die am häufigsten erwähnte Äußerung ( $n = 6$ ) beschreibt, keine Angst empfunden zu haben, sondern dem Ereignis neutral gegenüber gewesen zu sein. Am zweit-häufigsten ( $n = 4$ ) wurde eine Verwunderung/Unsicherheit

geäußert. Jeweils  $n = 3$  Mal wurde Erschrecken / Überraschung, eine erhöhte Aufmerksamkeit/Anspannung, ein unangenehmes Gefühl, wie ein positives / sicheres Gefühl erwähnt. Im Sinne der Beschreibung der kognitiven Reaktion wurden die Versuchspersonen gebeten ihre Gedanken zum Zeitpunkt des Ereignisses zu berichten. Der am häufigsten erwähnte Gedanke ( $n = 11$ ) lautete „Da war etwas am Lenkrad / Fahrzeug“. Der am zweit-häufigsten berichtete Gedanke lautet „etwas ist anders / nicht in Ordnung“. Zur Erfassung der behavioralen Reaktion sollten die Versuchspersonen beschreiben, was sie während des Ereignisses getan haben. Gleichhäufig ( $n = 8$ ) berichten die Versuchspersonen entweder gegengelenkt / korrigiert zu haben, oder normal weiter gefahren zu sein / keine besondere Reaktion gezeigt zu haben. Sollte sich das Ereignis wiederholen, würde mit 89,47 % ( $n = 17$ ) der Großteil der Versuchspersonen wieder genauso reagieren, wie beim ersten Erleben.

Die Erfassung der subjektiv empfundenen Kritikalität des Fehlers erfolgte mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003). Im Folgenden werden die Ergebnisse für den Fehlertyp *FBA Sprung* für die Teilstudie mit dem Versuchsfahrzeug Kompakt 2 dargestellt und mit den Ergebnissen der Teilstudie 5 (für Details siehe 3.5) mit der Limousine gegenübergestellt, welche den gleichen Fehlertyp als Versuchsgegenstand hatte. Potentielle Unterschiede zwischen den Ergebnissen können lediglich berichtet, jedoch nicht erklärt werden, da eine gleichzeitige Manipulation von Fahrzeug und Fehler erfolgte. Für die Analyse wurden alle validen Datensätze berücksichtigt. Die durchschnittliche subjektiv wahrgenommene Kritikalität bei Erleben der Fehler-aufschaltung im Fahrzeug Kompakt 2 liegt im Rahmen der 11-stufigen Skala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar) auf einem mittleren Niveau der Kategorie Spürbarkeit ( $M = 2,04$ ,  $SD = 1,71$ ). In der Teilstudie mit der Limousine wurde die Kritikalität des Fehlers etwas höher zwischen einem hohen Niveau der Kategorie Spürbarkeit und einem niedrigen Niveau der Kategorie Störung des Fahrens eingeordnet ( $M = 3,59$ ,  $SD = 1,65$ ). Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 35.

Abbildung 35

*Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlers FBA Sprung in den beiden Teilstudien mit den Fahrzeugen Kompakt 2 und Limousine erhoben mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003).*

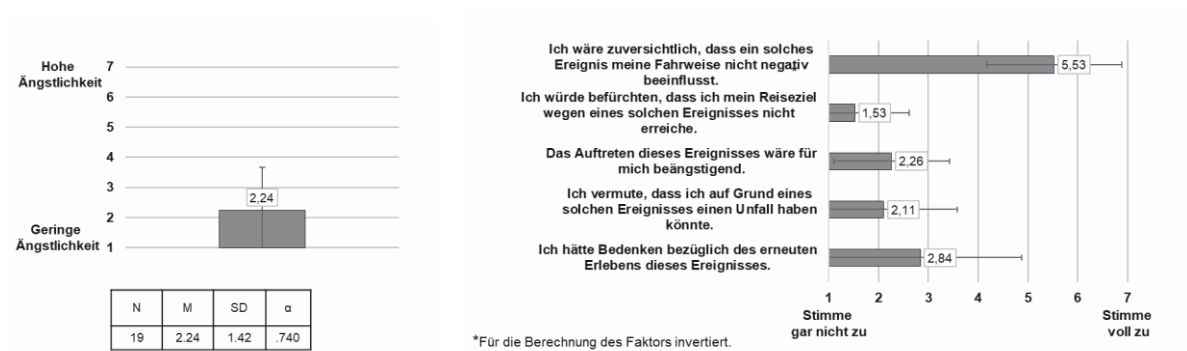


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Zur Erhebung des Situationserlebens wurden modifizierte Ratingskalen der Faktoren *Anxiety* und *Perceived Safety* des Car Technology Acceptance Models (Osswald et al., 2012) gewählt. Erhoben wurden diese Daten von allen Versuchspersonen, die angegeben haben, den Fehler bemerkt zu haben. Die Ängstlichkeit mit Erleben des Fehlers wurde durchschnittlich auf einem niedrigen Niveau der 7-stufigen Skala (1 = geringe Ängstlichkeit – 7 = hohe Ängstlichkeit) eingeordnet ( $M = 2,24$ ,  $SD = 1,42$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors sowie der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 36.

Abbildung 36

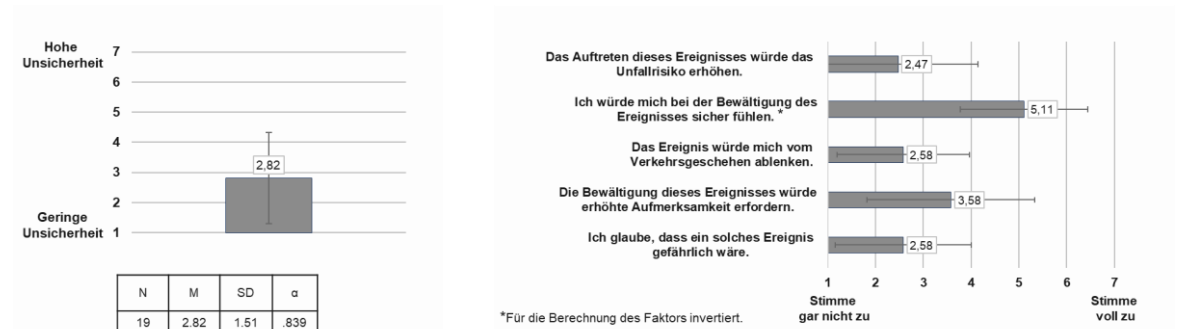
Ergebnisse des Faktors *Anxiety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses FBA Sprung.



Die wahrgenommene Unsicherheit mit Fehleraufschaltung wurde im Mittel ebenfalls in einem unteren Bereich der 7-stufigen Skala (1 = geringe Unsicherheit – 7 = hohe Unsicherheit) eingeordnet ( $M = 2,82$ ,  $SD = 1,51$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* und der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 37.

Abbildung 37

Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses FBA Sprung.



### 3.2.2.5 Fehlerbild: *Ungeregelter RWA*

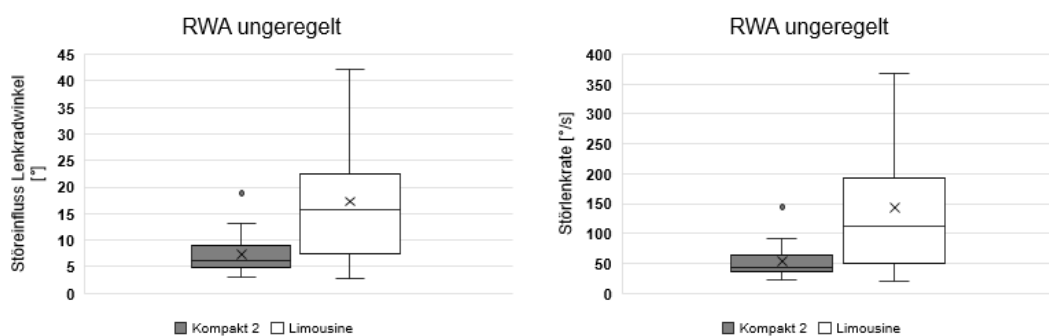
Im Folgenden werden die objektiven Ergebnisse zur Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge der Aufschaltung des Fehlerbildes im Manöver Kreis beschrieben, sowie die subjektiven Ergebnisse hinsichtlich der Wahrnehmung der Fehleraufschaltung.

#### 3.2.2.5.1 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistischen Verteilungen der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das Fehlerbild *Ungeregelter RWA* im Fahrzeug Kompakt 2 sind in Abbildung 38 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug bei dem untersuchten Fehlerbild sind zusätzlich in Tabelle 13 zusammengefasst. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 38 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig. Im vorliegenden Fall zeigt das Fahrzeug Kompakt 2 im Vergleich zur Limousine bezüglich des Fehlerbildes *Ungeregelter RWA* deutlich geringere Störeinflüsse in Bezug auf die Lenkreaktion der Fahrer und die resultierende Fahrzeugdynamik.

Abbildung 38

*Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störleakrate, Störquerbeschleunigung und Störgierate für das Fehlerbild Ungeregelter RWA (grau: Kompakt 2; weiß: Limousine)*



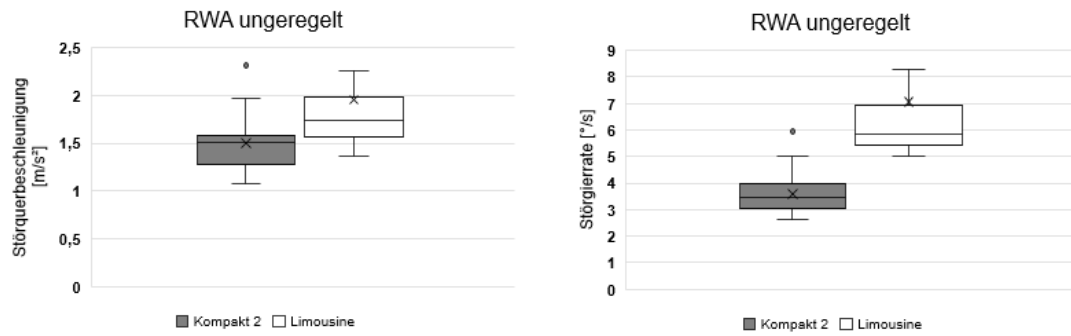


Tabelle 13

Deskriptive Statistikennwerte Fehlerbild Ungeregelter RWA (Kompakt 2)

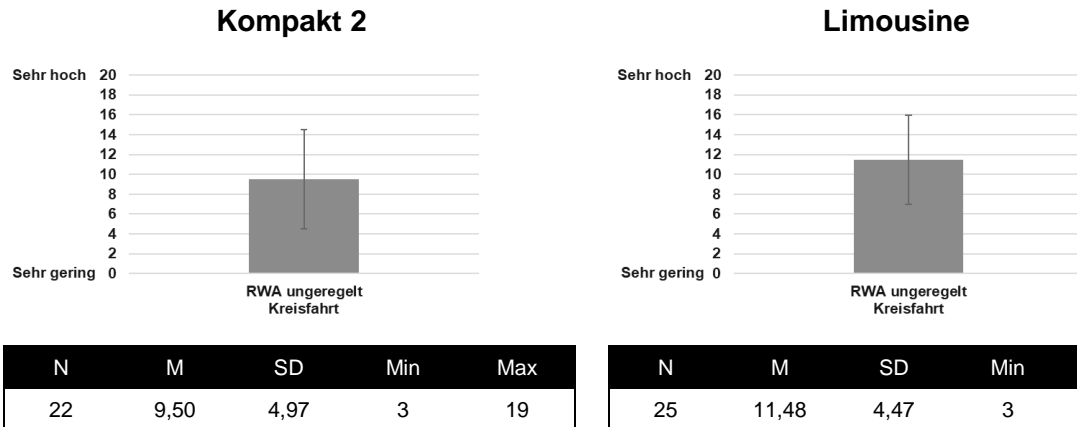
Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
Kompakt 2	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	22	7,35	3,82	6,20	3,07	18,85
	Störleakrate [°/s]	22	52,56	26,57	43,59	21,54	144,32
	Störquerbeschleunigung [m/s²]	22	1,50	0,27	1,51	1,07	2,31
	Störgierate [°/s]	22	3,61	0,78	3,47	2,63	5,96

### 3.2.2.5.2 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse zur wahrgenommenen Schwierigkeit des Manövers Kreis mit Fehleraufschaltung dargestellt. Die Erhebung erfolgte mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items bzgl. der erlebten mentalen und körperlichen Anforderungen sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung bei der Absolvierung des Manövers Kreis mit Fehleraufschaltung auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch). Neben der Darstellung der Ergebnisse für die Teilstudie mit dem Versuchsfahrzeug Kompakt 2 erfolgt an dieser Stelle auch die Darstellung der Ergebnisse, welche im Rahmen der Teilstudie 5 (für Details siehe 3.5) mit dem Versuchsfahrzeug Limousine für den gleichen Fehlertyp erhoben wurden. Eine über die Darstellung der Ergebnisse hinausgehende Erklärung potentieller Unterschiede zwischen den Teilstudien kann aufgrund der gleichzeitigen Manipulation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug nicht erfolgen. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze. In beiden Teilstudien wurden die mentalen Anforderungen für das Absolvieren des Manövers einschließlich des aufgeschalteten Fehlers in einem mittleren Bereich der 20-stufigen Skala eingeordnet (Kompakt 2:  $M = 9,50$ ,  $SD = 4,97$ ; Limousine:  $M = 11,48$ ,  $SD = 4,47$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 39.

Abbildung 39

*Mentale Anforderungen des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers Ungeregelter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

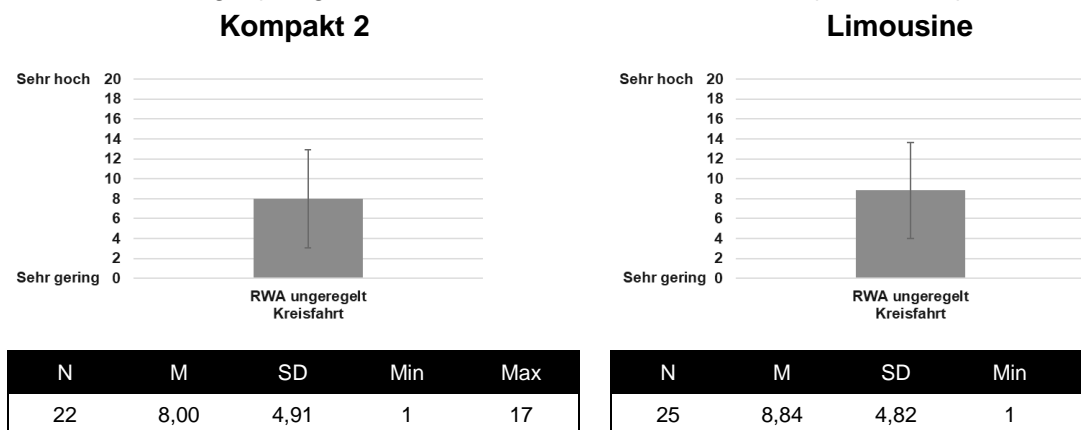


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Kreis mit Fehleraufschaltung wurden in beiden Teilstudien in einem niedrigen bis mittleren Bereich der Skala (Kompakt 2:  $M = 8,00$ ,  $SD = 4,91$ ; Limousine:  $M = 8,84$ ,  $SD = 4,82$ ) eingeschätzt (siehe Abbildung 40).

Abbildung 40

*Körperliche Anforderungen des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers Ungeregelter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

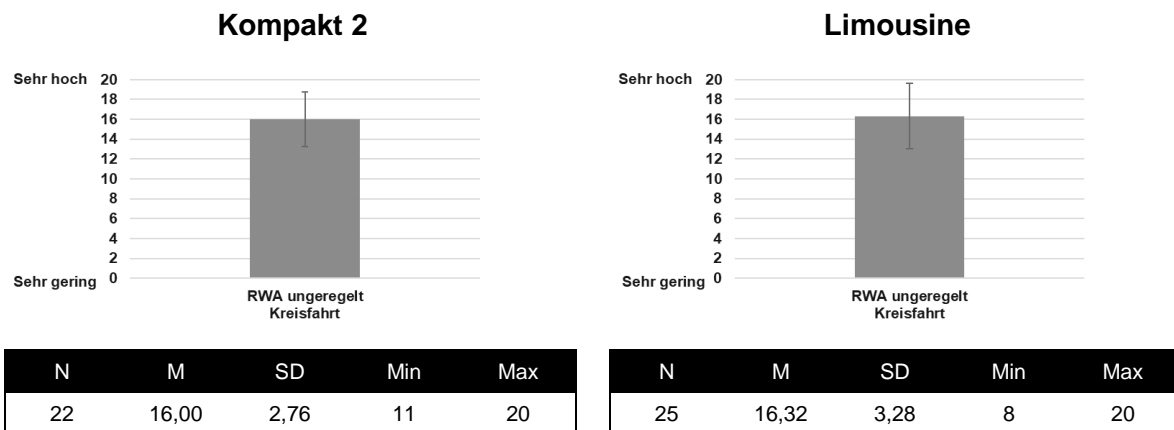


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die Einschätzung der eigenen Leistung bei Absolvierung des Manövers Kreis mit Fehleraufschaltung lag in beiden Teilstudien auf einem mittleren bis hohen Niveau der 20-stufigen Skala (Kompakt 2:  $M = 16,00$ ,  $SD = 2,76$ ; Limousine:  $M = 16,32$ ,  $SD = 3,28$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 41.

Abbildung 41

Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers Ungeregelter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).

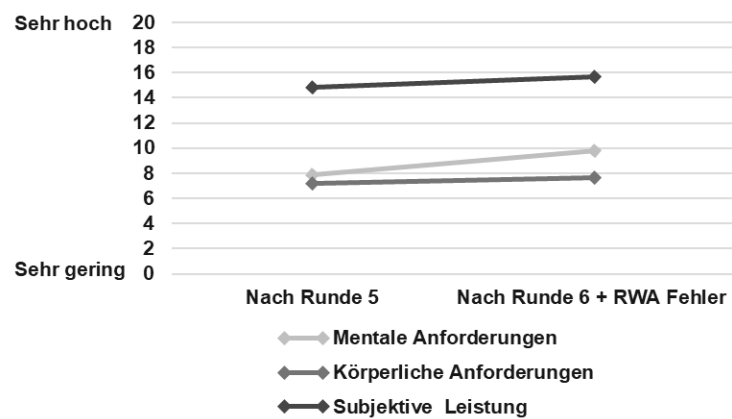


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Um den Einfluss des Fehlers auf die wahrgenommene Schwierigkeit des Manövers Slalom heraus zu finden, wurden die wahrgenommenen mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie die subjektive Leistungseinschätzung nach Runde 5 ohne Fehleraufschaltung mit denen nach erfolgter Fehleraufschaltung in Runde 6 verglichen. Der Vergleich basiert auf der Annahme, dass die Lernkurve der Versuchspersonen hinsichtlich der Absolvierung des Manövers zu diesem Zeitpunkt abgeflacht ist und Unterschiede zwischen den Runden 5 und 6 auf die Aufschaltung des Fehlers zurück zu führen sind. Aufgrund der Randomisierung der Aufschaltung beider Fehler auf die Runden 3 und 6, kann lediglich die Hälfte der generierten validen Datensätze (in denen die Aufschaltung des jeweiligen Fehlers in Runde 6 erfolgte) in die Analyse einbezogen werden. Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs beider Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem  $t$ -Test. Es wird deutlich, dass sowohl bezüglich der mentalen, als auch hinsichtlich der körperlichen Anforderungen kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der sechsten Runde mit Fehleraufschaltung und der vorangegangenen Runde 5 ohne Fehleraufschaltung besteht (mentale Anforderungen:  $t(10) = -1,66$ ,  $p = ,06$ ; körperliche Anforderungen:  $t(10) = -0,79$ ,  $p = ,23$ ). Ebenso bleibt die subjektiv empfundene Leistung über beide Runden konstant ( $t(10) = -1,48$ ,  $p = ,085$ ). Für eine graphische Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 42.

Abbildung 42

Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2016) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Kreis in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des Fehlers Ungeregelter RWA. (Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)



Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	11	7,91	4,51	1	15
	Nach Runde 6 + Fehler	11	9,82	4,17	5	19
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	11	7,18	4,00	1	13
	Nach Runde 6 + Fehler	11	7,64	4,80	1	17
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	11	14,82	2,89	12	20
	Nach Runde 6 + Fehler	11	15,64	2,73	12	20

Zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung erfolgte eine Beobachtung des Verhaltens der Versuchspersonen durch die Versuchsleitung mit dem Ziel der Erfassung der initialen Reaktion. 40,91 % ( $n = 9$ ) der Versuchspersonen zeigten mit Aufschaltung des *Ungeregelten* RWAs eine merkliche Reaktion. Am häufigsten ( $n = 6$ ) äußerte sich diese verbal oder durch einen Blick in den Spiegel/einen Blick nach hinten ( $n = 3$ ). Um herauszufinden, wie viele Versuchspersonen die Fehleraufschaltung subjektiv bemerkt haben, wurden sie im nach Absolvierung des Manövers mit Fehleraufschaltung gefragt, ob ihnen etwas Besonderes aufgefallen ist. 100% der Versuchspersonen ( $n = 22$ ) bejahten diese Frage. Bei der Beschreibung des Ereignisses wurde am häufigsten ( $n = 11$ ) geäußert, dass eine Pylone oder etwas Anderes überfahren wurde. Beinahe gleich häufig wurde ein Ruckeln/eine Vibration beschrieben ( $n = 10$ ) und ebenso ein Wegrutschen des Fahrzeuges ( $n = 9$ ). Anschließend wurden die Versuchspersonen gebeten, ihre Reaktion auf das Ereignis auf affektiver, kognitiver und behavioraler Ebene zu beschreiben. Auf affektiver Ebene wurden am häufigsten

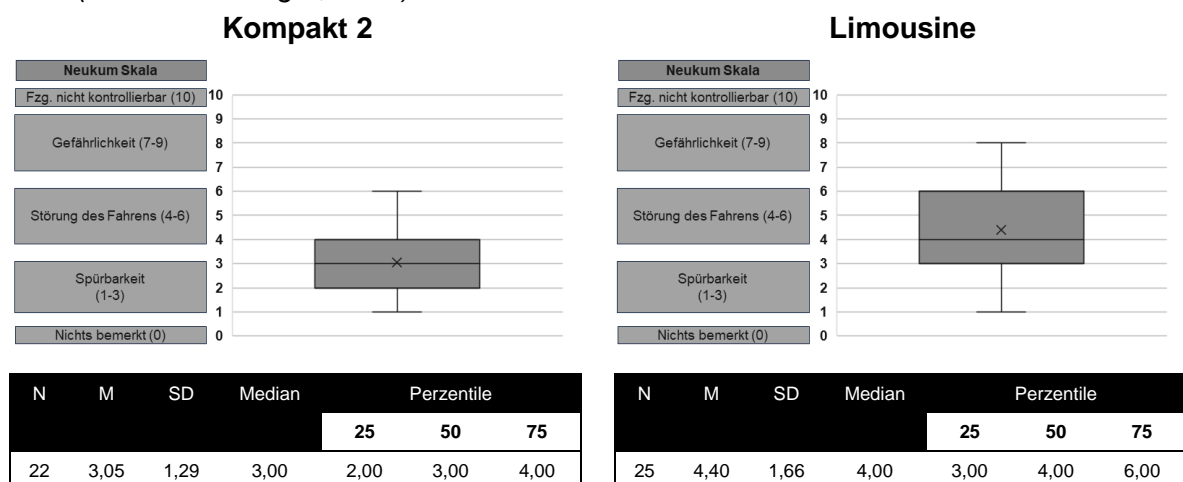


( $n = 14$ ) Gefühle des Erschreckens / der Überraschung geäußert. Auf kognitiver Ebene berichten die Versuchspersonen am häufigsten darüber nachgedacht zu haben, eine Pylone/etwas Anderes umgefahren zu haben ( $n = 11$ ) oder gedacht zu haben, dass etwas anders/nicht in Ordnung sei (z.B. platter Reifen) ( $n = 7$ ). Bezogen auf die behaviorale Reaktion, wurde am häufigsten ( $n = 12$ ) erwähnt, dass die Versuchspersonen auf die Fehleraufschaltung mit Gegenlenken/Korrigieren reagiert haben. Am zweit-häufigsten ( $n = 6$ ) wurde beschrieben, normal weiter gefahren zu sein/auf die Straße geschaut zu haben. Auf die Frage, ob sie bei einem wiederholten Auftreten des Ereignisses anders reagieren würden, antworteten einzelne Personen ( $n = 3$ ), dass sie anhalten und nach dem Grund des Ereignisses schauen würden, oder, dass sie bei einer Wiederholung entspannter wären ( $n = 3$ ).

Zur Erhebung der subjektiv empfundenen Kritikalität der Fehleraufschaltung wurde die 11-stufige Neukum Skala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar; Neukum & Krüger, 2003) verwendet. Da der Fehlertyp *Ungeregelter RWA* nicht nur in der Teilstudie mit dem Fahrzeug Kompakt 2, sondern auch in der Teilstudie mit der Limousine (für Details siehe 3.5) berücksichtigt wurde, werden die Ergebnisse beider Studien hinsichtlich der Einschätzung der Kritikalität des Ereignisses gegenübergestellt. Aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug können potentielle Unterschiede jedoch lediglich aufgezeigt, aber nicht erklärt werden. Für die Analyse wurden alle validen Datensätze berücksichtigt. Die mittlere subjektiv wahrgenommene Kritikalität des Fehlers *Ungeregelter RWA* wurde im Rahmen der Teilstudie mit dem Fahrzeug Kompakt 2 auf einem hohen Niveau der Kategorie Spürbarkeit eingeordnet ( $M = 3,05$ ,  $SD = 1,29$ ). In der Teilstudie mit der Limousine wurde die Kritikalität des Fehlerbildes durchschnittlich auf einem niedrigen Niveau der Kategorie Störung des Fahrens ( $M = 4,40$ ,  $SD = 1,66$ ) berichtet. Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 43.

Abbildung 43

*Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlertypen Ungeregelter RWA in den beiden Teilstudien mit den Versuchsfahrzeugen Kompakt 2 und Limousine erhoben mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003).*

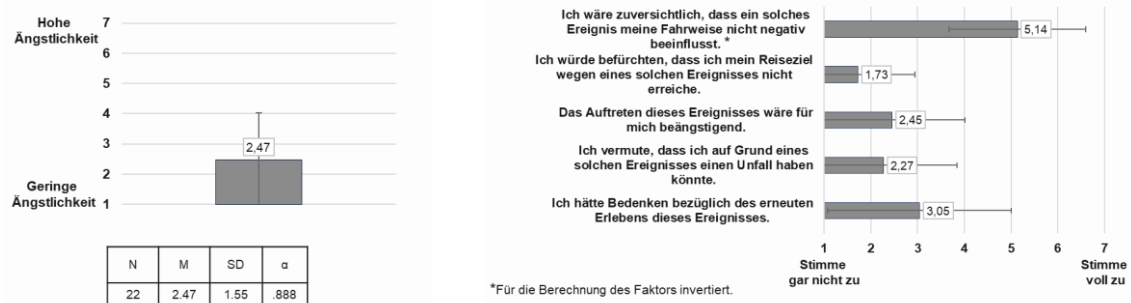


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die Ängstlichkeit mit Bemerken des Fehlerereignisses erscheint auf einem niedrigen Niveau der 7-stufigen Ratingskala (1 = geringe Ängstlichkeit – 7 = hohe Ängstlichkeit) ( $M = 2,47$ ,  $SD = 1,55$ ). Für eine Darstellung des Faktors und der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 44.

Abbildung 44

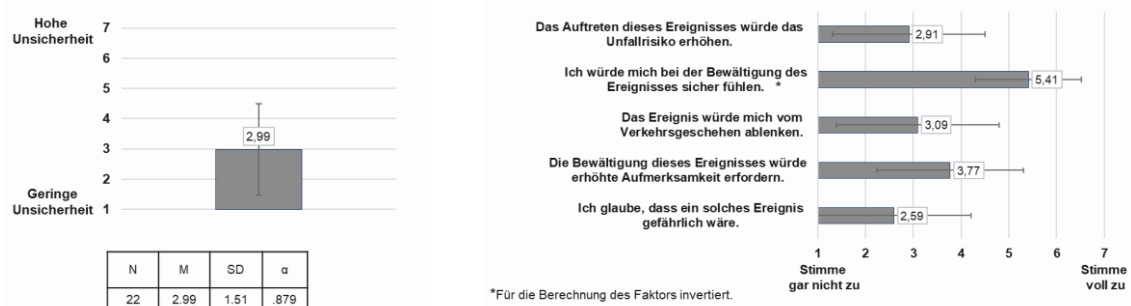
Ergebnisse des Faktors Anxiety (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses Ungeregelter RWA.



Die empfundene Unsicherheit mit Bemerken des Fehlers wird auf einem unteren bis mittleren Bereich der 7-stufigen Skala (1 = geringe Unsicherheit – 7 = hohe Unsicherheit) eingeordnet ( $M = 2,99$ ,  $SD = 1,51$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors sowie der Einzelitems siehe Abbildung 45.

Abbildung 45

Ergebnisse des Faktors Perceived Safety (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses Ungeregelter RWA.

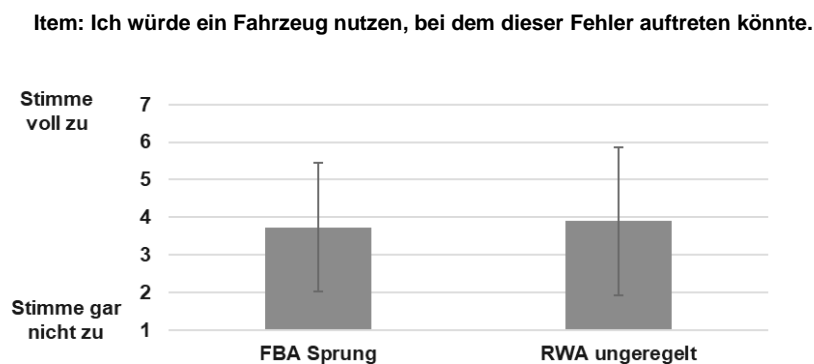


### 3.2.2.6 Nachbefragung

Im Anschluss an die Aufklärung der Versuchspersonen hinsichtlich des Studiengegenstands nach Durchführung der Versuchsfahrten erfolgte eine Nachbefragung. Die Versuchspersonen beantworteten die Fragen hierbei lediglich, sofern sie den betreffenden Fehler im Rahmen der Versuchsdurchführung bemerkt hatten. Die Versuchspersonen wurden gebeten anzugeben, inwiefern sie der Aussage „Ich würde ein Fahrzeug nutzen, bei dem dieser Fehler auftreten könnte“ zustimmen. Von den 71,43 % ( $n = 15$ ) Versuchspersonen, welche den Fehler *FBA Sprung* bemerkt hatten, wurde die Nutzungsintention in einem mittleren Bereich der 7-stufigen Antwortskala (1 = stimme gar nicht zu – 7 = stimme voll zu) bewertet ( $M = 3,73$ ,  $SD = 1,71$ ). Der Fehler *Ungeregelter RWA* wurde von allen Versuchspersonen bewertet ( $N = 21$ ) und von diesen ebenfalls auf einem mittleren Niveau der Skala bewertet ( $M = 3,90$ ,  $SD = 1,97$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 46.

Abbildung 46

*Nutzungsintention hinsichtlich eines Fahrzeuges, welches den erlebten Fehler FBA Sprung oder Ungeregelter RWA aufweisen könnte, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.*



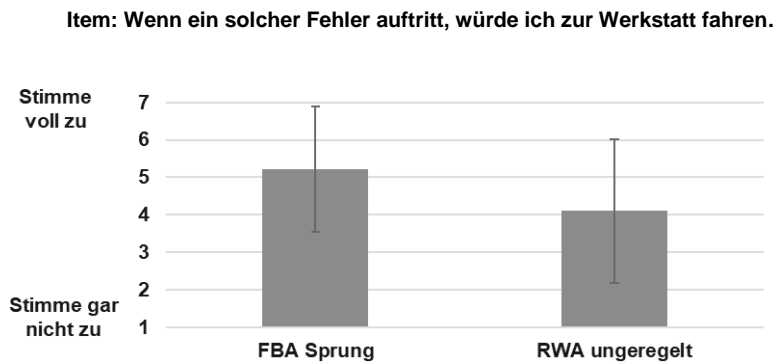
Fehler	N	M	SD	Min	Max
FBA Sprung	15	3,73	1,71	1	6
RWA Ungeregelt	21	3,90	1,97	1	7

*Anmerkung.* Die Beantwortung des Items erfolgte lediglich durch Versuchspersonen, die den jeweiligen Fehler im Versuchsdurchlauf bemerkt haben.

Weiterhin wurden die Versuchspersonen gefragt wie sehr sie der Aussage „Wenn ein solcher Fehler auftritt, würde ich zur Werkstatt fahren“ zustimmen. Die Personen, die den FBA-Fehler wahrgenommen haben ( $n = 19$ ), gaben an dieser Aussage eher zuzustimmen ( $M = 5,21$ ,  $SD = 1,67$ ). Für den RWA-Fehler scheinen die Versuchspersonen dieser Aussage im Durchschnitt weder zuzustimmen, noch diese abzulehnen ( $M = 4,10$ ,  $SD = 1,92$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 47.

Abbildung 47

Absicht eine Werkstatt aufzusuchen bei Auftreten der erlebten Fehler FBA Sprung oder Ungeregelter RWA im eigenen Fahrzeug, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.



Fehler	N	M	SD	Min	Max
FBA Sprung	14	5,21	1,67	2	7
RWA Ungeregelt	20	4,10	1,92	2	7

### 3.2.3 Zusammenfassung Studie 2

Im Folgenden wird eine Übersicht hinsichtlich der Hauptergebnisse der durchgeführten Teilstudie 2 (Fahrzeug: Kompakt 2; Fehler: *FBA Sprung* / *Ungeregelter RWA*) gegeben.

- Die Gestaltung des Parcours erscheint angemessen, die Versuchspersonen werden weder unter- noch überfordert.
- Es wird eine Lernkurve der Versuchspersonen über den Verlauf der Testung deutlich.
- Für beide Fehlerbilder konnte die aufgestellte Forschungshypothese beibehalten werden.
- Der Fehler *FBA Sprung*
  - wurde von 73% der Versuchspersonen bemerkt;
  - bewirkt keinen signifikanten Anstieg der empfunden mentalen und körperlichen Anforderungen sowie keine signifikante Verschlechterung der subjektiv empfundenen Leistung im betreffenden Fahrmanöver;
  - wird von den Versuchspersonen mehrheitlich als Eingriff in die Lenkung beschrieben;
  - wird auf affektiver Ebene mehrheitlich mit Verwunderung, Unsicherheit oder keiner spezifischen affektiven Reaktion assoziiert;
  - führt bei einem Teil der Versuchspersonen auf Ebene der behavioralen Reaktion zu einem Gegenlenken bzw. Korrekturverhalten;
  - wird bezüglich der Kritikalität auf einem mittleren Niveau der Kategorie „Spürbarkeit“ eingeordnet.

- Der Fehler *Ungeregelter RWA*
  - wurde von allen Versuchspersonen bemerkt;
  - bewirkt keinen signifikanten Anstieg der empfunden mentalen und körperlichen Anforderungen sowie keine signifikante Verschlechterung der subjektiv empfundenen Leistung im betreffenden Fahrmanöver;
  - wird auf affektiver Ebene mehrheitlich mit Gefühlen des Erschreckens und der Überraschung assoziiert;
  - führt bei einem Teil der Versuchspersonen auf Ebene der behavioralen Reaktion zu einem Gegenlenken bzw. Korrekturverhalten;
  - wird bezüglich der Kritikalität auf einem hohen Niveau der „Spürbarkeit“ eingeordnet.

Die inhaltliche Diskussion der Ergebnisse der Teilstudien erfolgt übergeordnet für die gesamte Versuchsreihe in Abschnitt 4.

### 3.3 Studie 3

Die Durchführung der dritten Teilstudie erfolgte unter der Verwendung des Versuchsfahrzeugs Kompakt 1 im Zeitraum vom 07. bis 12. April 2022. Bei den ausgewählten Fehlerbildern handelte es sich um den *FBA Selfsteer + Loss of Feedback*, welcher im Manöver Kreisfahrt aufgeschaltet wurde sowie den *Geblockten RWA* im zugehörigen Manöver Slalom. Nachfolgend werden die Ergebnisse dargestellt.

#### 3.3.1 Stichprobe

An der Studie haben  $N = 25$  Personen teilgenommen, davon sind 10 Personen weiblich. Das mittlere Alter beträgt  $M = 41,80$  Jahre ( $SD = 13,40$ ), wobei die jüngste Versuchsperson 21 Jahre und die älteste 62 Jahre alt ist. Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung beträgt  $M = 16.800$  km ( $SD = 11.622,54$  km) mit einer Spannweite von 3.000 km – 60.000 km. Keine der Versuchspersonen gibt an, eine nicht korrigierte Seh- oder Hörbeeinträchtigung zu haben.

#### 3.3.2 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt aufgeteilt in die beiden Abschnitte fehlerunabhängige und fehlerspezifische Ergebnisse. Zunächst erfolgt der Bericht von Ergebnissen, welche sich von den Fehleraufschaltungen unabhängig, auf die allgemeine Schwierigkeit der gewählten Manöver im Sinne der Prüfung des gewählten Versuchsdesigns beziehen. Anschließend erfolgt die Darstellung der fehlerspezifischen Ergebnisse. In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Ergebnisse zur Prüfung der Kontrollierbarkeit beider Fehler (FBA und RWA) eingegangen. Darauf folgend werden die subjektiven Versuchsdaten hinsichtlich des Erlebens der Fehleraufschaltung, sowie die objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehleraufschaltung zunächst für den FBA- und darauf folgend für den RWA-Fehler berichtet.

### 3.3.2.1 Fehlerunabhängige Ergebnisse

Die allgemein empfundene Schwierigkeit der Manöver wurde in Anlehnung an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) mittels drei Fragen hinsichtlich der mentalen und körperlichen Anforderungen sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Skala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch) erfasst. Die Befragungen fanden zu Beginn (nach der Eingewöhnungsfahrt) sowie vor Beendigung der Testung (im Anschluss an die Fahrt 5) statt. Zur inferenzstatistischen Analyse der Lernkurve erfolgte ein Vergleich der Anforderungen von Beginn und Ende der Fahrt mittels gepaartem  $t$ -Test. In die Analyse einbezogen wurden alle Versuchspersonen, welche für beide Fehlerfälle valide Datensätze aufwiesen.

Zu beiden Befragungszeitpunkten wurden die drei Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom hinsichtlich der mentalen Anforderungen in einem niedrigen bis mittleren Bereich der 20-stufigen Skala eingeschätzt. Das Manöver Geradeausfahrt scheint mit den vergleichsweise niedrigsten mentalen Anforderungen einherzugehen. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 14. Vor der letzten Fahrt werden alle drei Manöver mental als signifikant weniger anspruchsvoll empfunden, als zu Beginn der Testung (Geradeausfahrt:  $t(12) = 2,16$ ,  $p = ,026$ ,  $d = 0,6$ ; Kreisfahrt:  $t(12) = 3,4$ ,  $p = ,003$ ,  $d = 0,94$ ; Slalom:  $t(12) = 2,12$ ,  $p = ,028$ ,  $d = 0,59$ ).

Tabelle 14

*Mentale Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Mentale Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	13	5,15	3,11	1	10
	Vor der letzten Runde	13	4,08	2,50	1	8
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	13	10,54	3,13	4	16
	Vor der letzten Runde	13	8,00	4,10	3	15
Slalom	Nach Eingewöhnung	13	11,31	3,25	5	16
	Vor der letzten Runde	13	9,00	4,26	3	16

Hinsichtlich der körperlichen Anforderungen werden die drei Manöver ebenso in einem niedrigen bis mittleren Bereich eingeordnet, wobei die Geradeausfahrt als am wenigsten anforderungsreich erscheint. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 15. Über den Verlauf der Testung bleiben die körperlichen Anforderungen in der Geradeausfahrt und der Kreisfahrt konstant (Geradeausfahrt:  $t(12) = -1,07$ ,  $p = ,15$ ; Kreisfahrt:  $t(12) = 1,66$ ,  $p = ,06$ ), im Slalom sinken sie signifikant ( $t(12) = 2,27$ ,  $p = ,027$ ,  $d = 0,63$ ).

Tabelle 15

*Körperliche Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Körperliche Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	13	3,00	2,27	1	7
	Vor der letzten Runde	13	3,54	2,22	1	7
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	13	7,15	3,51	2	14
	Vor der letzten Runde	13	5,92	3,57	1	13
Slalom	Nach Eingewöhnung	13	9,92	4,39	2	18
	Vor der letzten Runde	13	8,31	4,42	3	18

Die eigene Leistung wurde über den Studienverlauf im hohen Bereich der 20-stufigen Skala eingeschätzt. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 16. Am Ende der Testung werden die Leistungen in den Manövern Geradeausfahrt und Slalom signifikant besser als zu Beginn eingeschätzt (Geradeausfahrt:  $t(12) = -3,55$ ,  $p = ,002$ ,  $d = -0,99$ ; Slalom:  $t(12) = -3,15$ ,  $p = ,004$ ,  $d = -0,87$ ), wohingegen sie im Manöver Kreis konstant bleibt ( $t(12) = -1,77$ ,  $p = ,05$ ).

Tabelle 16

*Einschätzung der eigenen Leistung in den Manövern Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Einschätzung der eigenen Leistung						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	13	16,38	2,60	12	20
	Vor der letzten Runde	13	17,92	1,80	15	20
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	13	14,77	3,66	6	20
	Vor der letzten Runde	13	16,69	2,84	12	20
Slalom	Nach Eingewöhnung	13	14,85	3,18	10	20
	Vor der letzten Runde	13	17,38	2,26	14	20

### 3.3.2.2 Fehlerspezifische Ergebnisse

Nachfolgend wird zunächst auf die Ergebnisse zur Prüfung der Kontrollierbarkeit der beiden Fehlerbilder *FBA Selfsteer + Loss of Feedback* und *Geblockter RWA* eingegangen. Anschließend erfolgt separat für beide Fehler die Darstellung der subjektiven Ergebnisse hinsichtlich des Erlebens der Fehleraufschaltung und daran anschließend der objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehlerereignisse.

#### 3.3.2.2.1 Kontrollierbarkeit – Hypothesenprüfung

Im Rahmen der dritten Teilstudie gilt für den im Manöver Kreisfahrt aufgeschalteten Fehler *FBA Selfsteer + Loss of Feedback*, dass 100% der Versuchspersonen, welche valide Datensätze aufwiesen, die Fahrspur mit Fehleraufschaltung nicht verlassen haben. 100% der Datensätze umfassen dabei mindestens  $N = 20$  Datensätze. Die Hypothese kann somit für diese ausgewählte Kombination aus Fehlerparametrierung und Fahrzeug beibehalten werden. Im Rahmen der durchgeführten Studie war dieser Fehler auf dem von Experten festgelegten C0-Level für alle Versuchspersonen kontrollierbar. Für den Fehler *Geblockter RWA* war aufgrund einer unzureichenden Anzahl an validen Datensätzen ( $n = 15$ ) eine Hypothesenprüfung nicht möglich.

#### 3.3.2.2.2 Fehlerbild: *FBA Selfsteer + Loss of Feedback*

Im Folgenden werden die objektiven Ergebnisse zur Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge des FBA-Fehlers *Selfsteer + Loss of Feedback*, sowie die Ergebnisse hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung der Aufschaltung berichtet.

#### 3.3.2.2.3 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistischen Verteilungen der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das *FBA Selfsteer+ Loss of Feedback*-Fehlerbild im Fahrzeug Kompakt 1 sind in Abbildung 48 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug bei dem untersuchten Fehlerbild sind zusätzlich in Tabelle 17 zusammengefasst. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 48 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig.

Im vorliegenden Fall zeigt der Kompakt 1 im Vergleich zum SUV 1 bezüglich des Fehlerbildes *FBA Selfsteer+ Loss of Feedback* tendenziell etwas höhere Störeinflüsse in Bezug auf die Lenkreaktion der Fahrer und die resultierende Fahrzeugdynamik. Hierbei ist allerdings zu



beachten, dass die Aufschaltdauer des Momentensprungs im Kompakt 1 mit 20 ms aber auch doppelt so lang wie die Aufschaltdauer des Momentensprungs im SUV 1 ist.

Abbildung 48

Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störleakrate, Störquerbeschleunigung und Störgierate für das Fehlerbild FBA Selfsteer+ Loss of Feedback

(weiß: Kompakt 1; grau: SUV 1)

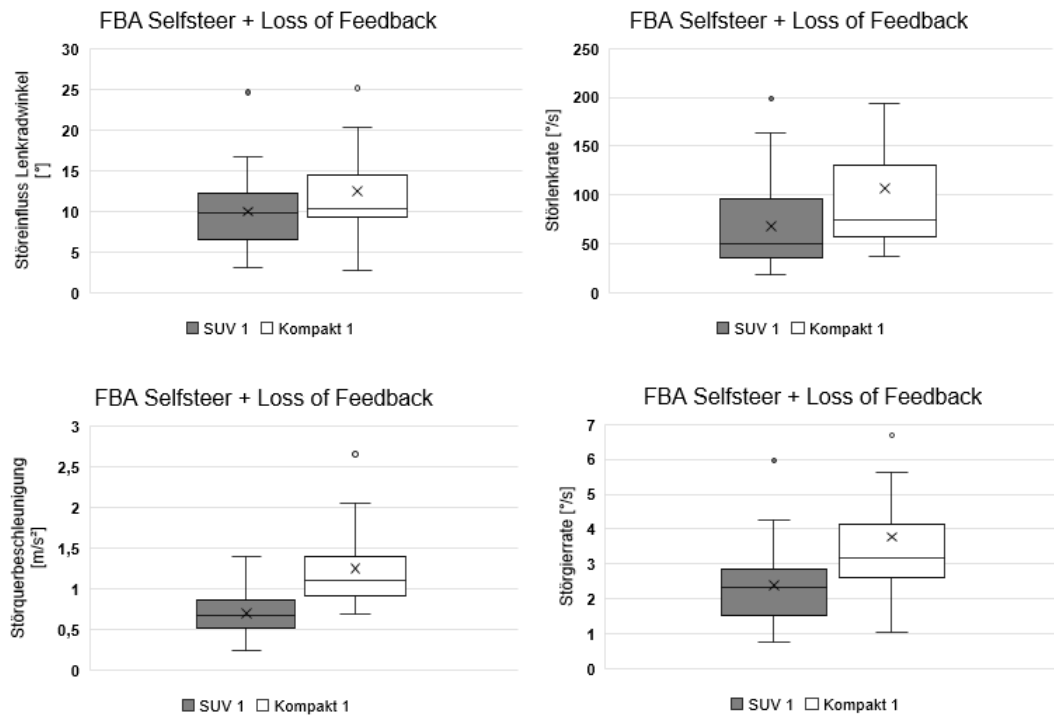


Tabelle 17

Deskriptive Statistikwerte FBA Selfsteer+ Loss of Feedback -Fehlerbild (Kompakt 1)

Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
Kompakt 1	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	22	12,48	6,46	10,27	2,84	32,66
	Störleakrate [°/s]	22	106,61	69,75	75,14	36,78	301,70
	Störquerbeschleunigung [m/s²]	22	1,24	0,47	1,10	0,69	2,65
	Störgierate [°/s]	22	3,77	1,99	3,20	1,06	9,66

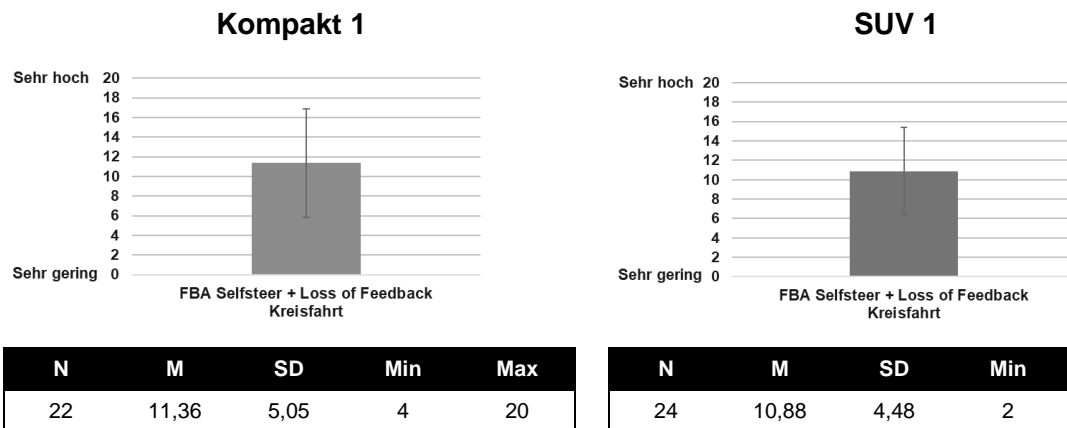
### 3.3.2.2.4 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

Nachfolgend wird zunächst auf die wahrgenommene Schwierigkeit des Manövers Kreisfahrt mit Fehleraufschaltung eingegangen. Erfasst wurde diese über die drei an das Instrument NASA-TLX angelehnte Items hinsichtlich der erlebten mentalen wie körperlichen Anforderungen und der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch). Die Ergebnisse werden mit denen der

Teilstudie 1 (für Details siehe 3.1) mit dem Versuchsfahrzeug SUV 1 gegenübergestellt, da hier der gleiche Fehlertyp Berücksichtigung fand. Unterschiede zwischen den Teilstudien können beschrieben, jedoch aufgrund der gleichzeitigen Manipulation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug nicht erklärt werden. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze. In der Teilstudie mit dem verwendeten Fahrzeug Kompakt 1 wurden die mentalen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Kreis mit Fehleraufschaltung im mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala berichtet ( $M = 11,36$ ,  $SD = 5,05$ ). Ebenso wurden die mentalen Anforderungen für die Teilstudie mit dem Versuchsfahrzeug SUV 1 für das Manöver Kreis mit Fehleraufschaltung im mittleren Bereich der Skala eingeordnet ( $M = 10,88$ ,  $SD = 4,48$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 49.

Abbildung 49

*Mentale Anforderungen des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers FBA Selfsteer + Loss of Feedback erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

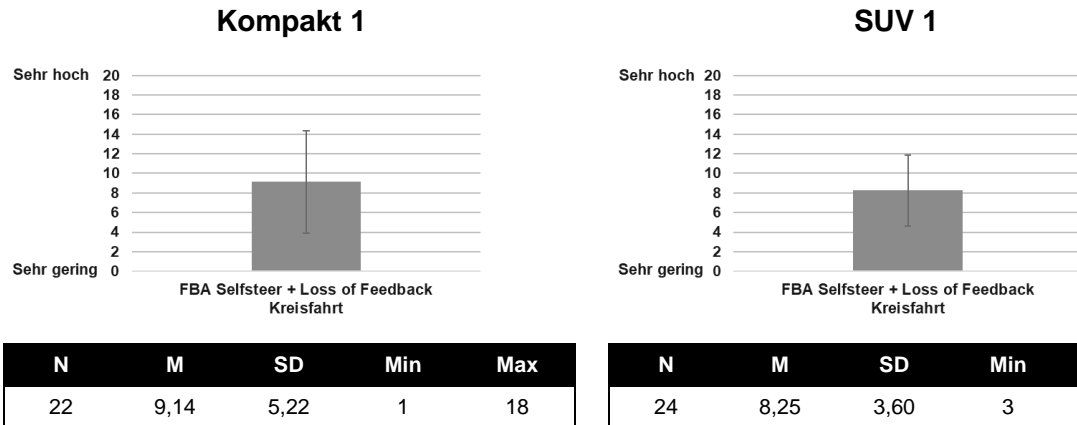


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Kreis mit Fehleraufschaltung wurden in beiden Teilstudien im mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala eingeschätzt (Kompakt 1:  $M = 9,14$ ,  $SD = 5,22$ ; SUV 1:  $M = 8,25$ ,  $SD = 3,60$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 50.

Abbildung 50

*Körperliche Anforderungen des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers FBA Selfsteer + Loss of Feedback erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

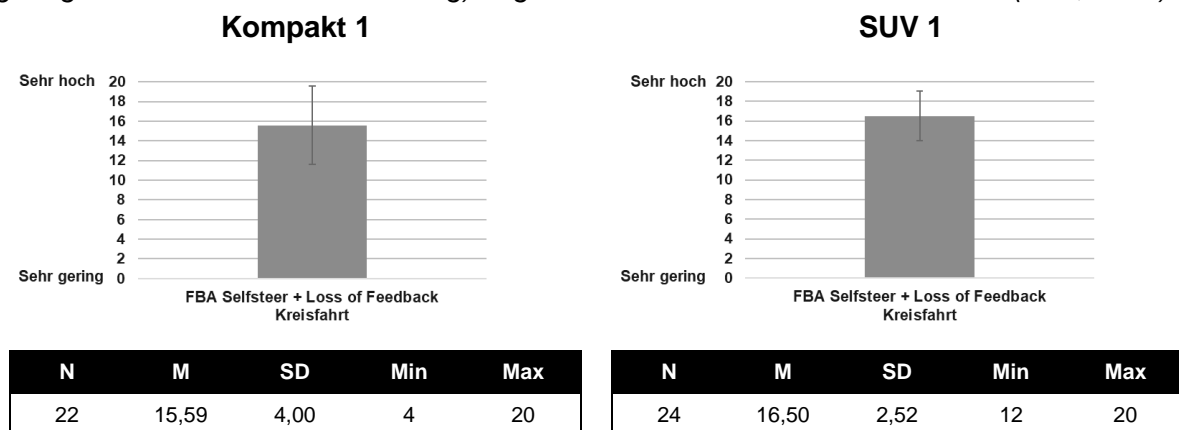


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung bei der Absolvierung des Manövers Kreis mit Fehleraufschaltung liegt in beiden Teilstudien im mittleren bis hohen Bereich der 20-stufigen Skala (Kompakt 1:  $M = 15,59$ ,  $SD = 4,00$ ; SUV 1:  $M = 16,50$ ,  $SD = 2,52$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 51.

Abbildung 51

*Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers FBA Selfsteer + Loss of Feedback erhoben auf einer 20-stufigen Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*



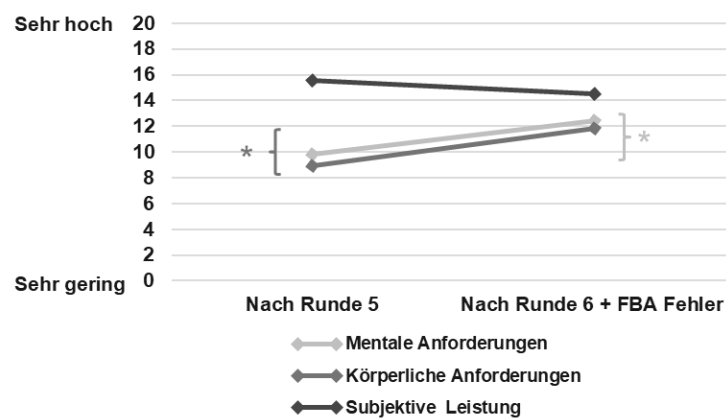
*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich

Zur Identifikation des Einflusses des Fehlerereignisses auf die empfundene Schwierigkeit des Manövers, erfolgte ein Vergleich der wahrgenommenen mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie der subjektiven Leistungseinschätzung nach Runde 5 ohne Fehleraufschaltung mit denen nach erfolgter Fehleraufschaltung in Runde 6. Basis dieser Herangehensweise war die Annahme, dass zu diesem Zeitpunkt die Lernkurve der

Versuchspersonen hinsichtlich der Absolvierung des Manövers abgeflacht ist und Unterschiede zwischen den Bewertungen auf die Aufschaltung des Fehlers zurückzuführen sind. Aufgrund der randomisierten Aufschaltung beider Fehler dieser Teilstudie (RWA- und FBA-Fehler) auf die Runden 3 und 6, ist die Anzahl der Datensätze, die in die Analyse einbezogen werden können, auf etwa die Hälfte der validen Datensätze (in denen die Aufschaltung des jeweiligen Fehlers in Runde 6 erfolgte) reduziert. Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs der beiden Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem  $t$ -Test. In dieser Teilstudie wurde deutlich, dass sowohl die mentalen als auch die körperlichen Anforderungen mit Aufschaltung des FBA-Fehlers in Runde 6 im Vergleich zur vorherigen Runde 5 signifikant anstiegen, ohne den mittleren Bereich der Skala zu überschreiten (mentale Anforderungen:  $t(10) = -2,21$ ,  $p = ,03$ ,  $d = -0,64$ , körperliche Anforderungen:  $t(10) = -2,55$ ,  $p = ,015$ ,  $d = -0,77$ ). Der Vergleich der subjektiv empfundenen eigenen Leistung zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Runden ( $t(10) = 0,91$ ,  $p = ,19$ ). Für eine graphische Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 52.

Abbildung 52

*Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Kreis in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des Fehlers FBA Selfsteer + Loss of Feedback. (Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)*



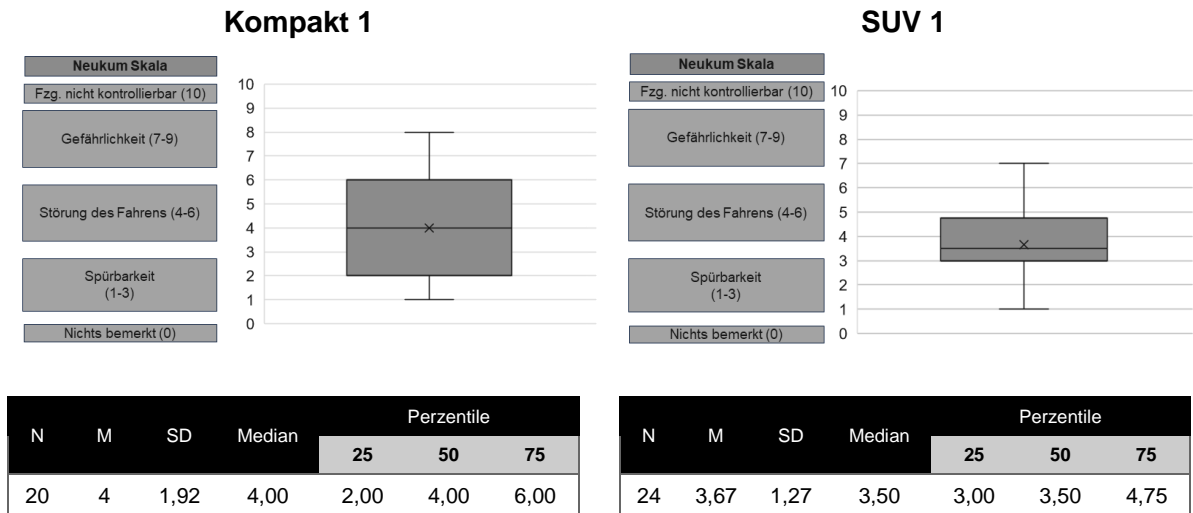
Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	11	9,82	4,14	4	18
	Nach Runde 6 + Fehler	11	12,45	4,89	6	20
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	11	8,91	3,39	5	16
	Nach Runde 6 + Fehler	11	11,82	4,26	5	18
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	11	15,55	2,91	11	20
	Nach Runde 6 + Fehler	11	14,55	4,41	4	20

Zum Zeitpunkt der Aufschaltung des Fehlers erfolgte eine Beobachtung des Verhaltens der Versuchspersonen durch die Versuchsleitung zur Erfassung der initialen Reaktion auf das Ereignis. 45,45% ( $n = 10$ ) der Versuchspersonen zeigten mit Auftreten des FBA-Fehlers *Selfsteer + Loss of Feedback* eine für die Versuchsleitung beobachtbare Reaktion, welche sich am häufigsten durch eine verbale Äußerung zeigte ( $n = 7$ ) und seltener durch einen Blick in den Spiegel ( $n = 2$ ). Im Anschluss an die Absolvierung des Manövers wurden die Versuchspersonen zusätzlich gefragt, ob ihnen während des Manövers etwas Besonderes aufgefallen ist. 100 % der Versuchspersonen ( $n = 22$ ) beantworteten diese Frage mit Ja. Bei der Beschreibung des Ereignisses wurde am häufigsten ( $n = 19$ ) ein Lenkeingriff (z.B. durch einen Spurassistenten) erwähnt. Deutlich weniger häufig wurde die Annahme erwähnt eine Pylone oder etwas Anderes überfahren zu haben ( $n = 4$ ). Daran anknüpfend wurden die Versuchspersonen gebeten ihre Reaktion auf das Ereignis auf affektiver, kognitiver und behavioraler Ebene zu beschreiben. Zur Erfassung der affektiven Reaktion wurden die Versuchspersonen gebeten ihre Gefühle zu beschreiben, die mit der Wahrnehmung des Ereignisses einhergingen. Die am häufigsten erwähnte Beschreibung war hier Überraschung / Erschrecken ( $n = 15$ ). Deutlich seltener, wenngleich am zweithäufigsten wurde mit jeweils  $n = 3$  Nennungen eine Irritation oder ein unangenehmes Gefühl erwähnt. Zur Erfassung der Reaktion auf kognitiver Ebene wurden die Versuchspersonen gebeten ihre Gedanken zum Zeitpunkt des Ereignisses zu beschreiben. Am häufigsten in diesem Zusammenhang wurde die aufkommende Frage „Was war das?“ erwähnt ( $n = 4$ ). Daneben wurden jeweils mit einer Häufigkeit von  $n = 3$  Gedanken geäußert sich zu weit rechts / links auf der Spur befunden zu haben, sodass das Fahrzeug eingreifen musste, eine Pylone oder etwas Anderes überfahren zu haben, oder dass es zu einem eigenen, einem initiierten oder einem Fehler des Fahrzeuges gekommen sein könnte. Zur Beschreibung der behavioralen Reaktion wurden die Versuchspersonen gebeten zu berichten, was sie mit Auftreten des Ereignisses getan haben. Am häufigsten ( $n = 10$ ) wurde ein Gegenlenken / eine Korrektur berichtet, gefolgt von der Aussage die Fahrt unverändert fortgesetzt zu haben ( $n = 8$ ).

Die Erhebung der subjektiv empfundenen Kritikalität der Fehleraufschaltung erfolgte mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003). An dieser Stelle erfolgt wiederum eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit denen aus der Teilstudie 1 (für Details siehe 3.1) mit dem Versuchsfahrzeug SUV 1, in welcher der gleiche Fehlertyp Berücksichtigung fand. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass potentielle Unterschiede in den Ergebnissen beider Teilstudien beschrieben, aufgrund der parallelen Manipulation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug jedoch nicht erklärt werden können. Für die Analyse wurden alle validen Datensätze berücksichtigt. Die mittlere wahrgenommene Kritikalität der Aufschaltung des FBA-Fehlers in der Teilstudie mit dem Kompakt 1 lag in einem unteren Bereich der Kategorie Störung des Fahrens auf der 11-stufigen Antwortskala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar) ( $M = 4,00$ ,  $SD = 1,92$ ). In der Teilstudie mit dem SUV 1 wurde die Kritikalität durchschnittlich in einem hohen Niveau der Kategorie Spürbarkeit und einem niedrigen Niveau der Kategorie Störung des Fahrens eingeordnet ( $M = 3,67$ ,  $SD = 1,27$ ). Die Streuung in der Teilstudie mit dem Kompakt 1 erscheint breiter. Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 53.

Abbildung 53

Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlertypen FBA Selfsteer + Loss of Feedback in den beiden Teilstudien mit den Versuchsfahrzeugen Kompakt 1 und SUV 1 erhoben mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003).



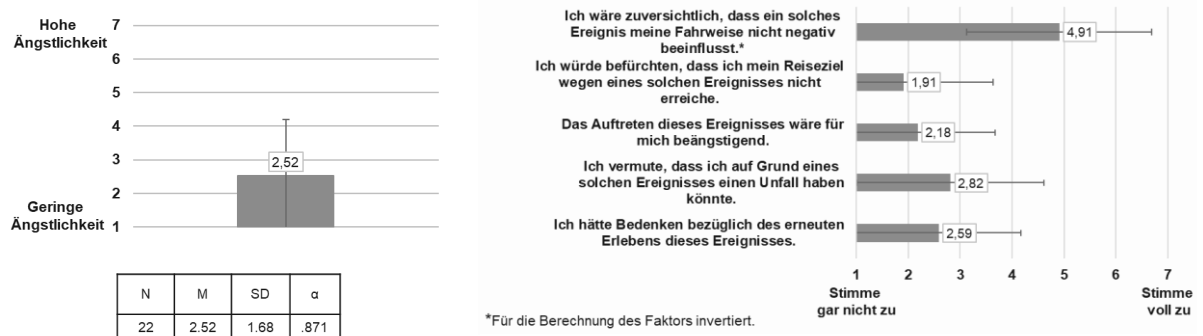
Anmerkung. Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Im Sinne der Erhebung des Situationserlebens wurden zwei angepasste Ratingskalen der Faktoren *Anxiety* und *Perceived Safety* des *Car Technology Acceptance Models* (Osswald et al., 2012) verwendet. Erhoben wurden diese Daten von allen Versuchspersonen, die angegeben haben, den Fehler bemerkt zu haben.

Die Ängstlichkeit mit Auftreten des Fehlerereignisses wurde durchschnittlich in einem niedrigen Bereich der 7-stufigen Skala (1 = geringe Ängstlichkeit – 7 = hohe Ängstlichkeit) bewertet ( $M = 2,52$ ,  $SD = 1,68$ ). Für eine Darstellung des Faktors *Anxiety* sowie der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 54.

Abbildung 54

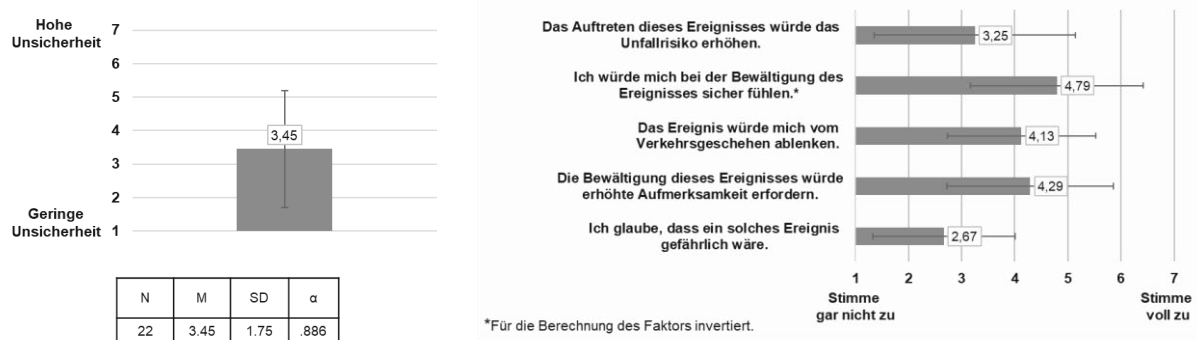
Ergebnisse des Faktors *Anxiety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses FBA Selfsteer + Loss of Feedback.



Die wahrgenommene Unsicherheit bei Auftreten des Fehlerereignisses wird in einem mittleren Bereich der 7-stufigen Skala (1 = geringe Unsicherheit – 7 = hohe Unsicherheit) eingeordnet ( $M = 3,45$ ,  $SD = 1,75$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* und der Einzelitems siehe Abbildung 55.

Abbildung 55

Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses *FBA Selfsteer + Loss of Feedback*.



### 3.3.2.2.5 Fehlerbild: *Geblockter RWA*

Im Folgenden werden die objektiven Ergebnisse hinsichtlich der Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge der Aufschaltung des Fehlerbildes *Geblockter RWA* im Manöver Slalom berichtet, sowie die Ergebnisse zur subjektiven Wahrnehmung der Fehleraufschaltung.

### 3.3.2.2.6 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistischen Verteilungen der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das Fehlerbild *Geblockter RWA* im Kompakt 1 sind in Abbildung 56 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierrate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug bei dem untersuchten Fehlerbild sind zusätzlich in Tabelle 18 zusammengefasst. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 56 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig.

Im vorliegenden Fall zeigt der SUV 1 im Vergleich zum Kompakt 1 bezüglich des Fehlerbildes *Geblockter RWA* tendenziell einen etwas geringeren Störeinfluss hinsichtlich des Lenkwinkel. Die infolge der Fehleraufschaltung gemessenen Störleakraten fallen dagegen etwas größer als im Kompakt 1 aus. Hinsichtlich der fahrdynamischen Störgrößen Störquerbeschleunigung und Störgierrate sind keine großen Unterschiede zwischen den beiden Fahrzeugen erkennbar.

Abbildung 56

Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störleakrate, Störquerbeschleunigung und Störgierate für das Fehlerbild Geblockter RWA (weiß: Kompakt 1; grau: SUV 1)

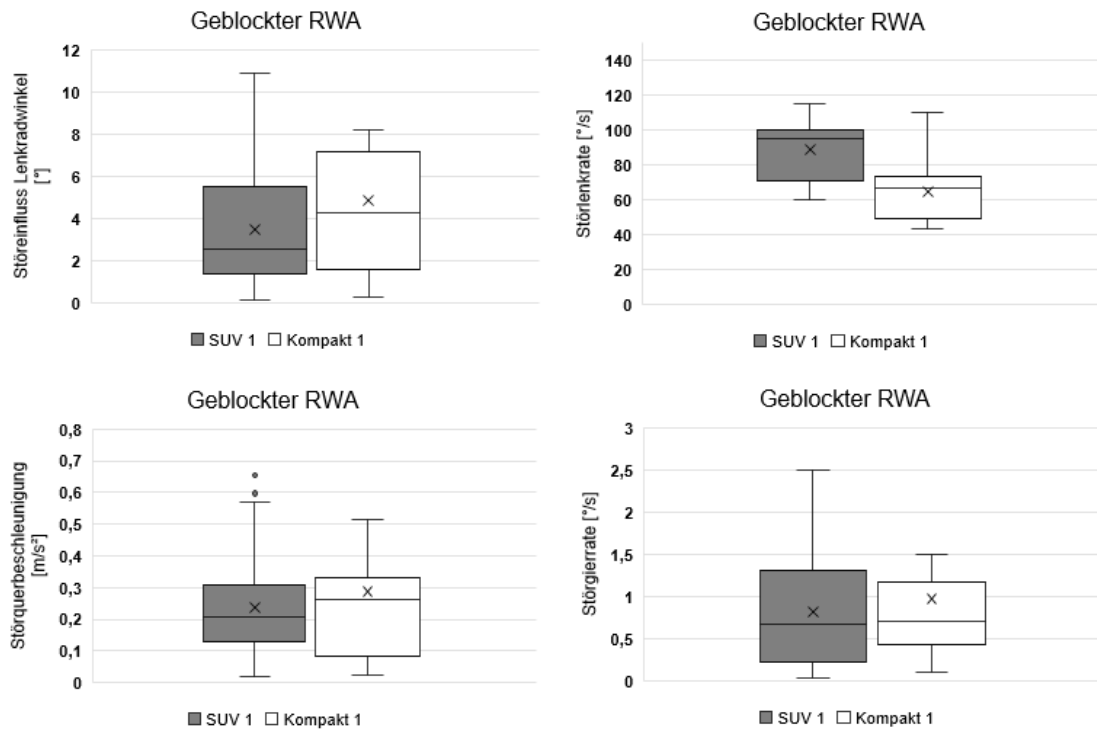


Tabelle 18

Deskriptive Statistikkenwerte Fehlerbild Geblockter RWA (Kompakt 1)

Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
Kompakt 1	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	15	4,84	3,79	4,26	0,25	16,26
	Störleakrate [°/s]	15	64,70	16,34	66,81	43,65	110,24
	Störquerbeschleunigung [m/s²]	15	0,29	0,28	0,26	0,02	1,17
	Störgierate [°/s]	15	0,97	0,87	0,71	0,10	3,83

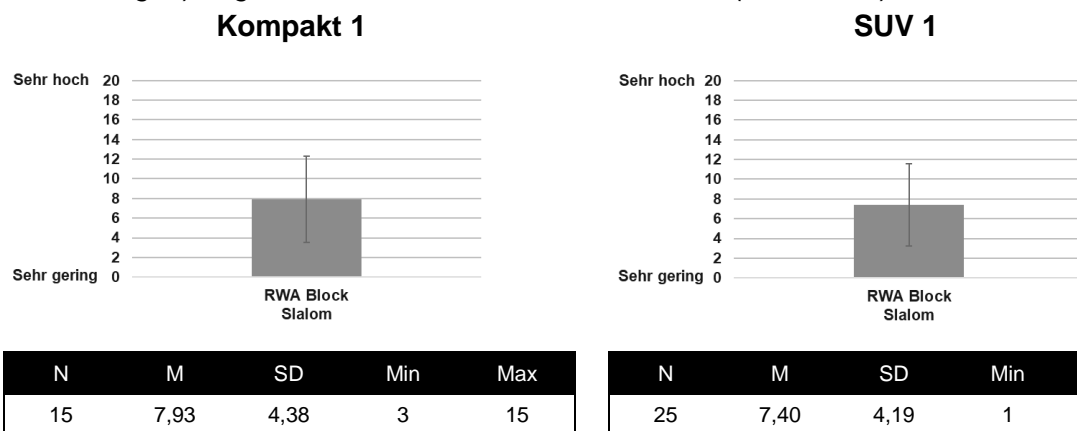


### 3.3.2.2.7 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

Nachfolgend wird auf die wahrgenommene Schwierigkeit des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung eingegangen, welche mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnten Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Skala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch) erhoben wurde. Zur Darstellung der Ergebnisse erfolgt eine Gegenüberstellung der Daten mit solchen, die in der Teilstudie 1 (für Details siehe 3.1) unter Verwendung des Versuchsfahrzeugs SUV 1 hinsichtlich des gleichen Fehlertyps erhoben wurden. Potentielle Unterschiede zwischen den beiden Teilstudien können dargestellt, darüber hinaus jedoch aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug nicht erklärt werden. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze. In beiden Teilstudien wurden die mentalen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung im mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala bewertet (Kompakt 1:  $M = 7,93$ ,  $SD = 4,38$ ; SUV 1:  $M = 7,40$ ,  $SD = 4,19$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 57.

Abbildung 57

*Mentale Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers Geblockter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

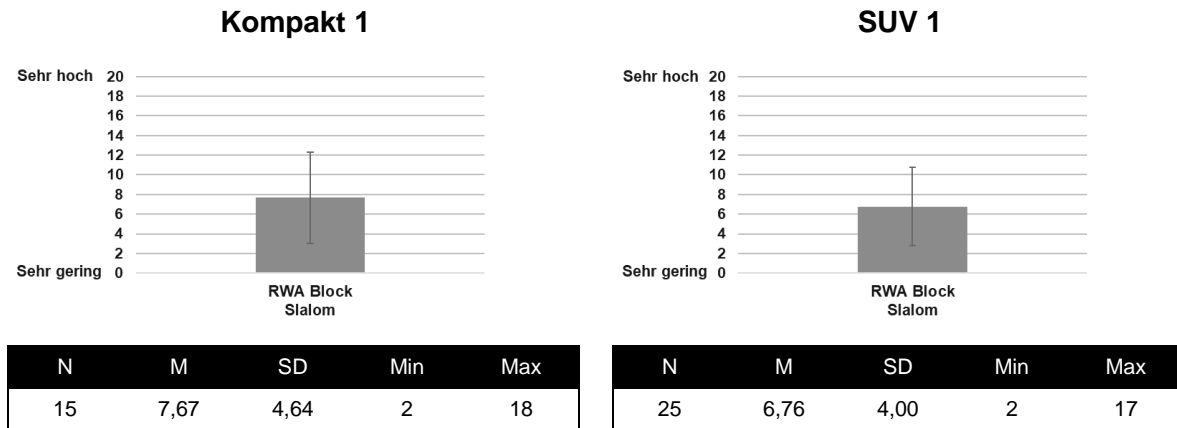


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung wurden in beiden Teilstudien in einem niedrigen bis mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala eingeordnet (Kompakt 1:  $M = 7,67$ ,  $SD = 4,64$ ; SUV 1:  $M = 6,76$ ,  $SD = 4,00$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 58.

Abbildung 58

*Körperliche Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers Geblockter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

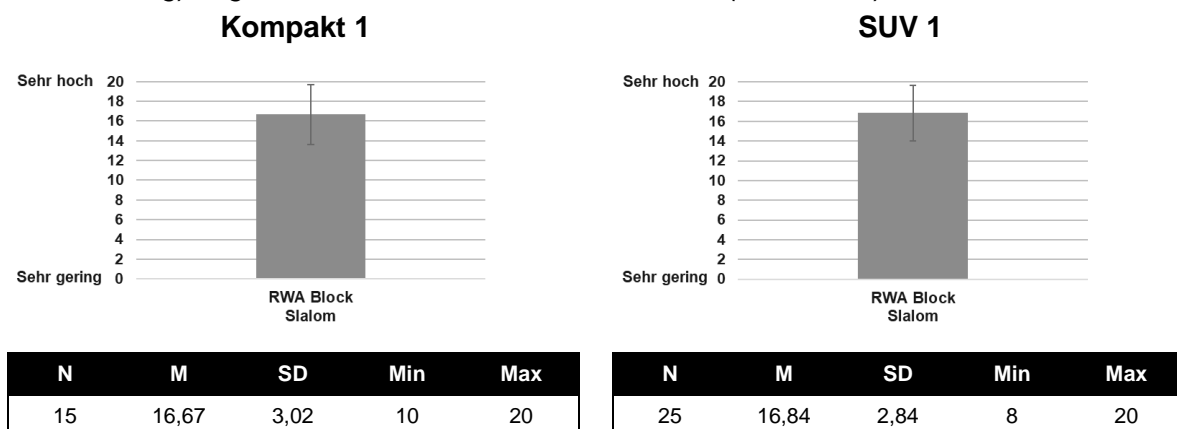


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die subjektive Leistung hinsichtlich der Absolvierung des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung wurde in beiden Teilstudien im mittleren bis hohen Bereich auf der 20-stufigen Skala eingeschätzt (Kompakt 1:  $M = 16,67$ ,  $SD = 3,02$ ; SUV 1:  $M = 16,84$ ,  $SD = 2,84$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 59.

Abbildung 59

*Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers Geblockter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*



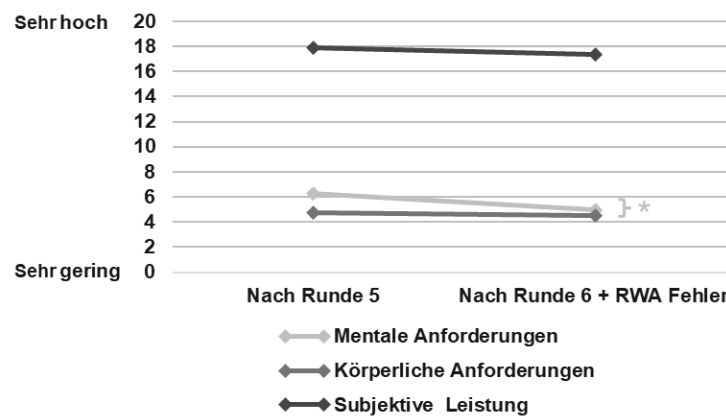
*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Um heraus zu finden wie groß der Einfluss des Fehlerereignisses auf die empfundene Schwierigkeit des Manövers Slalom ist, erfolgte ein Vergleich der empfundenen mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung nach Runde 5 ohne Fehleraufschaltung mit denen nach erfolgter Fehleraufschaltung in Runde 6.

Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs der beiden Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem  $t$ -Test. Es zeigte sich, dass die mentalen Anforderungen nach Runde 6 mit Fehleraufschaltung im Vergleich zur Runde 5 ohne Fehleraufschaltung statistisch signifikant geringer ausfielen, ohne den niedrigen bis mittleren Bereich der Skala zu verlassen ( $t(7) = 3,04, p = ,009, d = 1,07$ ). Die Einschätzung der körperlichen Anforderungen sowie der subjektiven Leistung bleibt über beide Runden konstant (körperliche Anforderungen:  $t(7) = 1,00, p = ,18$ ; subjektive Leistung:  $t(7) = 1,08, p = ,16$ ). Für eine Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 60.

Abbildung 60

Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Slalom in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des Fehlers Geblockter RWA. (Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)



Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	8	6,25	3,45	3	14
	Nach Runde 6 + Fehler	8	5,00	3,02	3	12
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	8	4,75	2,44	2	10
	Nach Runde 6 + Fehler	8	4,50	2,45	2	10
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	8	17,88	2,80	13	20
	Nach Runde 6 + Fehler	8	17,38	4,00	10	20

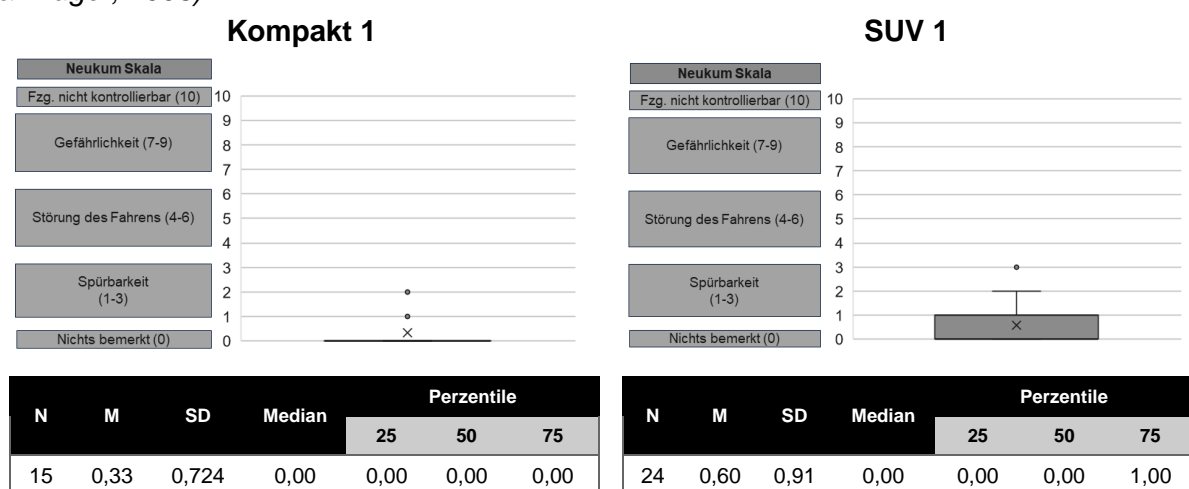
Zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung erfolgte eine Verhaltensbeobachtung durch die Versuchsleitung mit dem Ziel die initiale Reaktion der Versuchspersonen zu erfassen. Mit Aufschaltung des RWA-Fehlers konnte jedoch bei keiner Versuchsperson eine für die

Versuchsleitung beobachtbare Reaktion beobachtet werden. Auf Nachfrage gaben 20 % der Versuchspersonen an ( $n = 3$ ), dass ihnen etwas aufgefallen sei. Beschrieben wurde, dass das Fahrzeug leicht abgebremst hat ( $n = 1$ ), oder dass es zu einem leichten Rumpeln gekommen ist ( $n = 1$ ). Die Versuchspersonen, denen etwas Besonderes während der Absolvierung des Manövers aufgefallen war, wurden im Folgenden gebeten ihre Reaktion auf affektiver, kognitiver und behavioraler Ebene zu beschreiben. Sowohl auf affektiver, als auch auf kognitiver Ebene konnte keine spezifische Reaktion festgestellt werden. Hinsichtlich der behavioralen Reaktion auf das Fehlerereignis beschrieben Teilnehmende ihre Aufmerksamkeit gesteigert zu haben ( $n = 2$ ) oder ihre Fahrt unverändert fortgesetzt zu haben ( $n = 2$ ). Sollte sich das Ereignis wiederholen, würde keine der Versuchspersonen anders reagieren, als im Versuch gezeigt.

Zur Erhebung der wahrgenommenen Kritikalität des Fehlerereignisses wurde die Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003) verwendet. Die Ergebnisse werden wiederum mit denen der Teilstudie 1 (für Details siehe 3.1), welche unter Verwendung des SUV 1 als Versuchsfahrzeug durchgeführt wurde, gegenübergestellt. Eine Erklärung potentieller Unterschiede zwischen den Teilstudien ist aufgrund der parallelen Manipulation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug nicht möglich. Für die Analyse wurden alle validen Datensätze berücksichtigt. Der Fehler *Geblockter RWA* wird in beiden Teilstudien entweder nicht bemerkt, oder hinsichtlich seiner Kritikalität auf einem niedrigen Niveau der Kategorie Spürbarkeit auf der 11-stufigen Antwortskala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar) eingeordnet (Kompakt 1:  $M = 0,33$ ,  $SD = 0,72$ ; SUV 1:  $M = 0,60$ ,  $SD = 0,91$ ). Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 61.

Abbildung 61

*Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlertypen Geblockter RWA in den beiden Teilstudien mit den Versuchsfahrzeugen Kompakt 1 und SUV 1 erhoben mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003).*

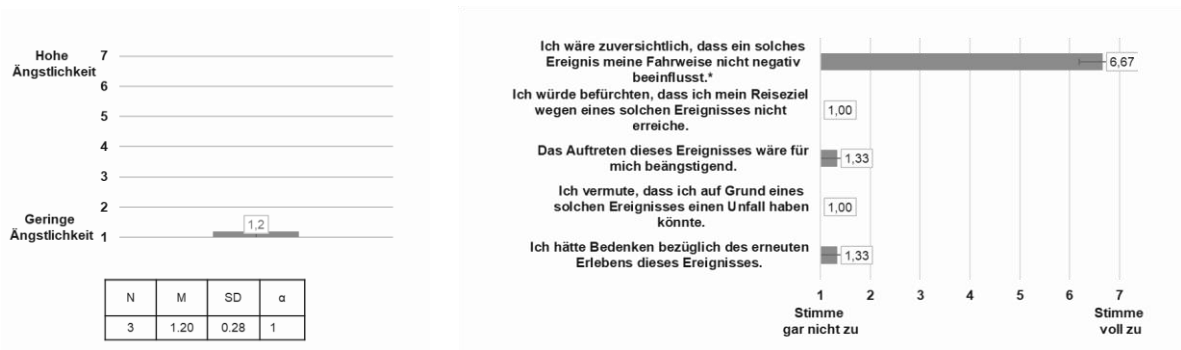


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die Ängstlichkeit bei Bemerkten des Fehlerereignisses wird auf einem niedrigen Niveau der 7-stufigen Skala (1 = geringe Ängstlichkeit – 7 = hohe Ängstlichkeit) eingeordnet ( $M = 1,20$ ,  $SD = 0,28$ ). Für eine Darstellung des Faktors, sowie der Ergebnisse der Einzelitems siehe Abbildung 62.

Abbildung 62

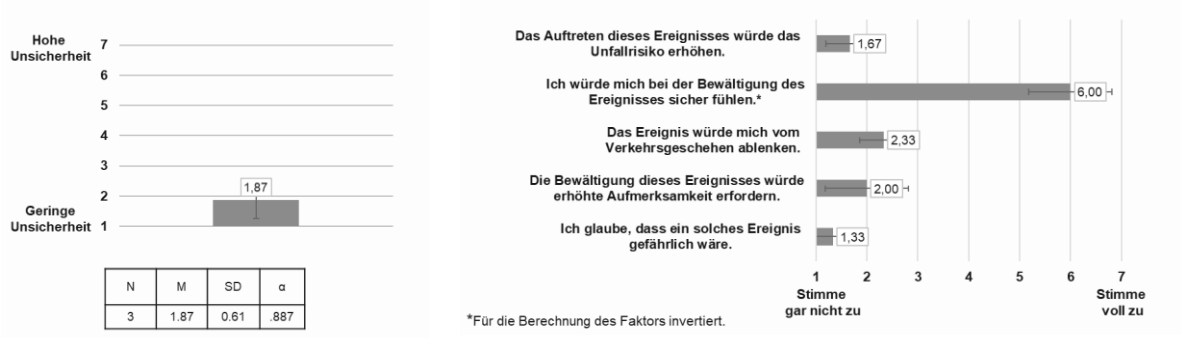
Ergebnisse des Faktors Anxiety (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses Geblockter RWA.



Die wahrgenommene Unsicherheit mit Bemerkten des Ereignisses wurde ebenfalls in einem niedrigen Bereich der 7-stufigen Skala (1 = geringe Unsicherheit – 7 = hohe Unsicherheit) eingeordnet ( $M = 1,87$ ,  $SD = 0,61$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors sowie der zugrundeliegenden Einzelitems siehe Abbildung 63.

Abbildung 63

Ergebnisse des Faktors Perceived Safety (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses Geblockter RWA.



### 3.3.2.2.8 Nachbefragung

Nach einer Aufklärung der Versuchspersonen hinsichtlich des Versuchsgegenstands erfolgte eine Nachbefragung. Die Fragen wurden von den Versuchspersonen nur beantwortet, sofern sie den jeweiligen Fehler im Rahmen der Versuchsdurchführung bemerkt hatten. Zunächst wurden die Versuchspersonen gebeten anzugeben wie sehr sie der Aussage „Ich würde ein Fahrzeug nutzen, bei dem dieser Fehler auftreten könnte“ auf einer 7-stufigen Skala

zustimmen (1 = stimme gar nicht zu – 7 = stimme voll zu). Der Fehler *FBA Selfsteer + Loss of Feedback* wurde von allen Versuchspersonen bemerkt ( $N = 13$ ). Die durchschnittliche Nutzungsintention liegt im mittleren Bereich der Skala ( $M = 4,23$ ,  $SD = 2,59$ ). Der Fehler *Geblockter RWA* wurde nur  $n = 2$  Personen bemerkt. Diese würden ein Fahrzeug eher nutzen, bei dem ein solcher Fehler auftreten könnte ( $M = 5,00$ ,  $SD = 2,83$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 64.

Abbildung 64

*Nutzungsintention hinsichtlich eines Fahrzeuges, welches den erlebten Fehler FBA Selfsteer & Loss of Feedback oder Geblockter RWA aufweisen könnte, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.*



Fehler	N	M	SD	Min	Max
FBA Selfsteer + Loss of Feedback	13	4,23	2,59	1	7
RWA Block	2	5,00	2,83	3	7

*Anmerkung.* Die Beantwortung des Items erfolgte lediglich durch Versuchspersonen, die den jeweiligen Fehler im Versuchsdurchlauf bemerkt haben.

Ebenso wurden die Versuchspersonen gebeten für jeden bemerkten Fehler anzugeben, inwiefern sie zustimmen würden bei Auftreten eines solchen Fehlers mit dem Fahrzeug eine Werkstatt aufzusuchen. Für den FBA-Fehler zeigt sich weder eine eindeutige Zustimmung, noch eine eindeutige Ablehnung der Aussage ( $M = 4,38$ ,  $SD = 2,57$ ). Die beiden Versuchspersonen, die den RWA-Fehler bemerkt haben, stimmen für diesen eher zu, eine Werkstatt aufsuchen zu wollen ( $M = 5,50$ ,  $SD = 2,12$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 65.

Abbildung 65

Absicht eine Werkstatt aufzusuchen bei Auftreten der erlebten Fehler *FBA Selfsteer + Loss of Feedback* oder *Geblockter RWA* im eigenen Fahrzeug, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.



Fehler	N	M	SD	Min	Max
FBA Selfsteer + Loss of Feedback	13	4,38	2,57	1	7
RWA Block	2	5,50	2,12	4	7

### 3.3.3 Zusammenfassung Studie 3

Im Folgenden wird eine Übersicht hinsichtlich der Hauptergebnisse der durchgeführten Teilstudie 3 (Fahrzeug: Kompakt 1; Fehler: *FBA Selfsteer + Loss of Feedback* / *Geblockter RWA*) gegeben.

- Die Gestaltung des Parcours erscheint angemessen, die Versuchspersonen werden weder unter- noch überfordert.
- Es wird eine Lernkurve der Versuchspersonen über den Verlauf der Testung deutlich.
- Für den Fehler *FBA Selfsteer + Loss of Feedback* konnte die aufgestellte Forschungshypothese beibehalten werden. Für den Fehler *Geblockter RWA* kann die Hypothese nicht geprüft werden, da die vorgegebene Stichprobengröße an validen Daten nicht zur Auswertung vorlag.
- Der Fehler *FBA Selfsteer + Loss of Feedback*
  - wurde von allen Versuchspersonen bemerkt;
  - steht in Verbindung mit einem signifikanten Anstieg der empfunden mentalen und körperlichen Anforderungen, die empfundene eigene Leistung bleibt im betreffenden Fahrmanöver konstant;
  - wird auf affektiver Ebene mehrheitlich mit Erschrecken und Überraschung assoziiert;

- provoziert bei einem Teil der Versuchspersonen eine behaviorale Reaktion (Geschwindigkeitsreduktion/Lenkkorrektur), andere Versuchspersonen gaben an, die Fahrt unverändert fortgesetzt zu haben;
- wird bezüglich der Kritikalität auf einem hohen Niveau der „Spürbarkeit“ bis zu einer hohen Ausprägung der Kategorie „Störung des Fahrens“ eingeordnet.
- Der Fehler *Geblockter RWA*
  - wurde von der Mehrheit der Versuchspersonen (80%) nicht bemerkt;
  - bewirkt keinen signifikanten Anstieg der empfunden mentalen und körperlichen Anforderungen sowie keine signifikante Verschlechterung der subjektiv empfundenen Leistung im betreffenden Fahrmanöver;
  - führte bei den Versuchspersonen, die den Fehler detektiert haben, nicht zu einer spezifischen affektiven oder behavioralen Reaktion;
  - wird bezüglich der Kritikalität auf einem niedrigen bis mittleren Niveau der „Spürbarkeit“ eingeordnet, wenn dieser von Versuchspersonen bemerkt wurde.

Die inhaltliche Diskussion der Ergebnisse der Teilstudien erfolgt übergeordnet für die gesamte Versuchsreihe in Abschnitt 4.

### 3.4 Studie 4

Der vierte Studienteil wurde mit dem Versuchsfahrzeug Kompakt 3 im Zeitraum vom 20. bis 25. April 2022 durchgeführt. Bei den ausgewählten Fehlerbildern handelte es sich um den *Geblockten FBA*, welcher im Manöver Slalom aufgeschaltet wurde, sowie um den RWA-Fehler *Rechteckschwingung* im zugehörigen Manöver Geradausfahrt. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieses Studienteils detailliert dargestellt.

#### 3.4.1 Stichprobe

Die Stichprobengröße beträgt  $N = 28$ , davon sind 18 Personen männlich. Das mittlere Alter beträgt  $M = 40,18$  Jahre ( $SD = 14,53$  Jahre), wobei die jüngste Versuchsperson 22 Jahre und die älteste 64 Jahre alt ist. Die mittlere jährliche Fahrleistung beträgt  $M = 15.089,29$  km ( $SD = 11.120,60$  km) mit einer Spannweite von 3.000 km bis 60.000 km. Eine Versuchsperson gibt eine Sehbeeinträchtigung in Form eines reduzierten Sehfelds an, welche jedoch nach eigener Angabe kein Hindernis darstellt. Bei allen weiteren Teilnehmenden liegen keine nicht korrigierten Seh- oder Hörbeeinträchtigungen vor.

#### 3.4.2 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt aufgeteilt in die beiden Abschnitte fehlerunabhängige und fehlerspezifische Ergebnisse. Zunächst erfolgt der Bericht von Ergebnissen, welche sich von den Fehleraufschaltungen unabhängig, auf die allgemeine Schwierigkeit der gewählten Manöver im Sinne der Prüfung des gewählten Versuchsdesigns beziehen. Anschließend erfolgt die Darstellung der fehlerspezifischen Ergebnisse. In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Ergebnisse zur Prüfung der Kontrollierbarkeit beider Fehler (FBA und RWA) eingegangen. Darauf folgend werden die subjektiven Versuchsdaten hinsichtlich des Erlebens



der Fehleraufschaltung, sowie die objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehleraufschaltung zunächst für den FBA- und darauf folgend für den RWA-Fehler berichtet.

### 3.4.2.1 Fehlerunabhängige Ergebnisse

Zunächst erfolgte die Erhebung der wahrgenommenen Schwierigkeit der Manöver angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) mittels drei Items hinsichtlich der mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch). Die Erhebung erfolgte an zwei Zeitpunkten, zu Beginn der Testung (im Anschluss an die Eingewöhnungsfahrt) sowie vor Beendigung der Testung (im Anschluss an die Fahrt 5). Zur inferenzstatistischen Analyse der Lernkurve erfolgte ein Vergleich der Anforderungen von Beginn und Ende der Fahrt mittels gepaartem  $t$ -Test. In die Analyse einbezogen wurden alle Versuchspersonen, welche für beide Fehlerfälle valide Datensätze aufwiesen.

Zu beiden Befragungszeitpunkten wurden die drei Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom hinsichtlich der mentalen Anforderungen bei der Absolvierung in einem niedrigen bis mittleren Bereich der 20-stufigen Skala eingeordnet. Das Manöver Geradeausfahrt scheint mit den vergleichsweise geringsten mentalen Anforderungen einherzugehen. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 19. Im Vergleich zum Beginn der Testung werden die Manöver Geradeausfahrt und Slalom vor der letzten Fahrt (nach Runde 5) als mental weniger anspruchsvoll empfunden (Geradeausfahrt:  $t(19) = 2,28$ ,  $p = ,018$ ,  $d = 0,51$ , Slalom:  $t(19) = 2,7$ ,  $p < ,01$ ,  $d = 0,6$ ).

Tabelle 19

*Mentale Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala TLX (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA (Hart, 2006).*

Mentale Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	20	6,05	4,01	1	13
	Vor der letzten Runde	20	4,35	2,80	1	10
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	20	10,15	4,16	2	15
	Vor der letzten Runde	20	8,95	3,97	2	15
Slalom	Nach Eingewöhnung	20	12,10	4,28	4	17
	Vor der letzten Runde	20	9,90	4,46	2	17

Auch die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung der Manöver werden über den Verlauf der Testung im niedrigen bis mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala bewertet. Das Manöver Geradeausfahrt erscheint wiederum als das am wenigsten anforderungsreiche Manöver. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 20. Die körperlichen Anforderungen in den Manövern Geradeausfahrt und Kreisfahrt bleiben über den Verlauf der Testung konstant (Geradeausfahrt:  $t(19) = 0,0$ ,  $p = ,1,0$ , Kreisfahrt:  $t(19) = -0,05$ ,  $p = ,96$ ), wohingegen sie für das Manöver Slalom signifikant sinken ( $t(19) = 2,13$ ,  $p = ,023$ ,  $d = 0,48$ ).

Tabelle 20

*Körperliche Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Körperliche Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	20	3,60	2,35	1	8
	Vor der letzten Runde	20	3,60	2,28	1	9
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	20	7,75	3,74	2	17
	Vor der letzten Runde	20	7,80	3,87	2	15
Slalom	Nach Eingewöhnung	20	10,95	4,38	3	17
	Vor der letzten Runde	20	9,40	4,65	3	18

Ihre eigene Leistung bzgl. der Absolvierung der drei Manöver schätzen die Teilnehmenden über den gesamten Verlauf auf einem hohen Niveau der 20-stufigen Antwortskala ein. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 21. Am Ende der Testung werden die Leistungen in allen Manövern signifikant besser eingeschätzt, als zu Beginn der Testung (Geradeausfahrt:  $t(19) = -3,20$ ,  $p = ,003$ ,  $d = -0,72$ , Kreisfahrt:  $t(19) = -2,56$ ,  $p < ,01$ ,  $d = -0,57$ , Slalom:  $t(19) = -6,27$ ,  $p < ,001$ ,  $d = -1,4$ ).

Tabelle 21

*Einschätzung der eigenen Leistung in den Manövern Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Einschätzung der eigenen Leistung						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	20	15,45	3,66	7	20
	Vor der letzten Runde	20	17,40	1,93	13	20
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	20	13,45	3,49	8	20
	Vor der letzten Runde	20	15,70	2,32	10	19
Slalom	Nach Eingewöhnung	20	13,05	2,93	7	20
	Vor der letzten Runde	20	16,40	1,79	12	20

### 3.4.2.2 Fehlerspezifische Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Ergebnisse zur Prüfung der Kontrollierbarkeit der beiden Fehler eingegangen. Im Anschluss erfolgt separat für beide Fehler zunächst die Darstellung der subjektiven Ergebnisse hinsichtlich des Erlebens der Fehleraufschaltung und daran anschließend der objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehlerereignisse.

#### 3.4.2.2.1 Kontrollierbarkeit – Hypothesenprüfung

Im Rahmen der vierten Teilstudie gilt sowohl für den im Slalom aufgeschalteten Fehler *Geblockter FBA*, sowie für das Fehlerbild *RWA Rechteckschwingung*, welcher in der Geradeausfahrt aufgeschaltet wurde, dass 100 % der Versuchspersonen, welche valide Datensätze aufwiesen, die Fahrspur mit Fehleraufschaltung nicht verlassen haben. 100 % der Datensätze umfassen dabei mindestens  $N = 20$ . Die Hypothese kann somit für die in diesem Studienteil ausgewählte Kombination aus Fahrzeug und Fehlern beibehalten werden. Im Rahmen der durchgeführten Studie waren beide Fehler auf dem von Experten festgelegten C0-Level für alle Versuchspersonen kontrollierbar.

#### 3.4.2.2.2 Fehlerbild: *Geblockter FBA*

Bezogen auf das Fehlerbild *Geblockter FBA* werden nachfolgend die objektiven Ergebnisse zur Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge des Fehlers berichtet, sowie die Ergebnisse hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung der Aufschaltung.

### 3.4.2.2.3 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistischen Verteilungen der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das Fehlerbild *Geblockter FBA* im Fahrzeug Kompakt 3 sind in Abbildung 66 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug des untersuchten Fehlerbildes sind zusätzlich in Tabelle 22 abgebildet. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 66 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig.

Im vorliegenden Fall zeigt der Kompakt 3 im Vergleich zum SUV 2 bezüglich des Fehlerbildes *Geblockter FBA* deutlich geringere Störeinflüsse in Bezug auf die Lenkreaktion der Fahrer und die resultierende Fahrzeugdynamik. Hierbei ist zu beachten, dass die Aufschaltdauer des Fehlers beim Kompakt 3 mit 100 ms nur halb so lang wie die Fehleraufschaltdauer im SUV 2 ist. Außerdem wurden die Fehler jeweils an anderen Stellen im Slalomparcours aufgeschaltet.

Abbildung 66

Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störleakrate, Störquerbeschleunigung und Störgierate für das Fehlerbild *Geblockter FBA* (grau: Kompakt 3; weiß: SUV 2)

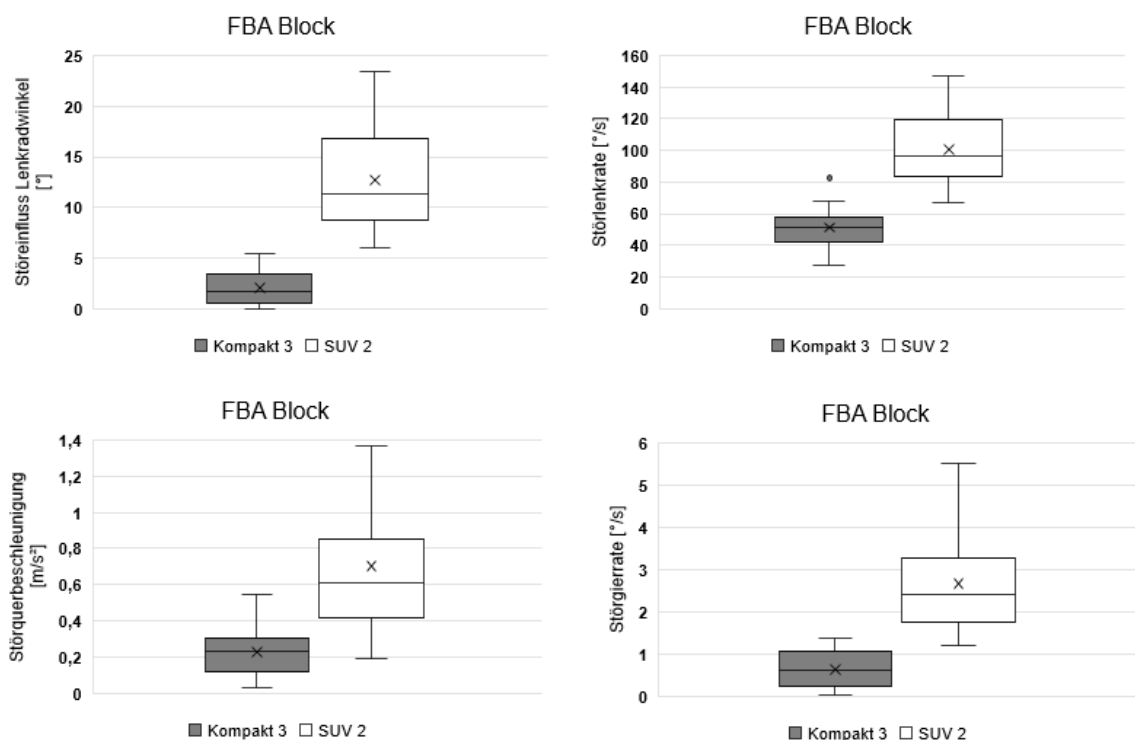


Tabelle 22

Deskriptive Statistikennwerte Fehlerbild Geblockter FBA (Kompakt 3)

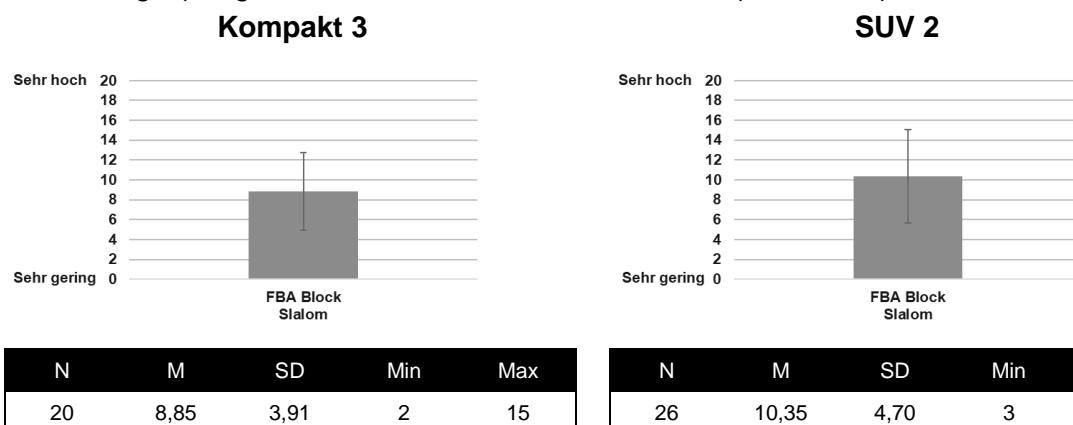
Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
Kompakt 3	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	20	2,04	1,60	1,64	0,00	5,44
	Störleakrate [°/s]	20	51,32	12,38	51,28	27,40	82,80
	Störquerbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	20	0,23	0,13	0,23	0,03	0,55
	Störgierate [°/s]	20	0,62	0,43	0,61	0,01	1,37

### 3.4.2.2.4 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

Zunächst wird auf die empfundene Schwierigkeit des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung eingegangen. Erfasst wurde diese mittels der drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items zu den empfundenen mentalen und körperlichen Anforderungen sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch). Da der gleiche Fehlertyp auch in der Teilstudie 6 (für Details siehe 3.6) mit dem Versuchsfahrzeug SUV 2 Berücksichtigung fand, werden die Ergebnisse dieser Teilstudie hinsichtlich der empfundenen Schwierigkeit des Manövers im Fehlerfall bereits hier als Vergleichsbasis dargestellt. Eine Erklärung potentieller Unterschiede in den Ergebnissen beider Teilstudien ist aufgrund der parallelen Variation von Versuchsfahrzeug und Fehlerparametrierung nicht möglich. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze. Mit Aufschaltung des Fehlers *Geblockter FBA* werden die mentalen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Slalom im mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala eingeordnet (Kompakt 3:  $M = 8,85$ ,  $SD = 3,91$ ; SUV 2:  $M = 10,35$ ,  $SD = 4,70$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 67.

Abbildung 67

Mentale Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers *Geblockter FBA* erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).

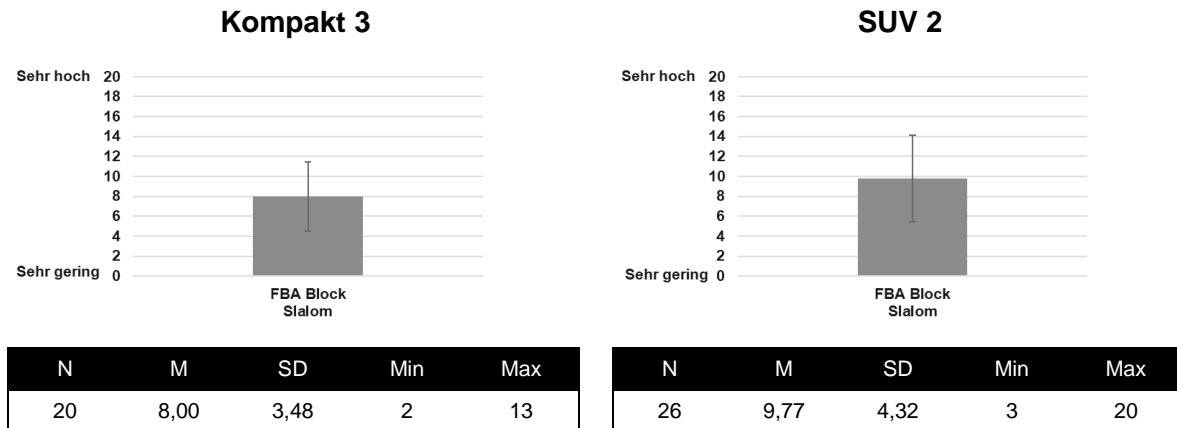


Anmerkung. Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung wurden in beiden Teilstudien im mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala eingeordnet (Kompakt 3:  $M = 8,00$ ,  $SD = 3,48$ ; SUV 2:  $M = 9,77$ ,  $SD = 4,32$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 68.

Abbildung 68

*Körperliche Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers Geblockter FBA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

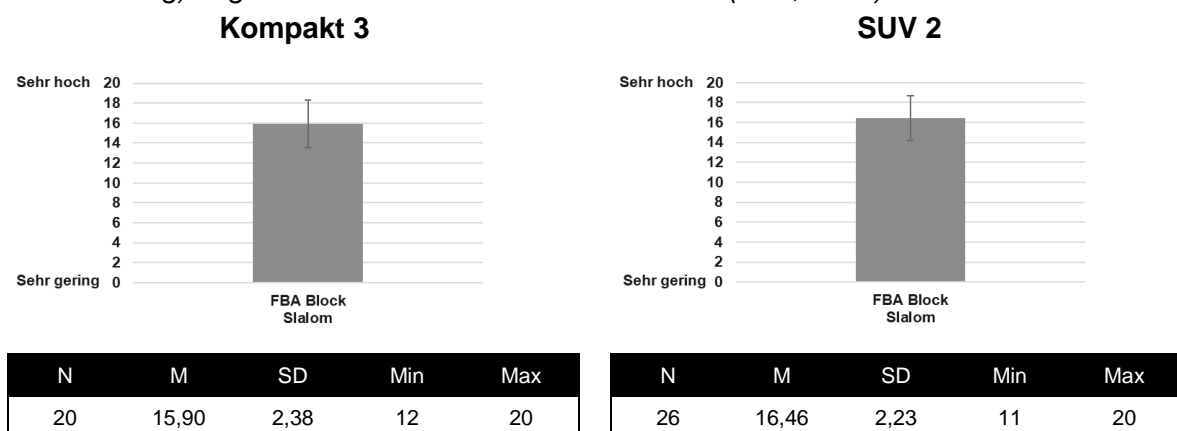


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung bei der Absolvierung des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung fiel in beiden Teilstudien auf einem hohen Niveau der 20-stufigen Antwortskala aus (Kompakt 3:  $M = 15,90$ ,  $SD = 2,38$ ; SUV 2:  $M = 16,46$ ,  $SD = 2,23$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 69.

Abbildung 69

*Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers Geblockter FBA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

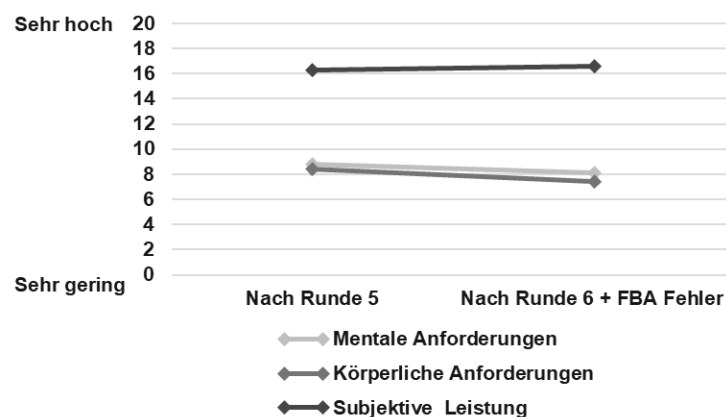


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Um den Anteil des Fehlers auf die wahrgenommene Schwierigkeit der Manöver beschreiben zu können, wurden die Angaben zu den wahrgenommenen mentalen und körperlichen Anforderungen sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung nach Runde 5 ohne Fehleraufschaltung mit denen nach erfolgter Fehleraufschaltung in Runde 6 verglichen. Grundlage dieser Herangehensweise war die Annahme, dass die Lernkurve der Teilnehmenden hinsichtlich der Absolvierung der Manöver zu diesem Zeitpunkt der Testung abgeflacht ist und Unterschiede zwischen den Bewertungen auf die Aufschaltung des Fehlers zurückzuführen sind. Aufgrund der randomisierten Aufschaltung beider Fehler (RWA- und FBA-Fehler) auf die Runden 3 und 6, ist hierbei zu berücksichtigen, dass lediglich etwa die Hälfte der validen Datensätze (in denen die Aufschaltung des jeweiligen Fehlers in Runde 6 erfolgte) für die Analyse herangezogen werden kann. Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs beider Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem  $t$ -Test. In der Teilstudie mit dem Versuchsfahrzeug Kompakt 3 blieben die mentalen und körperlichen Anforderungen in der letzten Runde mit Aufschaltung des Fehlers *Geblockter FBA* im Vergleich zur vorangegangenen Runde 5 konstant (mentale Anforderungen:  $t(9) = 1,21$ ,  $p = ,13$ ; körperlichen Anforderungen:  $t(9) = 1,63$ ,  $p = ,07$ ). Ebenso zeigt der Vergleich der subjektiven Leistungseinschätzung keinen signifikanten Unterschied ( $t(9) = -0,67$ ,  $p = ,26$ ). Für eine graphische Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 70.

Abbildung 70

*Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Slalom in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des Fehlers Geblockter FBA. (Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)*



Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	10	8,80	4,73	2	16
	Nach Runde 6 + Fehler	10	8,10	3,93	4	15
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	10	8,40	5,25	3	18
	Nach Runde 6 + Fehler	10	7,40	4,01	2	13
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	10	16,30	2,31	12	20
	Nach Runde 6 + Fehler	10	16,60	2,50	12	20

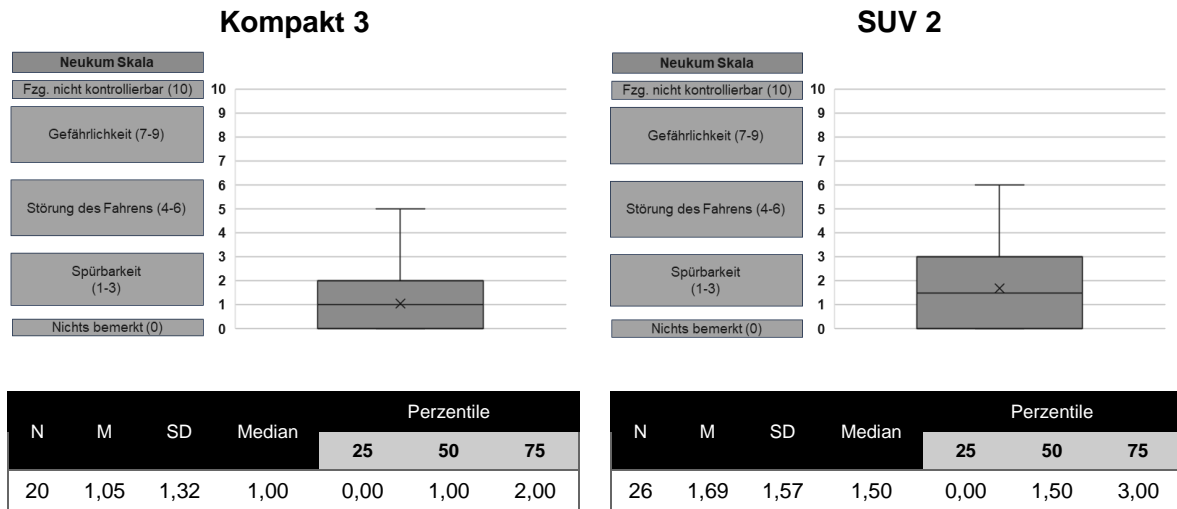
Mit Aufschaltung des Fehlers erfolgte eine Beobachtung des Verhaltens der Versuchspersonen durch die Versuchsleitung mit dem Ziel die initiale Reaktion der Teilnehmenden zu erfassen. Im Rahmen dieser Teilstudie konnte bei keiner Versuchsperson eine für die Versuchsleitung merkbare Reaktion beobachtet werden. Auf Nachfrage gaben 55 % der Teilnehmenden ( $n = 11$ ) an, etwas Besonderes bemerkt zu haben und beschrieben dies mehrheitlich mit einem Eingriff in die Lenkung. Die Teilnehmenden, die berichteten, den Fehler bemerkt zu haben, wurden im Folgenden hinsichtlich ihrer affektiven, kognitiven und behavioralen Reaktion auf das Ereignis befragt. Zur Erfassung der affektiven Reaktion wurden sie gebeten, ihre Gefühle zum Zeitpunkt des Ereignisses zu beschreiben. Die meisten Versuchspersonen berichteten keine spezifische affektive Reaktion ( $n = 8$ ), vereinzelt ( $n = 3$ ) wurde eine Überraschung erwähnt. Zur Einschätzung der kognitiven Reaktion wurden die Versuchspersonen gebeten, die Gedanken zu beschreiben, welche sie zum Zeitpunkt der Wahrnehmung des Ereignisses hatten. Auch diesbezüglich wurde keine spezifische Reaktion deutlich. Vereinzelt Personen ( $n = 3$ ) gaben an, über die Ursachen des Ereignisses nachgedacht zu haben. Zur Erfassung der behavioralen Reaktion auf die Fehleraufschaltung wurden die Versuchspersonen gefragt, was sie während des Ereignisses getan haben. Die meisten Teilnehmenden ( $n = 7$ ) beschreiben subjektiv ihre Fahrt unverändert fortgesetzt zu haben. Einzelne Versuchspersonen berichten korrigierendes Fahrverhalten: Lenkrad fester gehalten ( $n = 1$ ), Gegengelenkt ( $n = 1$ ).

Die Erhebung der subjektiv empfundenen Kritikalität des Ereignisses erfolgte mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003). Auch hier erfolgt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilstudie mit dem Kompakt 3 mit denen der Teilstudie 6 mit dem SUV 2 (für Details siehe 3.6), da in beiden der gleiche Fehlertyp verwendet wurde. Potentielle Unterschiede in den Daten können jedoch aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug nicht erklärt werden. Für die Analyse wurden alle validen Datensätze berücksichtigt. Die mittlere subjektiv wahrgenommene Kritikalität bei Erleben der Fehleraufschaltung im Kompakt 3 wurde auf der 11-stufigen Skala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar) auf einem niedrigen Niveau der Kategorie Spürbarkeit eingeordnet ( $M = 1,05$ ,  $SD = 1,32$ ). Bei Erleben der Fehleraufschaltung im SUV 2 wurde die Kritikalität auf einem niedrigen bis mittleren Niveau der Kategorie Spürbarkeit berichtet ( $M = 1,69$ ,  $SD = 1,57$ ). Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 71.



Abbildung 71

Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlertypen Geblockter FBA in den beiden Teilstudien mit den Versuchsfahrzeugen Kompakt 3 und SUV 2 erhoben mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003).



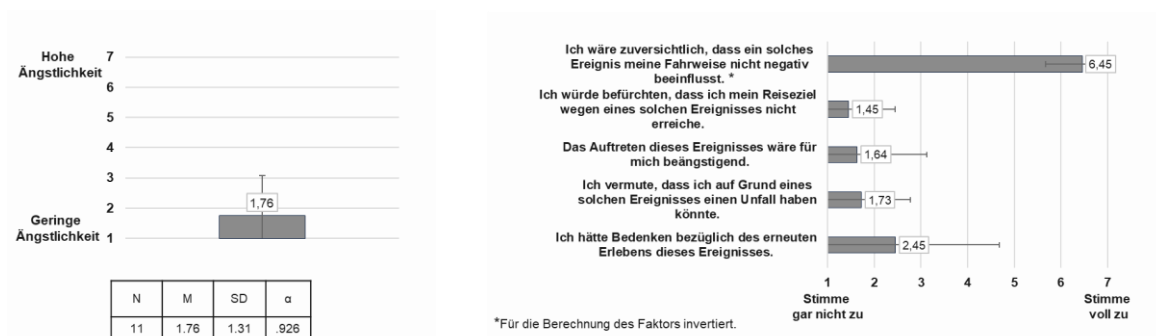
Anmerkung. Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Für die Erhebung des Situationserlebens der Versuchspersonen, die das Fehlerereignis wahrgenommen haben, wurden die zwei Ratingskalen der Faktoren *Anxiety* und *Perceived Safety* des *Car Technology Acceptance Models* (Osswald et al., 2012) ausgewählt und modifiziert. Erhoben wurden diese Daten von allen Versuchspersonen, die angegeben haben, den Fehler bemerkt zu haben.

Die Ängstlichkeit mit Auftreten des Fehlerereignisses wurde auf einem niedrigen Niveau der 7-stufigen Skala (1 = geringe Ängstlichkeit – 7 = hohe Ängstlichkeit) eingeschätzt ( $M = 1,76$ ,  $SD = 1,31$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors *Anxiety* und der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 72.

Abbildung 72

Ergebnisse des Faktors *Anxiety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses Geblockter FBA.

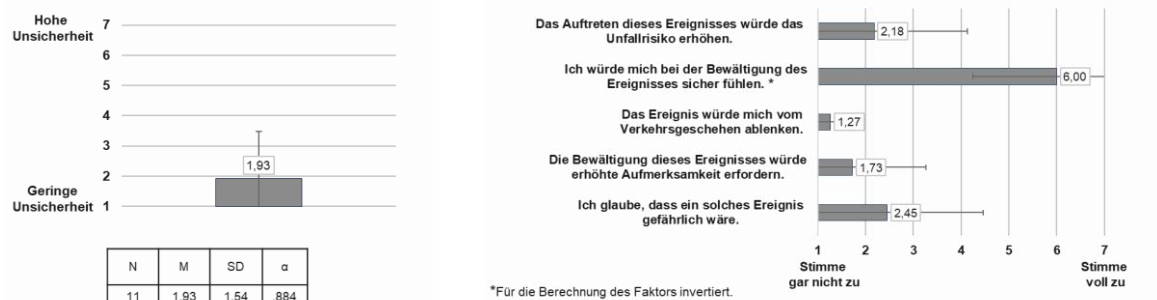


\*Für die Berechnung des Faktors invertiert.

Ebenso wurde die wahrgenommene Unsicherheit mit Auftreten des Ereignisses auf einem niedrigen Niveau der 7-stufigen Skala (1 = geringe Unsicherheit – 7 = hohe Unsicherheit) eingeschätzt ( $M = 1,93$ ,  $SD = 1,54$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* und der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 73.

Abbildung 73

Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses *Geblockter FBA*.



### 3.4.2.2.5 Fehlerbild: *RWA Rechteckschwingung*

Nachfolgend werden die objektiven Ergebnisse zur Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge der Aufschaltung des Fehlerbildes *RWA Rechteckschwingung* im Manöver Geradeausfahrt beschrieben, sowie die Ergebnisse hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung der Fehleraufschaltung.

### 3.4.2.2.6 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistischen Verteilungen der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das Fehlerbild *RWA Rechteckschwingung* im Fahrzeug Kompakt 3 sind in Abbildung 74 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierrate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug bei dem untersuchten Fehlerbild sind zusätzlich in Tabelle 23 zusammengefasst. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 74 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig.

Im vorliegenden Fall zeigt der Kompakt 3 im Vergleich zum SUV 2 bezüglich des Fehlerbildes *RWA Rechteckschwingung* größere Störeinflüsse hinsichtlich der Lenkreaktion des Fahrers. Sowohl der Störeinfluss auf den Lenkwinkel als auch die Störleakrate sind größer als die

Vergleichswerte im SUV 2. Auch hinsichtlich der Fahrzeugreaktion ergeben sich höhere Störeinflüsse bezüglich der Querbearschleunigung und der Gierrate.

Abbildung 74

Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störleakrate, Störquerbearschleunigung und Störgierrate für das Fehlerbild RWA Rechteckschwingung (grau: Kompakt 3; weiß: SUV 2)

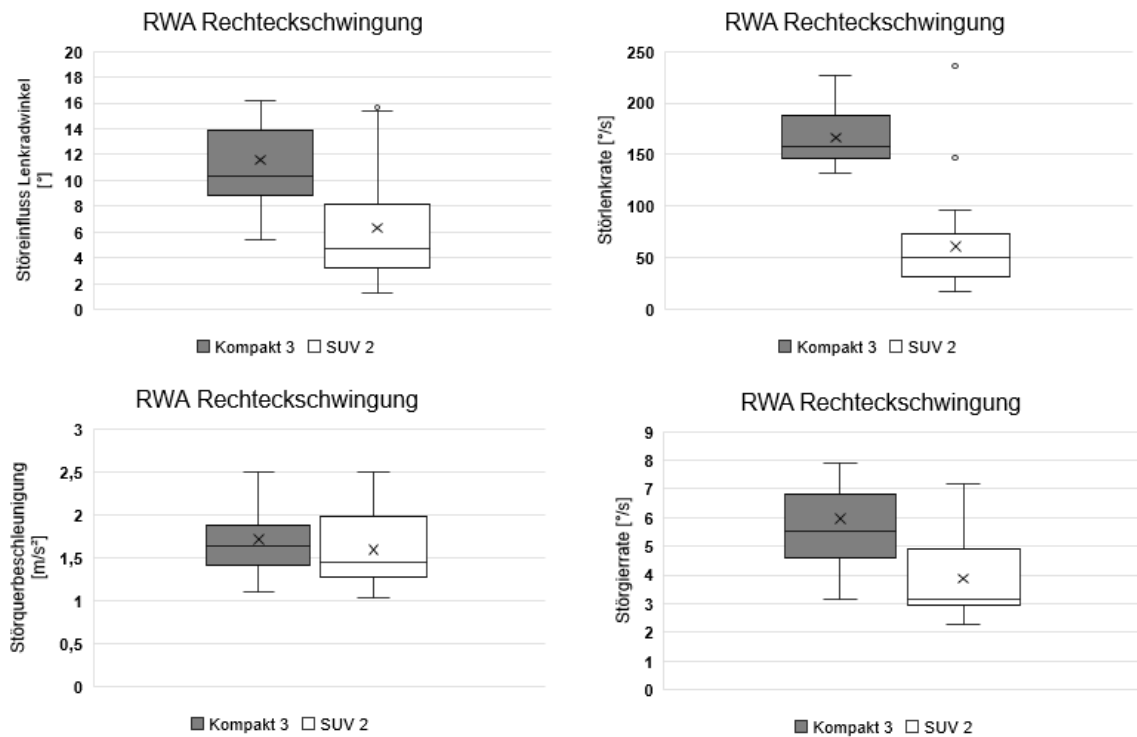


Tabelle 23

Deskriptive Statistikennwerte Fehlerbild RWA Rechteckschwingung (Kompakt 3)

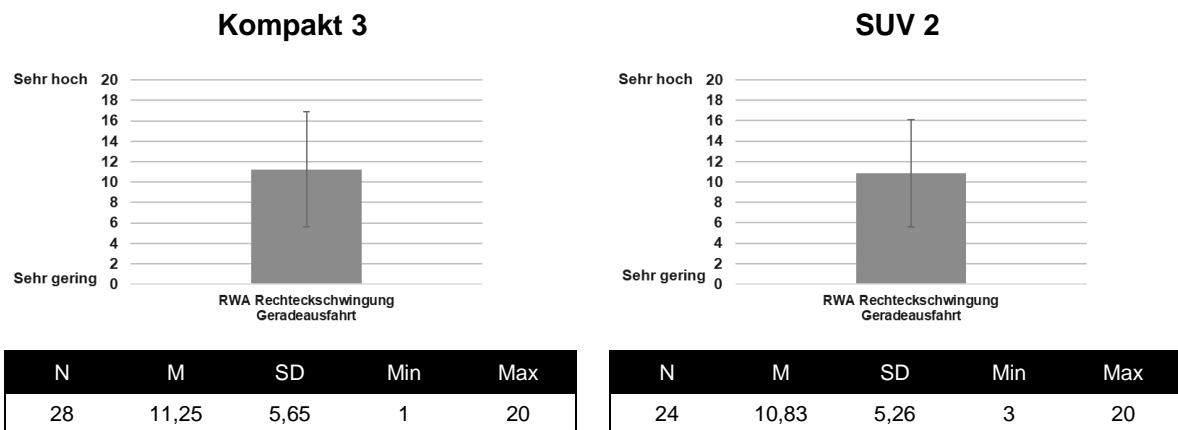
Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
Kompakt 3	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	28	11,40	4,38	10,30	5,41	23,75
	Störleakrate [°/s]	28	166,44	25,95	157,53	131,78	227,17
	Störquerbearschleunigung [m/s²]	28	1,72	0,50	1,63	1,10	3,73
	Störgierrate [°/s]	28	5,96	2,08	5,55	3,17	12,37

### 3.4.2.2.7 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

Im Folgenden wird zunächst auf wahrgenommene Schwierigkeit des Manövers Geradeausfahrt mit Aufschaltung des Fehlers eingegangen, welche über die drei an das Instrument NASA-TLX angelehnte Items hinsichtlich der mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Skala (1 = sehr gering – 20 = sehr hoch) erhoben wurde. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der Teilstudie 6 (für Details siehe 3.6) mit dem SUV 2, da in beiden Teilstudien der gleiche Fehlertyp betrachtet wurde. Eine Erklärung potentieller Unterschiede ist aufgrund der gleichzeitigen Manipulation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug jedoch nicht möglich. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze. In beiden Teilstudien werden die mentalen Anforderungen zur Absolvierung der Geradeausfahrt mit Aufschaltung des RWA-Fehlers im mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering – 20 = sehr hoch) eingeschätzt (Kompakt 3:  $M = 11,25$ ,  $SD = 5,65$ ; SUV 2:  $M = 10,83$ ,  $SD = 5,26$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 75.

Abbildung 75

*Mentale Anforderungen des Manövers Geradeausfahrt mit Aufschaltung des Fehlers RWA Rechteckschwingung erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*



*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Ebenfalls werden die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung der Geradeausfahrt mit Fehlerereignis in beiden Teilstudien in einem mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering – 20 = sehr hoch) eingeschätzt (Kompakt 3:  $M = 8,29$ ,  $SD = 5,52$ ; SUV 2:  $M = 9,42$ ,  $SD = 5,03$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 76.

Abbildung 76

*Körperliche Anforderungen des Manövers Geradeausfahrt mit Aufschaltung des Fehlers RWA Rechteckschwung erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

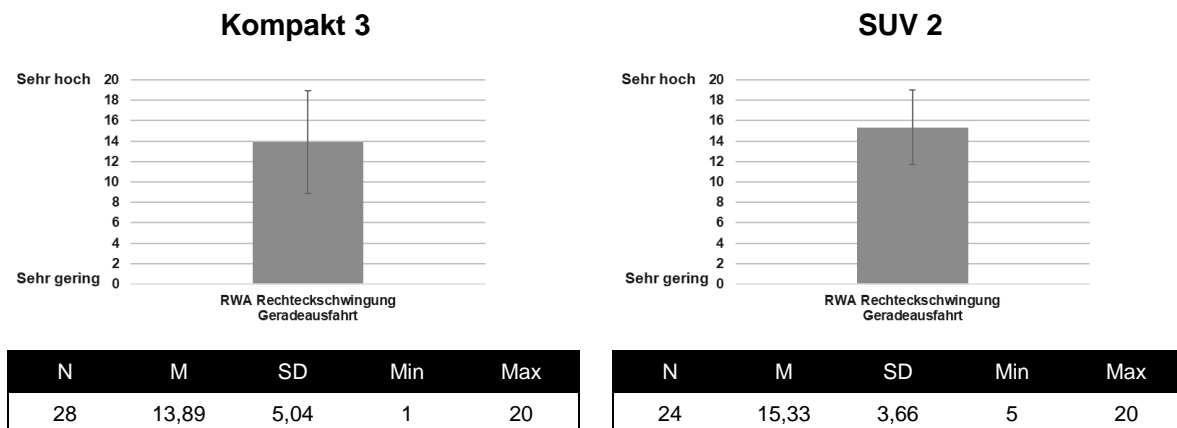


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die Einschätzung der subjektiven Leistung bei der Absolvierung des Manövers Geradeausfahrt mit Fehleraufschaltung liegt in beiden Teilstudien in einem mittleren bis hohen Niveau der 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering – 20 = sehr hoch) (Kompakt 3:  $M = 13,89$ ,  $SD = 5,04$ ; SUV 2:  $M = 15,33$ ,  $SD = 3,66$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 77.

Abbildung 77

*Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Geradeausfahrt mit Aufschaltung des Fehlers RWA Rechteckschwung erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*



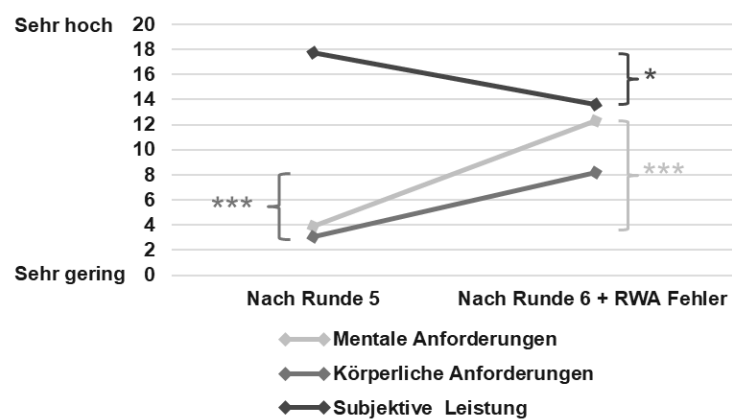
*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Abzielend auf die Identifikation des Einflusses der Fehleraufschaltung auf die wahrgenommene Schwierigkeit bei der Absolvierung des Manövers Geradeausfahrt, wurden die mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung nach Runde 5 ohne Fehleraufschaltung mit denen nach erfolgter Aufschaltung in

Runde 6 verglichen. Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs beider Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem  $t$ -Test. Sowohl die mentalen, als auch die körperlichen Anforderungen stiegen in Runde 6 mit Fehleraufschaltung im Vergleich zur vorherigen Runde ohne Fehleraufschaltung signifikant an (mentale Anforderungen:  $t(13) = -6,5$ ,  $p < ,001$ ,  $d = -1,74$ ; körperliche Anforderungen:  $t(13) = -4,18$ ,  $p < ,001$ ,  $d = -1,12$ ). Darüber hinaus sank die subjektiv empfundene Leistung bei der Absolvierung des Manövers signifikant ( $t(13) = 2,44$ ,  $p = ,02$ ,  $d = -0,65$ ). Für eine graphische Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 78.

Abbildung 78

Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Geradeausfahrt in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des Fehlers RWA Rechteckschwingung. (Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)



Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	14	3,93	2,43	1	8
	Nach Runde 6 + Fehler	14	12,29	5,25	2	20
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	14	3,07	1,73	1	6
	Nach Runde 6 + Fehler	14	8,21	5,31	1	20
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	14	17,71	1,82	15	20
	Nach Runde 6 + Fehler	14	13,57	6,44	1	20

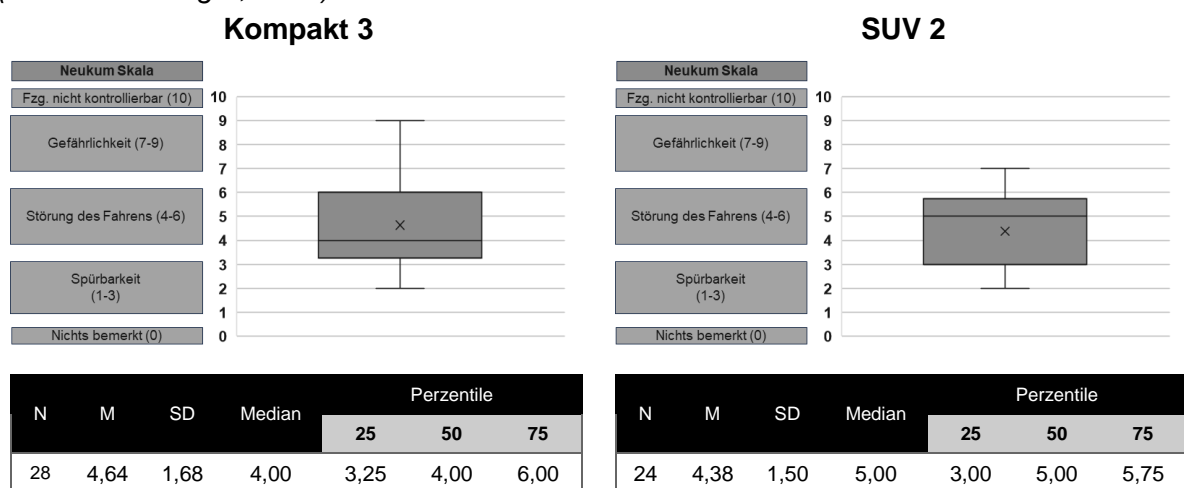
Die Beobachtung der Versuchspersonen durch die Versuchsleitung zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung ergab, dass 60,71% ( $n = 17$ ) der Teilnehmenden eine merkbare Reaktion zeigte, welche sich in den meisten Fällen ( $n = 13$ ) in Form einer verbalen Äußerung zeigte.

Auf Nachfrage gaben 100 % der Teilnehmenden ( $n = 28$ ) an das Ereignis bemerkt zu haben. Mehrheitlich wurde es mit einem Ausbrechen des Fahrzeuges nach rechts und links beschrieben ( $n = 21$ ), oder mit einem Eingriff in die Lenkung / Korrektur ( $n = 12$ ). Zur Beschreibung der Reaktion auf das Ereignis auf affektiver Ebene wurde am häufigsten Überraschung / Erschrecken erwähnt ( $n = 18$ ), gefolgt von Verunsicherung ( $n = 6$ ). Auf kognitiver Ebene berichteten die Versuchspersonen am häufigsten darüber nachgedacht zu haben über eine Pylone / etwas Anderes gefahren zu sein ( $n = 11$ ), oder sich gedanklich mit der Ursache des Ereignisses auseinander gesetzt zu haben ( $n = 9$ ). Hinsichtlich der behavioralen Reaktion wurde am häufigsten erwähnt Gegengelenkt / Korrigiert zu haben ( $n = 16$ ), gefolgt von der Aussage das Lenkrad fester gehalten zu haben ( $n = 7$ ). Sollte sich das Ereignis wiederholen, würden 17,86 % der Teilnehmenden ( $n = 5$ ) anders reagieren und die Geschwindigkeit reduzieren ( $n = 3$ ) oder das Fahrzeug anhalten ( $n = 2$ ).

Die Ergebnisse der Bewertung der subjektiv empfundenen Kritikalität mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003) erfolgt im Folgenden wiederum gegenübergestellt für die Teilstudien mit den Versuchsfahrzeugen Kompakt 3 und SUV 2 (für Details siehe 3.6), da in beiden der Fehlertyp *RWA Rechteckschwingung* Berücksichtigung fand. Für die Analyse wurden alle validen Datensätze berücksichtigt. In beiden Teilstudien wurde die Kritikalität auf der 11-stufigen Skala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar) auf einem unteren bis mittleren Niveau der Kategorie Störung des Fahrens eingeteilt (Kompakt 3:  $M = 4,64$ ,  $SD = 1,68$ ; SUV 2:  $M = 4,38$ ,  $SD = 1,50$ ). Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 79.

Abbildung 79

*Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlertypen RWA Rechteckschwingung in den beiden Teilstudien mit den Versuchsfahrzeugen Kompakt 3 und SUV 2 erhoben mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003).*



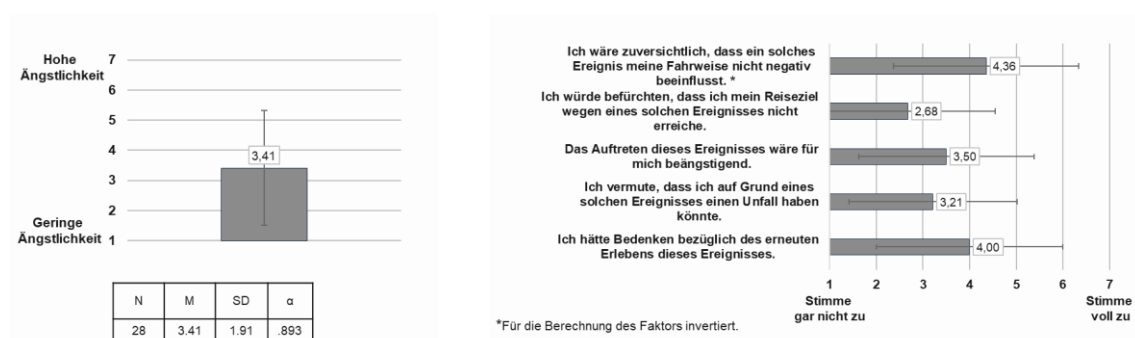
*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die Ängstlichkeit bei Bemerkten des Fehlerereignisses wurde auf einem mittleren Bereich der 7-stufigen Skala (1 = geringe Ängstlichkeit – 7 = hohe Ängstlichkeit) eingeordnet ( $M = 3,41$ ,

$SD = 1,91$ ). Für eine Darstellung des Faktors und der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 80.

Abbildung 80

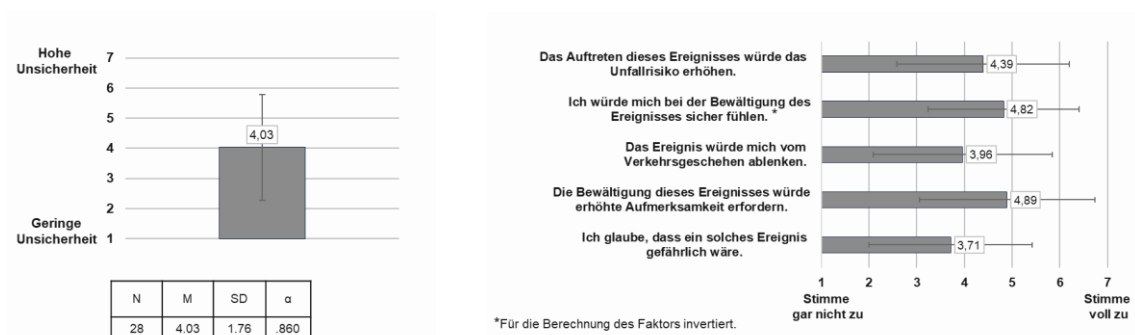
Ergebnisse des Faktors Anxiety (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses RWA Rechteckschwingung.



Die wahrgenommene Unsicherheit mit Bemerken des Fehlerereignisses wurde auf einem mittleren Niveau der 7-stufigen Skala (1 = geringe Unsicherheit – 7 = hohe Unsicherheit) berichtet ( $M = 4,03$ ,  $SD = 1,76$ ). Für eine Darstellung des Faktors sowie die der Berechnung zugrundeliegenden Einzelitems siehe Abbildung 81.

Abbildung 81

Ergebnisse des Faktors Perceived Safety (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses RWA Rechteckschwingung.



### 3.4.2.3 Nachbefragung

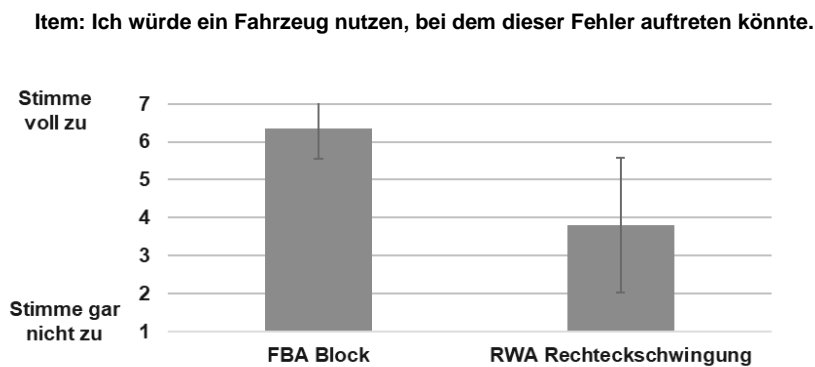
Im Anschluss an die Studiendurchführung wurden die Teilnehmenden hinsichtlich des Studiengegenstands aufgeklärt. Darauf aufbauend erfolgte eine Nachbefragung, wobei die Teilnehmenden die Fragen nur beantworteten, sofern sie den jeweiligen Fehler im Rahmen der Versuchsdurchführung bemerkt hatten. Zunächst wurden die Versuchspersonen gebeten auf einer 7-stufigen Antwortskala (1 = stimme gar nicht zu – 7 = stimme voll zu) anzugeben, wie sehr sie zustimmen würden ein Fahrzeug zu nutzen, welches den erlebten Fehler



aufweisen könnte. Hinsichtlich des Fehlers *Geblockter FBA* lag die Nutzungsintention von den Personen, die den Fehler während des Versuchs bemerkt hatten ( $n = 11$ ) in einem hohen Bereich ( $M = 6,36$ ,  $SD = 0,81$ ). Der Fehler *RWA Rechteckschwingung* wurde von allen Versuchspersonen bemerkt ( $N = 20$ ). Die Bereitschaft ein Fahrzeug zu nutzen, welches diesen Fehler aufweisen könnte, wurde etwas geringer im mittleren Bereich der Skala eingeordnet ( $M = 3,80$ ,  $SD = 1,77$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 82.

Abbildung 82

*Nutzungsintention hinsichtlich eines Fahrzeuges, welches den erlebten Fehler Geblockter FBA oder RWA Rechteckschwingung aufweisen könnte, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.*



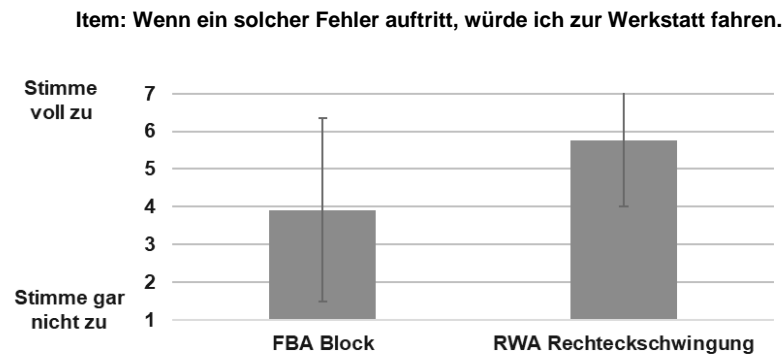
Fehler	N	M	SD	Min	Max
FBA Block	11	6,36	0,81	5	7
RWA Rechteckschwingung	20	3,80	1,77	1	6

*Anmerkung.* Die Beantwortung des Items erfolgte lediglich durch Versuchspersonen, die den jeweiligen Fehler im Versuchsdurchlauf bemerkt haben.

Weiterhin wurden die Versuchspersonen gebeten anzugeben wie sehr sie der Aussage auf einer 7-stufigen Antwortskala zustimmen (1 = stimme gar nicht zu – 7 = stimme voll zu) bei Auftreten des jeweiligen Fehlers die Werkstatt aufzusuchen. Die Personen, die den FBA-Fehler bemerkt haben ( $n = 11$ ) stimmen dieser Aussage weder zu, noch lehnen sie diese ab ( $M = 3,91$ ,  $SD = 2,43$ ). Hinsichtlich des Auftretens des RWA-Fehlers stimmen die Versuchspersonen der Aussage eher zu ( $M = 5,75$ ,  $SD = 1,74$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 83.

Abbildung 83

*Absicht eine Werkstatt aufzusuchen bei Auftreten der erlebten Fehler Geblockter FBA oder RWA Rechteckschwingung im eigenen Fahrzeug, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.*



Fehler	N	M	SD	Min	Max
FBA Block	11	3,91	2,43	1	7
RWA Rechteckschwingung	20	5,75	1,74	2	7

*Anmerkung.* Die Beantwortung des Items erfolgte lediglich durch Versuchspersonen, die den jeweiligen Fehler im Versuchsdurchlauf bemerkt haben.

### 3.4.3 Zusammenfassung Studie 4

Im Folgenden wird eine Übersicht hinsichtlich der Hauptergebnisse der durchgeführten Teilstudie 4 (Fahrzeug: Kompakt 3; Fehler: *Geblockter FBA / RWA Rechteckschwingung*) gegeben.

- Die Gestaltung des Parcours erscheint angemessen, die Versuchspersonen werden weder unter- noch überfordert.
- Es wird eine Lernkurve der Versuchspersonen über den Verlauf der Testung deutlich.
- Für beide Fehlerbilder konnte die aufgestellte Forschungshypothese beibehalten werden.
- Der Fehler *Geblockter FBA*
  - wurde von 55 % der Versuchspersonen bemerkt;
  - bewirkt keinen signifikanten Anstieg der empfunden mentalen und körperlichen Anforderungen sowie keine signifikante Verschlechterung der subjektiv empfundenen Leistung im betreffenden Fahrmanöver;
  - provoziert keine spezifische affektive oder behaviorale Reaktion bei den Versuchspersonen;
  - wird bezüglich der Kritikalität auf einem niedrigen Niveau der „Spürbarkeit“ eingeordnet.

- Der Fehler *RWA Rechteckschwingung*
  - wurde von allen Versuchspersonen bemerkt, 60% der Versuchspersonen zeigen eine direkt beobachtbare Reaktion auf die Fehleraufschaltung;
  - steht in Verbindung mit einem signifikanten Anstieg der empfunden mentalen und körperlichen Anforderungen, die empfundene eigene Leistung fällt darüber hinaus mit Fehleraufschaltung signifikant ab;
  - wird auf affektiver Ebene mehrheitlich mit Erschrecken und Überraschung assoziiert;
  - provoziert bei einem Großteil der Versuchspersonen eine behaviorale Reaktion (Gegenlenken/ Korrektur), einzelne Versuchspersonen berichten, dass sie bei erneutem Erleben des Fehlers mit einer Geschwindigkeitsreduktion reagieren würden;
  - wird bezüglich der Kritikalität auf einem mittleren Niveau der Kategorie „Störung des Fahrens“ eingeordnet, dabei reicht die Spannweite von einer mittleren Ausprägung der „Spürbarkeit“ bis zu einer hohen Ausprägung der Kategorie „Gefährlichkeit“.

Die inhaltliche Diskussion der Ergebnisse der Teilstudien erfolgt übergeordnet für die gesamte Versuchsreihe in Abschnitt 4.

### 3.5 Studie 5

Die Durchführung des fünften Studienteils erfolgte unter Verwendung des Versuchsfahrzeugs Limousine im Zeitraum vom 26. bis 29. April 2022. Bei den ausgewählten Fehlerbildern handelte es sich um den Fehler *FBA Sprung*, welcher im Manöver Slalom aufgeschaltet wurde, sowie um den Fehler *Ungeregelter RWA* im Manöver Kreisfahrt. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Teilstudie detailliert beschrieben.

#### 3.5.1 Stichprobe

Die Stichprobengröße beträgt  $N = 27$ , davon sind 13 Personen weiblich. Das mittlere Alter beträgt  $M = 39,70$  ( $SD = 13,82$  Jahre), wobei die jüngste Versuchsperson 20 und die älteste 62 Jahre alt ist. Die durchschnittliche Fahrleistung beträgt  $M = 17.253,85$  km ( $SD = 13810,55$  km) mit einer Spannbreite von 2.500 km bis 55.000 km. Keine der Versuchspersonen gibt an, eine nicht korrigierte Seh- oder Hörbeeinträchtigung zu haben.

#### 3.5.2 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt aufgeteilt in die beiden Abschnitte fehlerunabhängige und fehlerspezifische Ergebnisse. Zunächst erfolgt der Bericht von Ergebnissen, welche sich von den Fehleraufschaltungen unabhängig, auf die allgemeine Schwierigkeit der gewählten Manöver im Sinne der Prüfung des gewählten Versuchsdesigns beziehen. Anschließend erfolgt die Darstellung der fehlerspezifischen Ergebnisse. In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Ergebnisse zur Prüfung der Kontrollierbarkeit beider Fehler (FBA und RWA) eingegangen. Darauf folgend werden die subjektiven Versuchsdaten hinsichtlich des Erlebens

der Fehleraufschaltung, sowie die objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehleraufschaltung zunächst für den FBA- und darauf folgend für den RWA-Fehler berichtet.

### 3.5.2.1 Fehlerunabhängige Ergebnisse

Die empfundene Schwierigkeit der Manöver wurde erhoben mittels drei angepasster Fragen des Instruments NASA-TLX (Hart, 2006) bzgl. der mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch) zu Beginn der Testung nach der Eingewöhnungsfahrt und vor der letzten Runde im Anschluss an Fahrt 5. Zur inferenzstatistischen Analyse der Lernkurve erfolgte ein Vergleich der Anforderungen von Beginn und Ende der Fahrt mittels gepaartem *t*-Test. In die Analyse einbezogen wurden alle Versuchspersonen, welche für beide Fehlerfälle valide Datensätze aufwiesen.

In Bezug auf die mentalen Anforderungen werden alle drei Manöver über den Verlauf der Testung in einem niedrigen bis mittleren Bereich der 20-stufigen Skala eingeordnet, wobei die Geradeausfahrt als am wenigsten und der Slalom als am meisten mental anspruchsvoll erscheint. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 24. Vor der letzten Fahrt werden alle Manöver mental als signifikant weniger anspruchsvoll empfunden, als zu Beginn der Testung (Geradeausfahrt:  $t(20) = 2,60$ ,  $p < ,01$ ,  $d = 0,57$ ; Kreisfahrt:  $t(20) = 3,27$ ,  $p = ,002$ ,  $d = 0,71$ ; Slalom:  $t(20) = 2,70$ ,  $p = ,007$ ,  $d = 0,59$ ).

Tabelle 24

*Mentale Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Mentale Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	21	6,71	4,52	1	17
	Vor der letzten Runde	21	4,57	2,62	1	10
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	21	9,81	3,76	1	17
	Vor der letzten Runde	21	7,14	3,58	1	16
Slalom	Nach Eingewöhnung	21	12,29	2,83	5	17
	Vor der letzten Runde	21	9,62	3,88	3	17

Auch in Bezug auf die körperlichen Anforderungen werden die drei Manöver zu beiden Befragungszeitpunkten in einem niedrigen bis mit mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala eingeordnet. Die Geradeausfahrt erscheint mit dem geringsten körperlichen Anspruch und der Slalom mit dem höchsten verbunden zu sein. Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Tabelle 25. Die körperlichen Anforderungen in der Geradeausfahrt und der Kreisfahrt bleiben im Vergleich beider Befragungszeitpunkte konstant (Geradeausfahrt:  $t(20) = 0,42$ ,  $p = ,34$ ; Kreisfahrt:  $t(20) = 1,38$ ,  $p = ,09$ ), wohingegen sie für die Absolvierung des Slaloms im Verlauf der Testung signifikant sinken ( $t(20) = 1,76$ ,  $p = ,047$ ,  $d = 0,38$ ).

Tabelle 25

*Körperliche Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Körperliche Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	21	3,19	2,71	1	11
	Vor der letzten Runde	21	3,00	1,70	1	7
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	21	7,24	3,40	1	13
	Vor der letzten Runde	21	6,33	3,50	1	13
Slalom	Nach Eingewöhnung	21	10,10	4,22	1	16
	Vor der letzten Runde	21	8,67	4,56	1	15

Die eigene Leistung bei der Absolvierung der Manöver schätzen die Versuchspersonen insgesamt zu beiden Befragungszeitpunkten in einem hohen Bereich der 20-stufigen Antwortskala ein. Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Tabelle 26. Zum Ende der Testung wird die eigene Leistung in allen drei Manövern signifikant besser eingeschätzt, als zu Beginn der Testung (Geradeausfahrt:  $t(20) = -2,79$ ,  $p < ,01$ ,  $d = -0,61$ ; Kreisfahrt:  $t(20) = -2,84$ ,  $p < ,01$ ,  $d = -0,62$ ; Slalom:  $t(20) = -3,57$ ,  $p = ,001$ ,  $d = -0,78$ ).

Tabelle 26

*Einschätzung der eigenen Leistung in den Manövern Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Einschätzung der eigenen Leistung						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	21	16,62	3,28	10	20
	Vor der letzten Runde	21	18,00	1,92	13	20
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	21	15,14	3,21	9	20
	Vor der letzten Runde	21	16,90	2,47	11	20
Slalom	Nach Eingewöhnung	21	13,81	4,20	6	20
	Vor der letzten Runde	21	16,19	3,01	9	20

### 3.5.2.2 Fehlerspezifische Ergebnisse

In der folgenden Passage wird zunächst auf die Ergebnisse der Prüfung der Kontrollierbarkeit der beiden Fehler *FBA Sprung* und *Ungeregelter RWA* eingegangen. Im Anschluss erfolgt separat für beide Fehler zunächst die Darstellung der subjektiven Ergebnisse hinsichtlich des Erlebens der Fehleraufschaltung und daran anschließend der objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehlerereignisse.

#### 3.5.2.2.1 Kontrollierbarkeit - Hypothesenprüfung

Für die fünfte Teilstudie gilt für den im Manöver Kreisfahrt aufgeschalteten Fehler *Ungeregelter RWA*, dass 100 % der Versuchspersonen, welche valide Datensätze aufwiesen, die Fahrspur mit Fehleraufschaltung nicht verlassen haben. 100 % der Datensätze umfassen dabei mindestens  $N = 20$  Datensätze. Die Hypothese kann somit für die ausgewählte Kombination aus Fahrzeug und RWA-Fehler beibehalten werden. Im Rahmen der durchgeführten Studie war dieser Fehler auf dem von Experten festgelegten C0-Level für alle Versuchspersonen kontrollierbar. Für den im Manöver Slalom aufgeschalteten Fehler *FBA Sprung* gilt, dass eine Versuchsperson die Fahrspur mit Fehleraufschaltung verlassen hat. Für die Kombination aus Fahrzeug und FBA-Fehler muss die Hypothese somit abgelehnt werden. Das von Experten für diesen Fehler definierte C0-Level wurde nicht von allen Versuchspersonen kontrolliert.

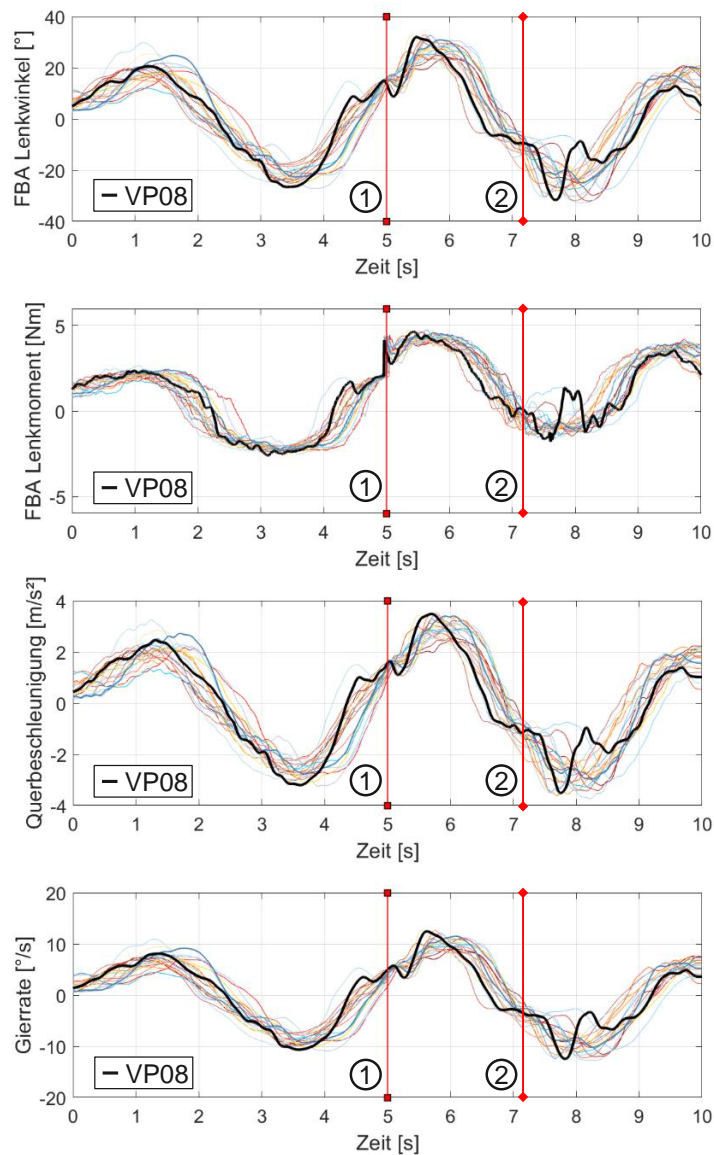
##### 3.5.2.2.1.1 Analyse Spurverlassen

Anhand der zur Verfügung stehenden objektiven Fahrzeugmessgrößen kann die beschriebene Fahrsituation genauer analysiert werden. Hierzu sind ausgewählte Fahrzeugmessgrößen von Versuchsperson 8 im Vergleich zu den übrigen validen Messdatensätzen der *FBA Sprung-*

Fehleraufschaltung in Abbildung 84 dargestellt. Der Zeitpunkt der Fehleraufschaltung (1) sowie der des Pylonenkontakts (2) sind auf der Zeitachse markiert. Hinsichtlich der Fahrereingaben (Lenkwinkel, Lenkmoment) zeigt Versuchsperson 8 im Vergleich zu den anderen Versuchspersonen sowohl vor der Fehleraufschaltung (1) und dem Kontakt mit der Pylone (2) keine auffällige Fahrweise. Dies spiegelt sich auch in der resultierenden Fahrzeugdynamik (Querschleunigung, Gierrate) wider, die vor dem Pylonenkontakt ebenfalls keine Auffälligkeiten zeigt. Infolge des Pylonenkontakts (2) ist eine Lenkreaktion der Versuchsperson erkennbar. Diese Lenkreaktion wirkt ebenfalls auf die Fahrzeugdynamik, die infolge des Pylonenkontakts bezüglich der Gierrate und der Querschleunigung von den anderen Messdatensätzen abweicht. Für eine graphische Darstellung der Situation siehe Anhang 6.5.

Abbildung 84

Fahrzeugmessdaten FBA Sprung-Fehleraufschaltung (Limousine) – VP08 vs. valide FBA Sprung-Messdaten; (1) Zeitpunkt der Fehleraufschaltung, (2) Zeitpunkt des Pylonenkontakts



### 3.5.2.2.2 Fehlerbild: *FBA Sprung*

Bezogen auf das Fehlerbild *FBA Sprung* werden nachfolgend die objektiven Ergebnisse zur Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge des Fehlers, sowie die subjektiven Ergebnisse hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung der Aufschaltung berichtet.

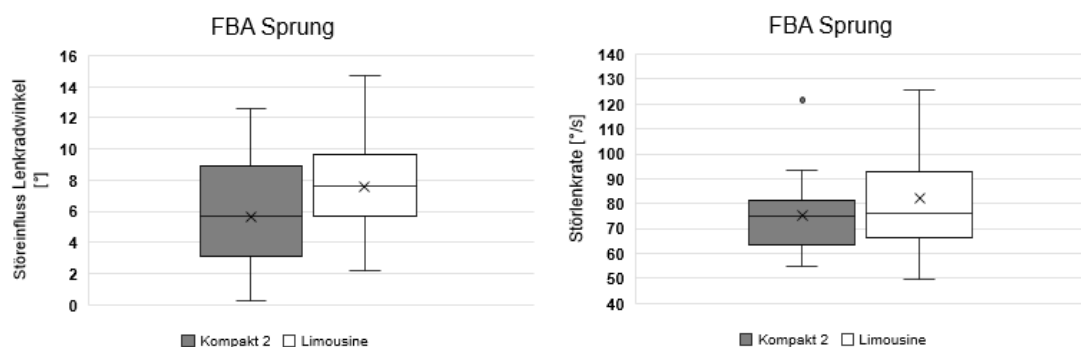
### 3.5.2.2.3 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistische Verteilung der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das Fehlerbild *FBA Sprung* sind in Abbildung 85 für die Limousine dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug bei dem untersuchten Fehlerbild sind zusätzlich in Tabelle 27 zusammengefasst. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 85 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig.

Im vorliegenden Fall zeigt die Limousine im Vergleich zum Kompakt 2 bezüglich des Fehlerbildes *FBA Sprung* tendenziell etwas höhere Störeinflüsse in Bezug auf die Lenkreaktion der Fahrer und die resultierende Fahrzeugdynamik. Allerdings ist der aufgeschaltete Momentensprung in der Limousine mit 2,2 Nm auch größer als im Kompakt 2 (1,5 Nm).

Abbildung 85

Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störleakrate, Störquerbeschleunigung und Störgierate für das Fehlerbild *FBA Sprung* (weiß: Limousine; grau: Kompakt 2)





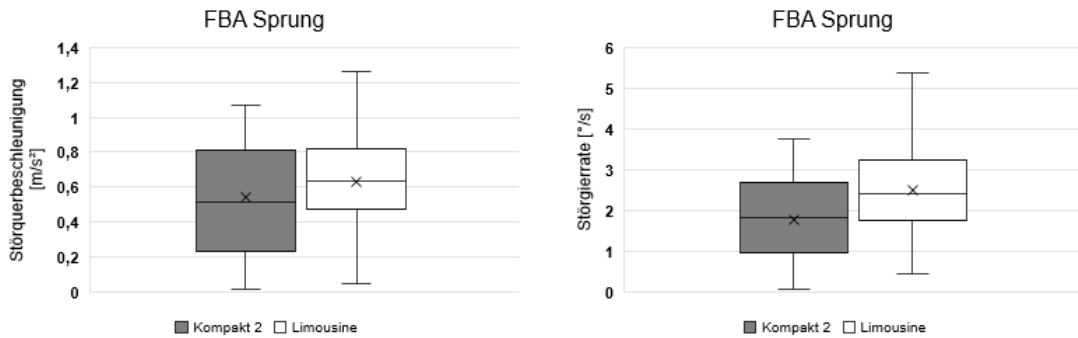


Tabelle 27

Deskriptive Statistikkenwerte Fehlerbild FBA Sprung (Limousine)

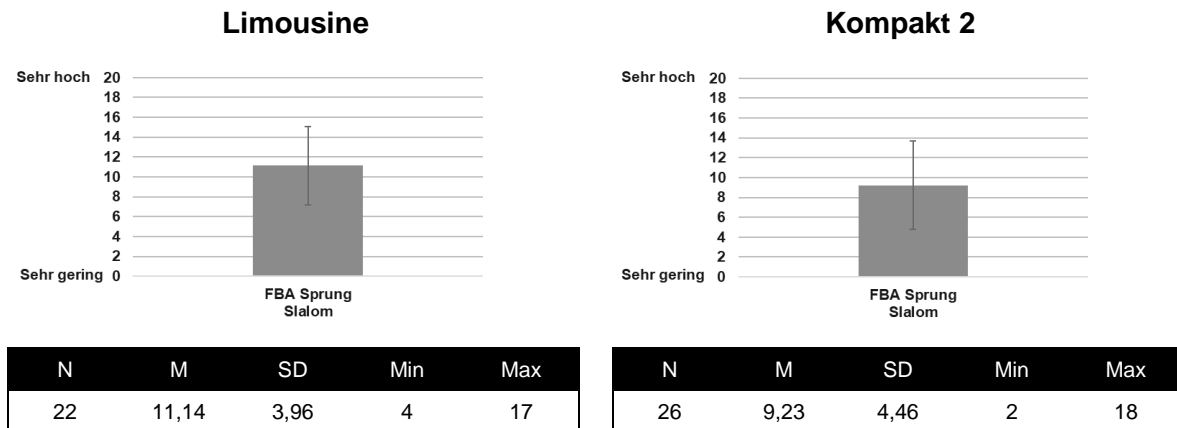
Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
Limousine	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	22	7,58	3,20	7,57	2,16	14,72
	StörLenkrate [°/s]	22	82,11	22,48	75,88	49,68	146,50
	Störquerbeschleunigung [m/s²]	22	0,63	0,30	0,63	0,05	1,27
	Störgierrate [°/s]	22	2,51	1,21	2,39	0,45	5,39

### 3.5.2.2.4 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

In diesem Abschnitt wird zunächst die wahrgenommene Schwierigkeit der Manöver mit Fehleraufschaltung berichtet. Die Erhebung erfolgte ebenfalls über die drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Fragen bezüglich der mentalen und körperlichen Anforderungen sowie der Einschätzung der eigenen Leistung bei der Absolvierung der Manöver mittels einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch). Da der Fehlertyp *FBA Sprung* ebenfalls Gegenstand der Teilstudie 2 (für Details siehe 3.2) mit dem Kompakt 2 war, werden die Ergebnisse beider Teilstudien gegenübergestellt dargestellt. Potentielle Unterschiede zwischen beiden Teilstudien können aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug jedoch lediglich dargestellt und nicht erklärt werden. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze. In der Teilstudie mit der Limousine wurden die mentalen Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des FBA-Fehlers im mittleren Bereich der 20-stufigen Skala eingeordnet. ( $M = 11,14$ ,  $SD = 3,96$ ). Auch in der Teilstudie mit dem Kompakt 2 werden die mentalen Anforderungen in dieser Situation im mittleren Bereich geschätzt ( $M = 9,23$ ,  $SD = 4,46$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 86.

Abbildung 86

Mentale Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers FBA Sprung erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).

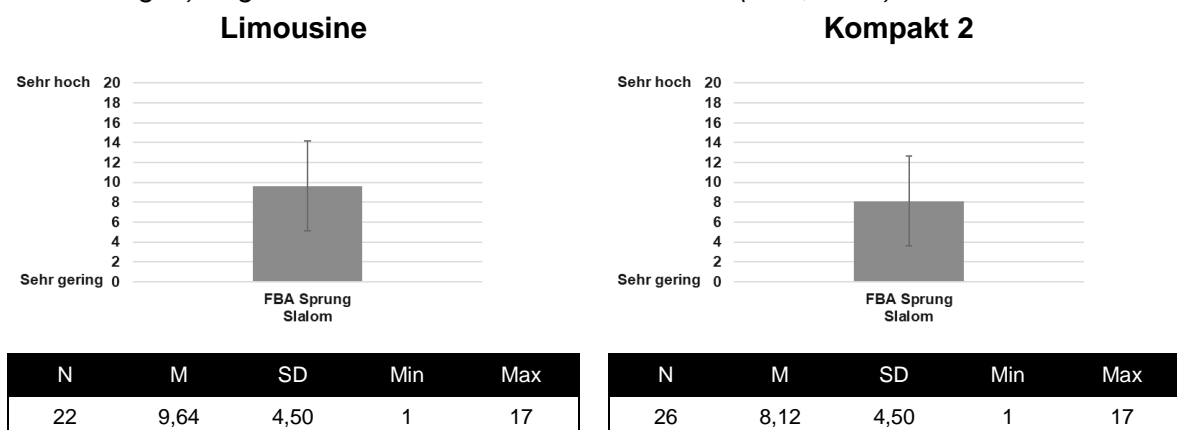


Anmerkung. Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung werden in beiden Teilstudien auf ein mittleres Niveau der 20-stufigen Skala eingeordnet (Limousine:  $M = 9,64$ ,  $SD = 4,50$ ; Kompakt 2:  $M = 8,12$ ,  $SD = 4,50$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 87.

Abbildung 87

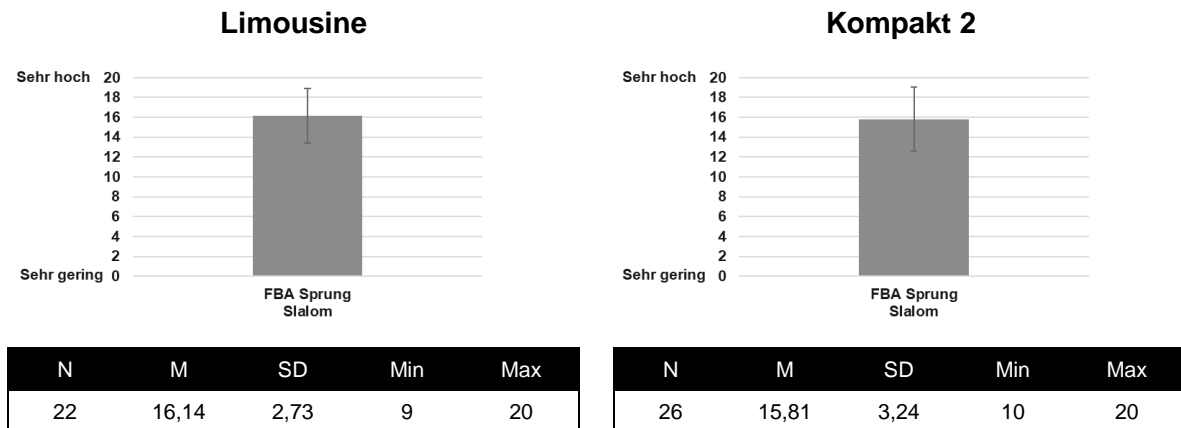
Körperliche Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers FBA Sprung erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).



Die eigene Leistung bei der Absolvierung des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung wird in beiden Teilstudien in einem mittleren bis hohen Bereich der 20-stufigen Skala eingeschätzt (Limousine:  $M = 16,14$ ,  $SD = 2,73$ ; Kompakt 2:  $M = 15,81$ ,  $SD = 3,24$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 88.

Abbildung 88

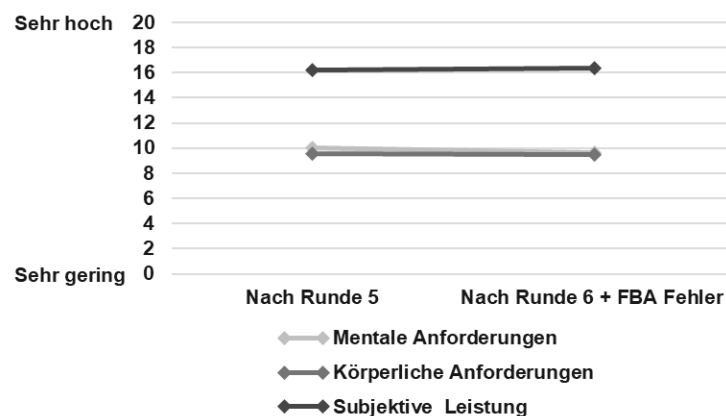
Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers *FBA Sprung* erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).



Zur Identifikation des auf die Fehleraufschaltung zurückgehenden Anteils der Schwierigkeit des Manövers Slalom erfolgte ein Vergleich der wahrgenommenen mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie der subjektiven Leistungseinschätzung nach Runde 5 ohne Fehleraufschaltung mit denen nach erfolgter Fehleraufschaltung in Runde 6. Basis dieser Herangehensweise war die Annahme, dass die Lernkurve der Versuchspersonen hinsichtlich der Absolvierung des Manövers zu diesem Zeitpunkt der Versuchsdurchführung bereits abgeflacht ist und Unterschiede zwischen den Zeitpunkten auf das Erleben des Fehlers zurück zu führen sind. Aufgrund der randomisierten Aufschaltung von FBA- und RWA-Fehler in den Runden 3 und 6, kann lediglich etwa die Hälfte der validen Datensätze (in denen die Aufschaltung in Runde 6 erfolgte) in dieser Analyse berücksichtigt werden. Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs der beiden Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem  $t$ -Test. Es wurde deutlich, dass sowohl die mentalen, als auch die körperlichen Anforderungen mit Fehleraufschaltung des Fehlers *FBA Sprung* im Vergleich zur vorherigen Runde konstant blieben (mentale Anforderungen:  $t(12) = 0,67$ ,  $p = ,26$ ; körperliche Anforderungen:  $t(12) = 0,11$ ,  $p = ,46$ ). Ebenso zeigte sich im Vergleich der subjektiven Leistungseinschätzung bei der Absolvierung des Manövers kein signifikanter Unterschied ( $t(12) = -0,34$ ,  $p = ,37$ ). Für eine graphische Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 89.

Abbildung 89

Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2016) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Slalom in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des Fehlers FBA Sprung. (Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)



Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	13	10,00	3,16	5	15
	Nach Runde 6 + Fehler	13	9,62	4,07	4	16
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	13	9,54	4,35	1	15
	Nach Runde 6 + Fehler	13	9,46	3,99	1	14
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	13	16,23	3,03	11	20
	Nach Runde 6 + Fehler	13	16,38	2,60	12	20

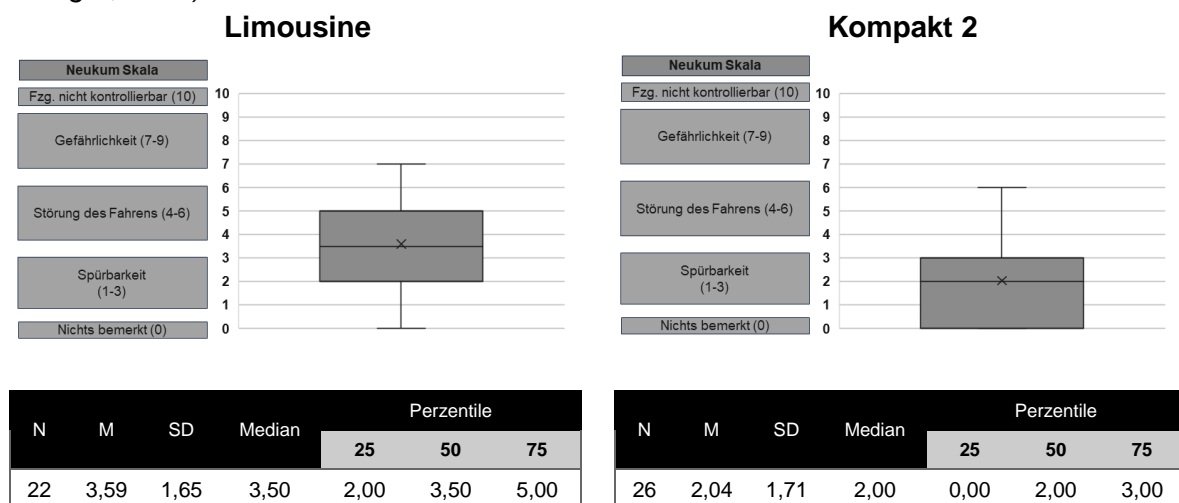
Zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung erfolgte eine Beobachtung des Verhaltens der Versuchspersonen durch die Versuchsleitung mit dem Ziel der Erfassung der initialen Reaktion. 18,18 % der Teilnehmenden ( $n = 4$ ) zeigten eine für die Versuchsleitung merkliche Reaktion, welche sich in  $n = 3$  Fällen in Form einer verbalen Äußerung zeigte. Auf Nachfrage gaben 95 % der Teilnehmenden ( $n = 21$ ) an, etwas Besonderes bemerkt zu haben. Am häufigsten wurde dies beschrieben als Blockade am Lenkrad ( $n = 17$ ), gefolgt von der Beobachtung eines Gegenlenkens des Fahrzeugs ( $n = 8$ ). Zur Erfassung der Reaktion der Teilnehmenden auf das Erleben des Fehlers wurden die Personen, die den Fehler bemerkt haben ( $n = 21$ ), hinsichtlich ihrer affektiven, kognitiven und behavioralen Reaktion befragt. Bezogen auf die affektive Reaktion wurden sie gebeten, ihre Gefühle mit Bemerkten des Fehlers zu beschreiben. Die meisten Versuchspersonen berichten keine spezifische Reaktion, seltener wird Überraschung / Erschrecken erwähnt ( $n = 8$ ). Hinsichtlich der kognitiven Reaktion

wurden die Teilnehmenden gefragt, was sie zum Zeitpunkt des Ereignisses gedacht haben. Die häufigste Antwort ( $n = 5$ ) war, dass etwas anders / nicht in Ordnung sei. Bezüglich der behavioralen Reaktion gab die Mehrheit der Versuchspersonen an ( $n = 19$ ), dass sie gegengelenkt / korrigiert haben.

Die subjektiv empfundene Kritikalität der Fehleraufschaltung wurde mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003) erhoben. Auch diesbezüglich erfolgt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit denen, welche in der Teilstudie 2 mit dem Kompakt 2 (für Details siehe 3.2) und unter Berücksichtigung des gleichen Fehlertyps, erhoben wurden. Wiederum gilt, dass potentielle Unterschiede in den Ergebnissen beider Teilstudien aufgrund der parallelen Manipulation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug lediglich dargestellt und nicht erklärt werden können. Für die Analyse wurden alle validen Datensätze berücksichtigt. Die subjektiv wahrgenommene Kritikalität des Fehlers *FBA Sprung* wurde in der Teilstudie mit der Limousine auf der 11-stufigen Antwortskala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar) durchschnittlich zwischen einem hohen Niveau in der Kategorie Spürbarkeit und einem niedrigen Niveau der Kategorie Störung des Fahrens eingeordnet ( $M = 3,59$ ,  $SD = 1,65$ ). In der Teilstudie mit dem Kompakt 2 wurde die Kritikalität durchschnittlich in einem mittleren Bereich der Kategorie Spürbarkeit berichtet ( $M = 2,04$ ,  $SD = 1,71$ ). Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 90.

Abbildung 90

*Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlertypen FBA Sprung in den beiden Teilstudien mit den Versuchsfahrzeugen Limousine und Kompakt 2 erhoben mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003).*



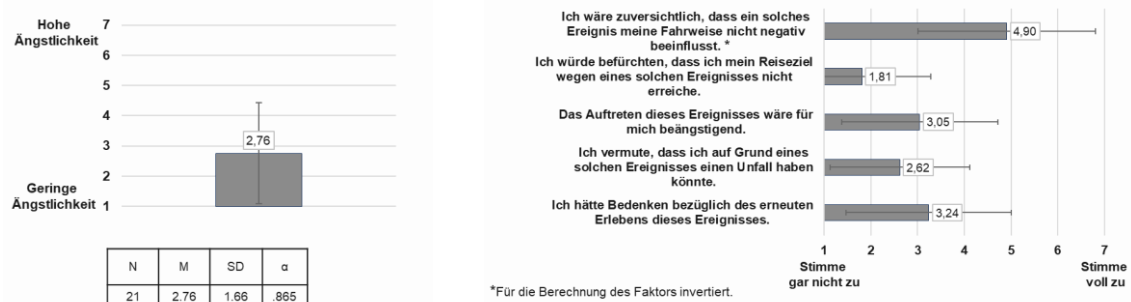
*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Zur Erhebung des Situationserlebens wurden die zwei Faktoren *Anxiety* und *Perceived Safety* des *Car Technology Acceptance Models* (Osswald et al., 2012) gewählt. Erhoben wurden diese Daten von allen Versuchspersonen, die angegeben haben, den Fehler bemerkt zu haben.

Die Ängstlichkeit bei Auftreten des Fehlerereignisses wird auf einem unteren Bereich der 7-stufigen Skala (1 = geringe Ängstlichkeit bis 7 = hohe Ängstlichkeit) eingeordnet ( $M = 2,76$ ,  $SD = 1,66$ ). Für eine Darstellung des Faktors *Anxiety* sowie der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 91.

Abbildung 91

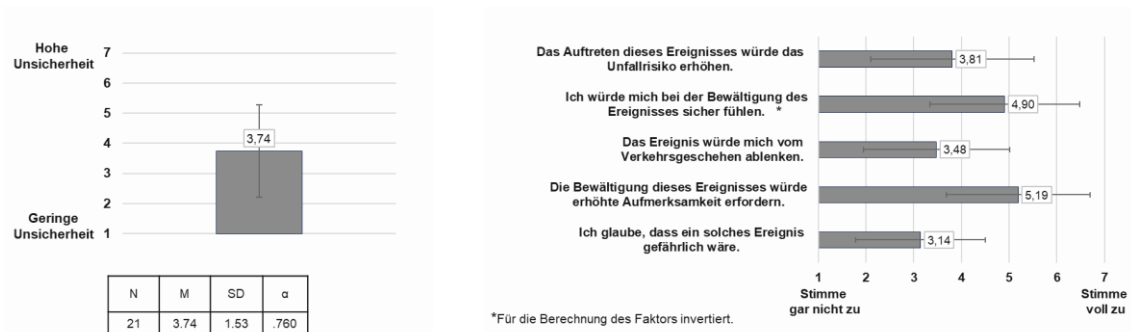
Ergebnisse des Faktors *Anxiety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses FBA Sprung.



Die wahrgenommene Unsicherheit mit Auftreten des Fehlers wurde auf ein mittleres Niveau der 7-stufigen Skala (1 = geringe Unsicherheit – 7 = hohe Unsicherheit) eingeordnet ( $M = 3,74$ ,  $SD = 1,53$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* und der zugrundeliegenden Einzelitems siehe Abbildung 92.

Abbildung 92

Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses FBA Sprung.



### 3.5.2.2.5 Fehlerbild *Ungeregelter RWA*

Im folgenden Abschnitt werden die objektiven Ergebnisse zur Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge der Aufschaltung des Fehlerbildes *Ungeregelter RWA* im Manöver Kreis, sowie die Ergebnisse hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung der Aufschaltung berichtet.

### 3.5.2.2.6 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistischen Verteilungen der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das Fehlerbild *Ungeregelter RWA* in der Limousine sind in Abbildung 93 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierrate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug bei dem untersuchten Fehlerbild sind zusätzlich in Tabelle 28 zusammengefasst. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 93 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig.

Im vorliegenden Fall zeigt die Limousine bezüglich des Fehlerbildes *Ungeregelter RWA* tendenziell etwas größere Störeinflüsse in Bezug auf die Lenkreaktion der Fahrer und die resultierende Fahrzeugdynamik.

Abbildung 93

Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störleakrate, Störquerbeschleunigung und Störgierrate für das Fehlerbild *Ungeregelter RWA* (weiß: Limousine; grau: Kompakt 2)

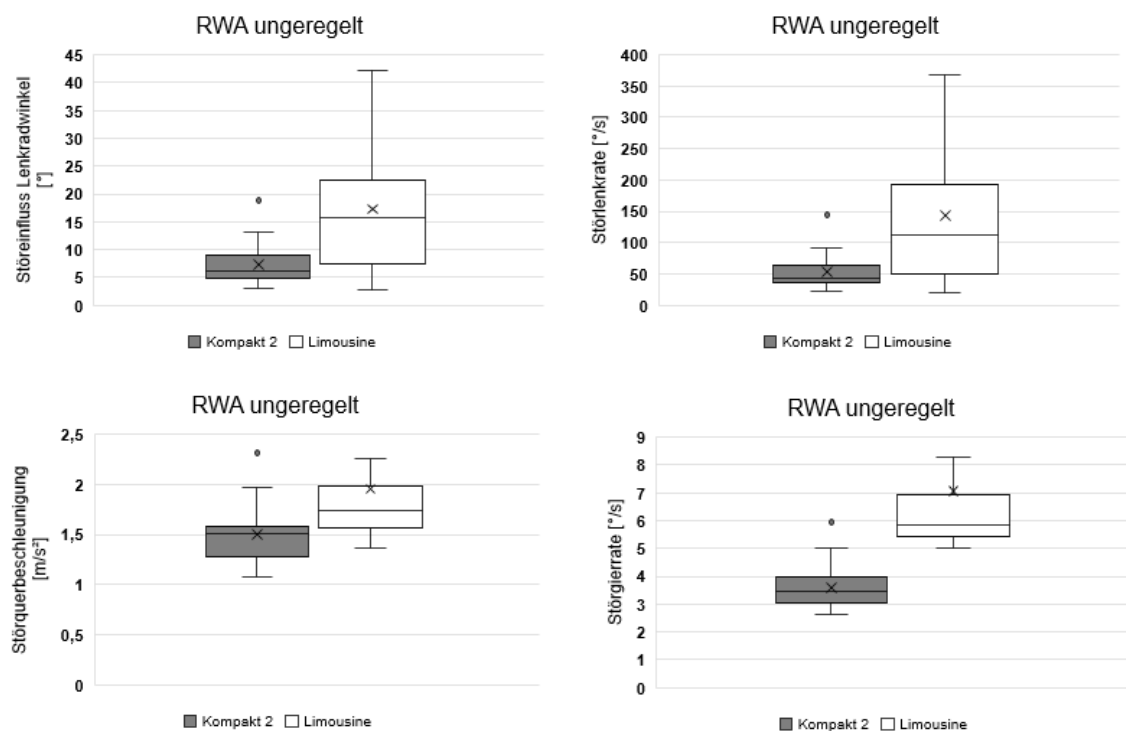


Tabelle 28

Deskriptive Statistikennwerte Fehlerbild Ungeregelter RWA (Limousine)

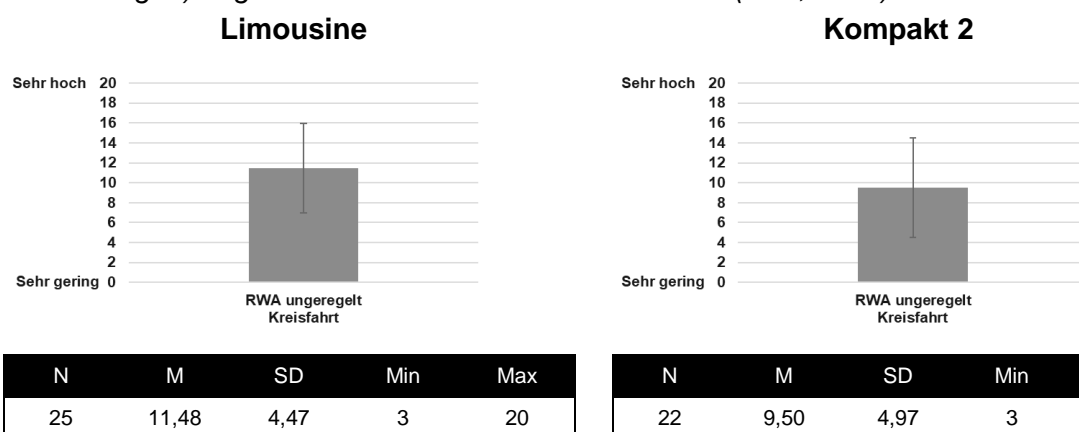
Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
Limousine	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	25	16,13	12,36	13,19	2,64	51,36
	Störlenkrate [°/s]	25	144,08	111,60	111,15	20,28	451,98
	Störquerbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	25	1,95	0,66	1,74	1,37	4,24
	Störgierate [°/s]	25	7,06	2,93	5,83	5,00	16,63

### 3.5.2.2.7 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

Nachfolgend wird auf die empfundene Schwierigkeit hinsichtlich der Absolvierung des Manövers Kreis mit Aufschaltung des Fehlers eingegangen. Die Erfassung erfolgte mittels der drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items hinsichtlich der mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie der Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch). Wiederum erfolgt an dieser Stelle die Ergebnisdarstellung gemeinsam mit den Ergebnissen der Teilstudie 2 (für Details siehe 3.2) mit dem Fahrzeug Kompakt 2, da in dieser der gleiche Fehlertyp Berücksichtigung fand. Eine Erklärung potentieller Unterschiede zwischen den Teilstudien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nicht möglich. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze. In beiden Teilstudien wurden die mentalen Anforderungen mit Erleben des RWA-Fehlers im mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala geschätzt (Limousine:  $M = 11,48$ ,  $SD = 4,47$ ; Kompakt 2:  $M = 9,50$ ,  $SD = 4,97$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 94.

Abbildung 94

Mentale Anforderungen des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers Ungeregelter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).



Anmerkung. Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

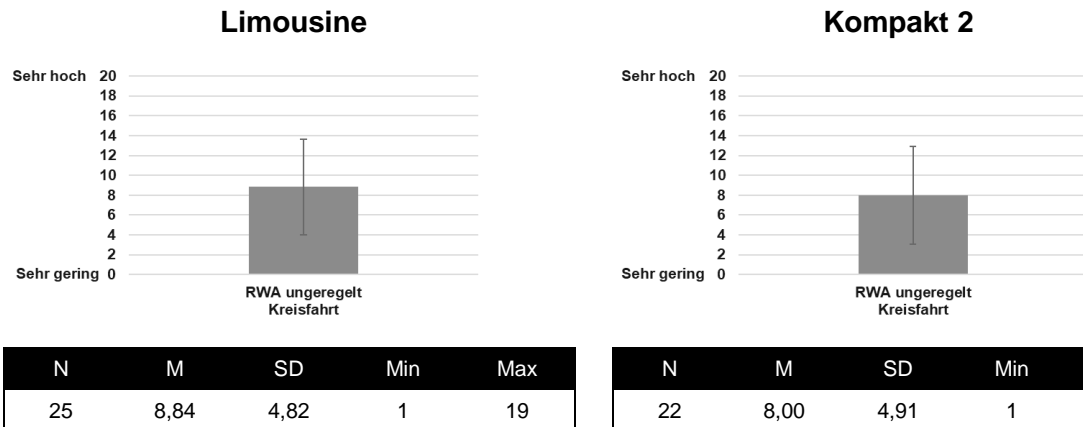
Die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des RWA-Fehlers wurde in beiden Teilstudien im niedrigen bis mittleren Bereich der 20-



stufigen Skala eingeschätzt (Limousine:  $M = 8,84$ ,  $SD = 4,82$ ; Kompakt 2:  $M = 8,00$ ,  $SD = 4,91$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 95.

Abbildung 95

*Körperliche Anforderungen des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers Ungeregelter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

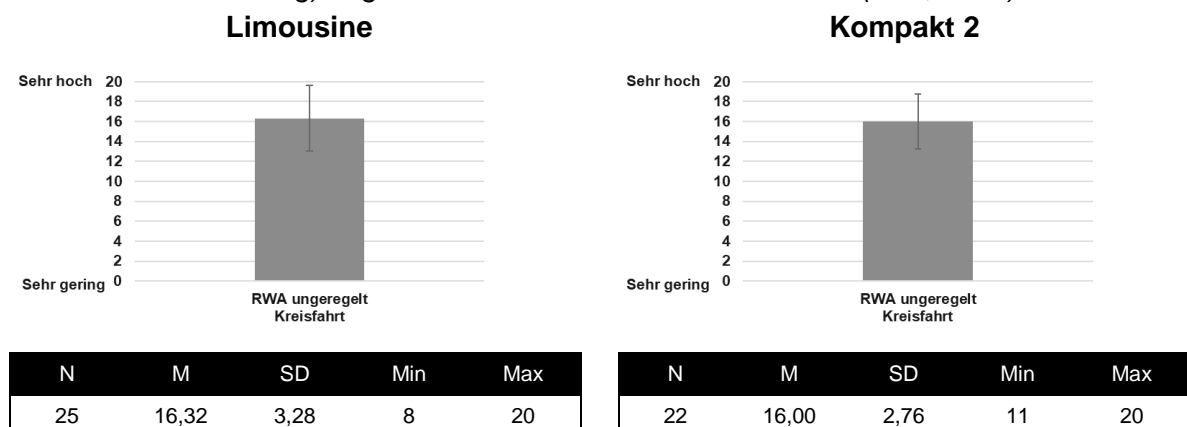


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die Einschätzung der eigenen Leistung bei der Absolvierung des Manövers Kreisfahrt mit Fehleraufschaltung lag in beiden Teilstudien mit mittleren bis hohen Bereich der 20-stufigen Antwortskala (Limousine:  $M = 16,32$ ,  $SD = 3,28$ ; Kompakt 2:  $M = 16,00$ ,  $SD = 2,76$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 96.

Abbildung 96

*Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Kreisfahrt mit Aufschaltung des Fehlers Ungeregelter RWA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*



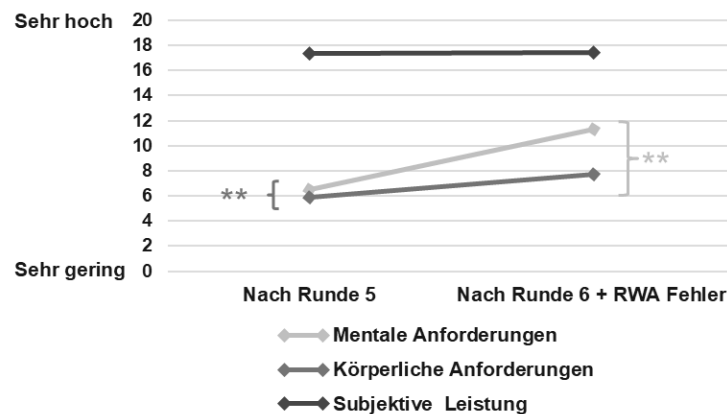
*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Zur Identifikation des Anteils der wahrgenommenen Schwierigkeit des Manövers Kreis, welcher auf das Erleben des Fehlers *Ungeregelter RWA* zurück zu führen ist, erfolgte ein

Vergleich der empfundenen mentalen und körperlichen Anforderungen sowie der subjektiven Leistungseinschätzung nach Runde 5 ohne Fehleraufschaltung mit denen nach erfolgter Fehleraufschaltung in Runde 6. Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs beider Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem  $t$ -Test. Es wurde deutlich, dass sowohl die mentalen, als auch die körperlichen Anforderungen in der letzten Runde mit Fehleraufschaltung im Vergleich zur vorangegangenen Runde signifikant anstiegen (mentale Anforderungen:  $t(12) = -3,91$ ,  $p = ,001$ ,  $d = -1,08$ , körperliche Anforderungen:  $t(12) = -4,01$ ,  $p = ,001$ ,  $d = -1,12$ ). Gleichzeitig bleibt die Einschätzung der eigenen Leistung konstant ( $t(12) = -0,17$ ,  $p = ,44$ ). Für eine graphische Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 97.

Abbildung 97

Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Kreis in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des Fehlers Ungeregelter RWA. (Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)



Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	13	6,46	3,71	2	16
	Nach Runde 6 + Fehler	13	11,31	5,11	3	18
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	13	5,92	3,69	1	13
	Nach Runde 6 + Fehler	13	7,69	4,73	1	17
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	13	17,38	1,71	13	19
	Nach Runde 6 + Fehler	13	17,46	2,03	14	20

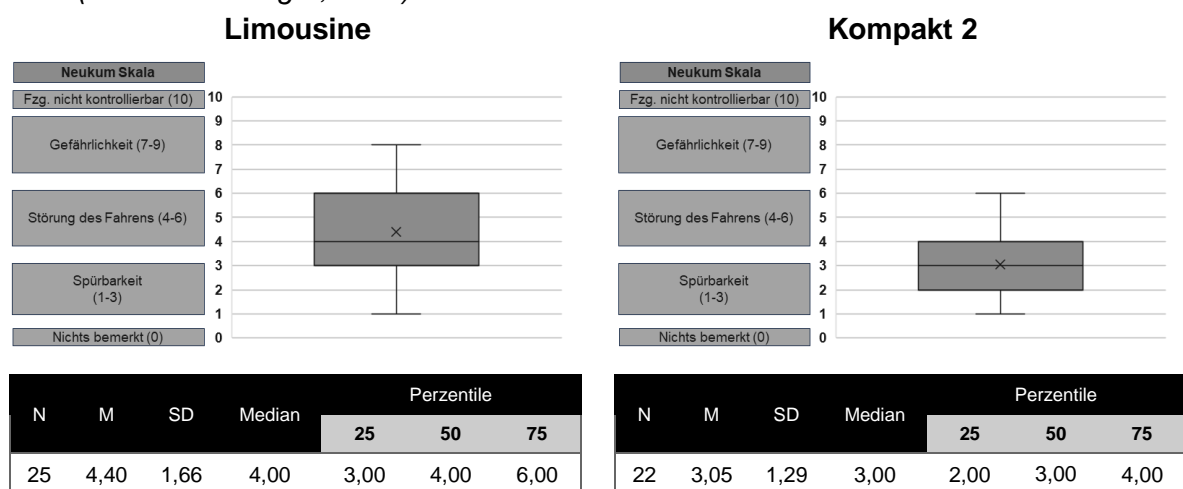
Die Verhaltensbeobachtung der Versuchspersonen zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung ergab, dass 80 % der Teilnehmenden ( $n = 20$ ) eine für die Versuchsleitung merkbare Reaktion zeigten. Diese zeigte sich in den meisten Fällen ( $n = 14$ ) durch verbale Äußerungen und am

zweithäufigsten ( $n = 7$ ) durch einen Blick in den Seiten-/Rückspiegel. Auf Nachfrage gaben 100 % der Teilnehmenden ( $n = 25$ ) an etwas Besonderes bemerkt zu haben und am häufigsten ( $n = 12$ ) wurde dies beschrieben als Ausbrechen/Wegrutschen des Fahrzeugs. Die am häufigsten erwähnte Beschreibung der affektiven Reaktion war Überraschung/Erschrecken ( $n = 18$ ). Zur Beschreibung der Reaktion auf kognitiver Ebene wurde am häufigsten ( $n = 14$ ) der Gedanke, über eine Pylone/etwas Anderes gefahren zu sein, erwähnt. Auf behavioraler Ebene gaben die einige Versuchspersonen ( $n = 15$ ) an, nach Fehleraufschaltung gegengelenkt / korrigiert zu haben. Sollte sich das Ereignis wiederholen würden 80 % der Teilnehmenden ( $n = 20$ ) wieder genauso reagieren, wohingegen einzelne Personen anhalten und nach dem Grund des Ereignisses schauen ( $n = 3$ ) oder schneller abbremsen ( $n = 2$ ) würden.

Die Bewertung der subjektiv wahrgenommenen Kritikalität mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003) ergab, dass der Fehler *Ungeregelter RWA* in der Teilstudie mit der Limousine auf der 11-stufigen Skala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar) durchschnittlich auf einem niedrigen Niveau der Kategorie Störung des Fahrens lag ( $M = 4,40$ ,  $SD = 1,66$ ). Alle validen Datensätze wurden in der Analyse berücksichtigt. Zur Gegenüberstellung werden die Ergebnisse der Teilstudie mit dem Fahrzeug Kompakt 2 (für Details siehe 3.2) berichtet, in welcher der gleiche Fehlertyp untersucht wurde. Eine Erklärung von Unterschieden zwischen den Ergebnissen beider Teilstudien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fehlerparametrierung und Versuchsfahrzeug jedoch nicht möglich. In der Teilstudie mit dem Fahrzeug Kompakt 2 wurde der gleiche Fehlertyp durchschnittlich auf einem hohen Niveau der Kategorie Spürbarkeit berichtet ( $M = 3,05$ ,  $SD = 1,29$ ). Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 98.

Abbildung 98

*Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlertypen Ungeregelter RWA in den beiden Teilstudien mit den Versuchsfahrzeugen Limousine und Kompakt 2 erhoben mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003).*

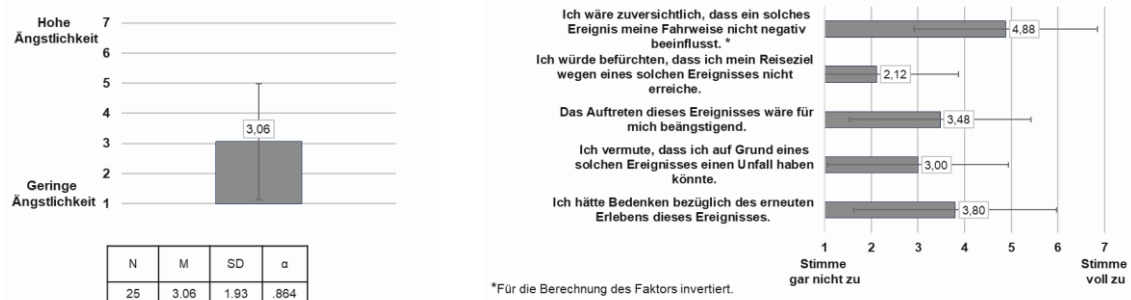


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die Ängstlichkeit mit Bemerkten des Ereignisses erscheint auf einem mittleren Niveau der 7-stufigen Skala (1 = geringe Ängstlichkeit bis 7 = hohe Ängstlichkeit) ( $M = 3,06$ ,  $SD = 1,93$ ). Für eine Darstellung des Faktors und der zugrundeliegenden Items siehe Abbildung 99.

Abbildung 99

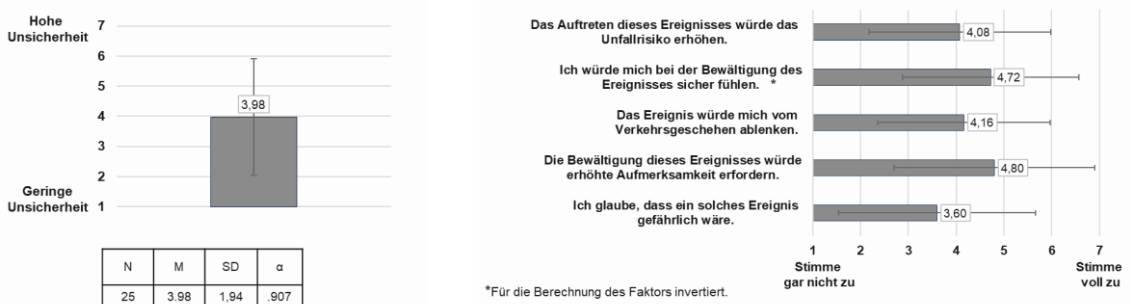
Ergebnisse des Faktors Anxiety (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses Ungeregelter RWA.



Die wahrgenommene Unsicherheit bei Bemerkten des Fehlers war in einem mittleren Bereich der 7-stufigen Skala (1 = geringe Unsicherheit bis 7 = hohe Unsicherheit) ( $M = 3,98$ ,  $SD = 1,94$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors, sowie der Einzelitems siehe Abbildung 100.

Abbildung 100

Ergebnisse des Faktors Perceived Safety (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses Ungeregelter RWA.



### 3.5.2.2.8 Nachbefragung

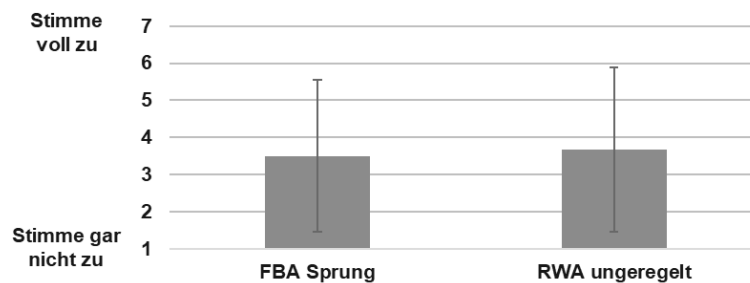
Nach Aufklärung der Teilnehmenden hinsichtlich des Versuchsgegenstands im Anschluss an die Durchführung der Versuchsfahrten, erfolgte eine Nachbefragung. Für jeden bemerkten Fehler wurden die Teilnehmenden zunächst gebeten anzugeben, inwiefern sie zustimmen würden, ein Fahrzeug zu nutzen, welches diesen aufweisen könnte. Der FBA-Fehler wurde mit Ausnahme von einer Versuchsperson von allen Teilnehmenden bemerkt ( $n = 20$ ). Der

Nutzung eines Fahrzeuges, welches ebendiesen Fehler aufweisen könnte, wurde von den Teilnehmenden auf einer 7-stufigen Skala (1 = stimme gar nicht zu bis 7 = stimme voll zu) weder eindeutig zugestimmt, noch wurde diese abgelehnt ( $M = 3,50$ ,  $SD = 2,04$ ). Der RWA-Fehler wurde von allen Teilnehmenden bemerkt ( $n = 21$ ) und ebenso wurde der Nutzung eines Fahrzeuges, welches diesen Fehler aufweisen könnte, weder eindeutig zugestimmt, noch wurde diese abgelehnt ( $M = 3,67$ ,  $SD = 2,22$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 101.

Abbildung 101

*Nutzungsintention hinsichtlich eines Fahrzeuges, welches den erlebten Fehler FBA Sprung oder Ungeregelter RWA aufweisen könnte, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.*

Item: Ich würde ein Fahrzeug nutzen, bei dem dieser Fehler auftreten könnte.



Fehler	N	M	SD	Min	Max
FBA Sprung	20	3,50	2,04	1	6
RWA ungeregelt	21	3,67	2,22	1	7

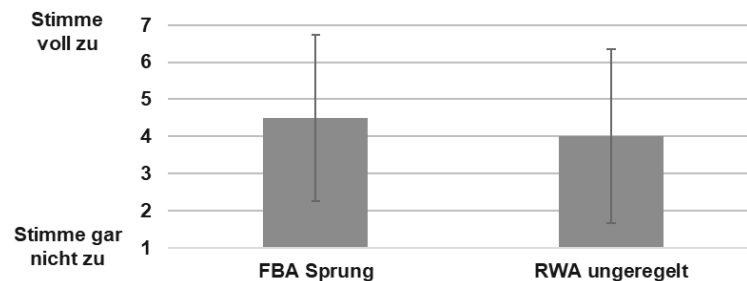
*Anmerkung.* Die Beantwortung des Items erfolgte lediglich durch Versuchspersonen, die den jeweiligen Fehler im Versuchsdurchlauf bemerkt haben.

Ebenso wurden die Teilnehmenden gebeten, für jeden bemerkten Fehler anzugeben, inwiefern sie zustimmen würden, bei Auftreten eines solchen Fehlers mit dem Fahrzeug eine Werkstatt aufzusuchen. Für beide Fehler gilt, dass sich weder eine eindeutige Zustimmung noch eine eindeutige Ablehnung hinsichtlich des Aufsuchens einer Werkstatt zeigte (*FBA Sprung*:  $M = 4,50$ ,  $SD = 2,24$ ; *Ungeregelter RWA*:  $M = 4,00$ ,  $SD = 2,35$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 102.

Abbildung 102

*Absicht eine Werkstatt aufzusuchen bei Auftreten der erlebten Fehler FBA Sprung oder Ungeregelter RWA im eigenen Fahrzeug, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.*

Item: Wenn ein solcher Fehler auftritt, würde ich zur Werkstatt fahren.



Fehler	N	M	SD	Min	Max
FBA Sprung	20	4,50	2,24	1	7
RWA ungeregelt	21	4,00	2,35	1	7

*Anmerkung.* Die Beantwortung des Items erfolgte lediglich durch Versuchspersonen, die den jeweiligen Fehler im Versuchsdurchlauf bemerkt haben.

### 3.5.3 Zusammenfassung Studie 5

Im Folgenden wird eine Übersicht hinsichtlich der Hauptergebnisse der durchgeführten Teilstudie 5 (Fahrzeug: Limousine; Fehler: *FBA Sprung* / *Ungeregelter RWA*) gegeben.

- Die Gestaltung des Parcours erscheint angemessen, die Versuchspersonen werden weder unter- noch überfordert.
- Es wird eine Lernkurve der Versuchspersonen über den Verlauf der Testung deutlich.
- Für den Fehler *Ungeregelter RWA* konnte die aufgestellte Forschungshypothese beibehalten werden. Für den Fehler *FBA Sprung* muss die Hypothese verworfen werden, da es im Fall von  $n = 1$  zu einem Spurverlassen nach Fehleraufschaltung gekommen ist.
- Der Fehler *FBA Sprung*
  - wurde von 95% der Versuchspersonen bemerkt;
  - bewirkt keinen signifikanten Anstieg der empfunden mentalen und körperlichen Anforderungen sowie keine signifikante Verschlechterung der subjektiv empfundenen Leistung im betreffenden Fahrmanöver;
  - wird auf affektiver Ebene mehrheitlich mit Erschrecken und Überraschung oder keiner spezifischen affektiven Reaktion assoziiert;
  - provoziert bei einem Großteil der Versuchspersonen eine behaviorale Reaktion (Gegenlenken/Korrekturverhalten)
  - wird bezüglich der Kritikalität auf einem hohen Niveau der „Spürbarkeit“ bis zu einer geringen Ausprägung der Kategorie „Störung des Fahrens“ eingeordnet.

- Der Fehler *Ungeregelter RWA*
  - wurde von allen Versuchspersonen bemerkt;
  - steht in Verbindung mit einem signifikanten Anstieg der empfunden mentalen und körperlichen Anforderungen, die empfundene eigene Leistung sinkt im betreffenden Fahrmanöver signifikant;
  - wird auf affektiver Ebene mehrheitlich mit Erschrecken und Überraschung assoziiert;
  - provoziert bei einem Großteil der Versuchspersonen eine behaviorale Reaktion (Gegenlenken/Korrekturverhalten)
  - wird bezüglich der Kritikalität auf einem niedrigen Niveau der Kategorie „Störung des Fahrens“ eingeordnet.

Die inhaltliche Diskussion der Ergebnisse der Teilstudien erfolgt übergeordnet für die gesamte Versuchsreihe in Abschnitt 4.

### 3.6 Studie 6

Die sechste Teilstudie wurde im Zeitraum vom 17. bis 20. Mai 2022 unter Verwendung des Versuchsfahrzeugs SUV 2 durchgeführt. Die ausgewählten Fehlerbilder waren der *Geblockte FBA* im Manöver Slalom und die *RWA Rechteckschwingung*, welche im zugehörigen Manöver Geradeausfahrt aufgeschaltet wurde. Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt.

#### 3.6.1 Stichprobe

An der Studie haben  $N = 28$  Personen teilgenommen, hiervon sind 22 Personen männlich. Das mittlere Alter beträgt  $M = 34,79$  Jahre ( $SD = 14,65$ ), wobei die jüngste Versuchsperson 20 und die älteste 63 Jahre alt sind. Die mittlere jährliche Fahrleistung beträgt  $M = 18.111,11$  km ( $SD = 12.864,18$  km) mit einer Spannweite von 7.000 km – 60.000 km. Keine der Versuchspersonen gibt an, eine nicht korrigierte Seh- oder Hörbeeinträchtigung zu haben.

#### 3.6.2 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt aufgeteilt in die beiden Abschnitte fehlerunabhängige und fehlerspezifische Ergebnisse. Zunächst erfolgt der Bericht von Ergebnissen, welche sich von den Fehleraufschaltungen unabhängig, auf die allgemeine Schwierigkeit der gewählten Manöver im Sinne der Prüfung des gewählten Versuchsdesigns beziehen. Anschließend erfolgt die Darstellung der fehlerspezifischen Ergebnisse. In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Ergebnisse zur Prüfung der Kontrollierbarkeit beider Fehler (FBA und RWA) eingegangen. Darauf folgend werden die subjektiven Versuchsdaten hinsichtlich des Erlebens der Fehleraufschaltung, sowie die objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehleraufschaltung zunächst für den FBA- und darauf folgend für den RWA-Fehler berichtet.

### 3.6.2.1 Fehlerunabhängige Ergebnisse

Die Erfassung der allgemeinen Schwierigkeit der Manöver erfolgte mittels drei Fragen zu den mentalen und körperlichen Anforderungen sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung in Anlehnung an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) und auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch). Die Befragungszeitpunkte waren zu Beginn der Testung (nach der Eingewöhnungsfahrt) sowie vor Beendigung der Testung (im Anschluss an Fahrt 5). Zur inferenzstatistischen Analyse der Lernkurve erfolgte ein Vergleich der Anforderungen von Beginn und Ende der Fahrt mittels gepaartem  $t$ -Test. In die Analyse einbezogen wurden alle Personen, welche für beide Fehlerfälle valide Datensätze aufwiesen.

Alle drei Manöver werden hinsichtlich der mentalen Anforderungen auf einem niedrigen bis mittleren Bereich der 20-stufigen Skala eingeordnet, wobei die Geradeausfahrt am wenigsten mental anforderungsreich zu sein scheint. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 29. Vor der letzten Fahrt werden die Manöver Kreisfahrt und Slalom mental als signifikant weniger anspruchsvoll empfunden, als zu Beginn der Testung (Kreisfahrt:  $t(22) = 3,2$ ,  $p = ,002$ ,  $d = 0,67$ ; Slalom:  $t(22) = 1,97$ ,  $p = ,03$ ,  $d = 0,41$ ; Geradeausfahrt:  $t(22) = 1,08$ ,  $p = ,15$ ).

Tabelle 29

*Mentale Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Mentale Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	23	6,17	3,61	1	14
	Vor der letzten Runde	23	5,52	4,05	1	15
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	23	10,83	3,74	4	20
	Vor der letzten Runde	23	8,35	3,97	2	15
Slalom	Nach Eingewöhnung	23	12,52	4,05	3	20
	Vor der letzten Runde	23	10,74	5,00	2	20

Ebenso hinsichtlich der körperlichen Anforderungen werden die drei Manöver in einem niedrigen bis mittleren Bereich der Antwortskala eingeordnet. Wiederum erscheint die Geradeausfahrt als am wenigsten anforderungsreich. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 30. Über den Verlauf der Testung bleiben die körperlichen Anforderungen der Geradeausfahrt konstant ( $t(22) = 0,09$ ,  $p = ,46$ ), wohingegen diese bei den Manövern Kreisfahrt und Slalom signifikant sinken (Kreisfahrt:  $t(22) = 1,82$ ,  $p = ,04$ ,  $d = 0,38$ ; Slalom:  $t(22) = 2,27$ ,  $p = ,017$ ,  $d = 0,47$ ).



Tabelle 30

*Körperliche Anforderungen der Manöver Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Körperliche Anforderungen						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	23	3,65	3,27	1	13
	Vor der letzten Runde	23	3,61	2,71	1	10
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	23	8,57	4,21	1	20
	Vor der letzten Runde	23	7,48	3,78	2	15
Slalom	Nach Eingewöhnung	23	11,22	4,12	3	20
	Vor der letzten Runde	23	9,78	4,47	3	20

Die eigene Leistung ordnen die Versuchspersonen über den Verlauf der Testung auf einem hohen Niveau der Antwortskala ein. Für eine Darstellung der Kennwerte siehe Tabelle 31. Am Ende der Testung werden die Leistungen in allen drei Manövern im Vergleich zum Beginn der Testung als signifikant besser eingeschätzt (Geradeausfahrt:  $t(22) = -1,78$ ,  $p = ,045$ ,  $d = -0,37$ ; Kreisfahrt:  $t(22) = -3,67$ ,  $p < ,001$ ,  $d = -0,76$ ; Slalom:  $t(22) = -3,22$ ,  $p = ,002$ ,  $d = -0,67$ ).

Tabelle 31

*Einschätzung der eigenen Leistung in den Manövern Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom basierend auf 20-stufiger Skala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA TLX (Hart, 2006).*

Einschätzung der eigenen Leistung						
Manöver	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Geradeausfahrt	Nach Eingewöhnung	23	16,35	2,35	12	20
	Vor der letzten Runde	23	17,39	2,39	13	20
Kreisfahrt	Nach Eingewöhnung	23	14,48	2,68	10	20
	Vor der letzten Runde	23	16,09	2,17	12	20
Slalom	Nach Eingewöhnung	23	14,35	2,64	7	18
	Vor der letzten Runde	23	15,91	2,47	11	20

### 3.6.2.2 Fehlerspezifische Ergebnisse

Nachfolgend wird zunächst auf die Ergebnisse zur Prüfung der Kontrollierbarkeit der beiden Fehlerbilder *Geblockter FBA* und *RWA Rechteckschwingung* eingegangen. Anschließend erfolgt separat für beide Fehler die Darstellung der subjektiven Ergebnisse hinsichtlich des Erlebens der Fehleraufschaltung und daran anschließend der objektiven Versuchsdaten bezüglich der Fahrer- und Fahrzeugreaktion infolge der Fehlerereignisse.

#### 3.6.2.2.1 Kontrollierbarkeit – Hypothesenprüfung

Im Rahmen der sechsten Teilstudie gilt für den im Manöver Slalom aufgeschalteten Fehler *Geblockter FBA*, dass 100% der Versuchspersonen, welche valide Datensätze aufwiesen, die Fahrspur mit Fehleraufschaltung nicht verlassen haben. 100% der Datensätze umfassen dabei mindestens  $N = 20$  Datensätze. Die Hypothese kann somit für diese ausgewählte Kombination aus Fehlerparametrierung und Fahrzeug beibehalten werden. Im Rahmen der durchgeführten Studie war dieser Fehler auf dem von Experten festgelegten C0-Level für alle Versuchspersonen kontrollierbar.

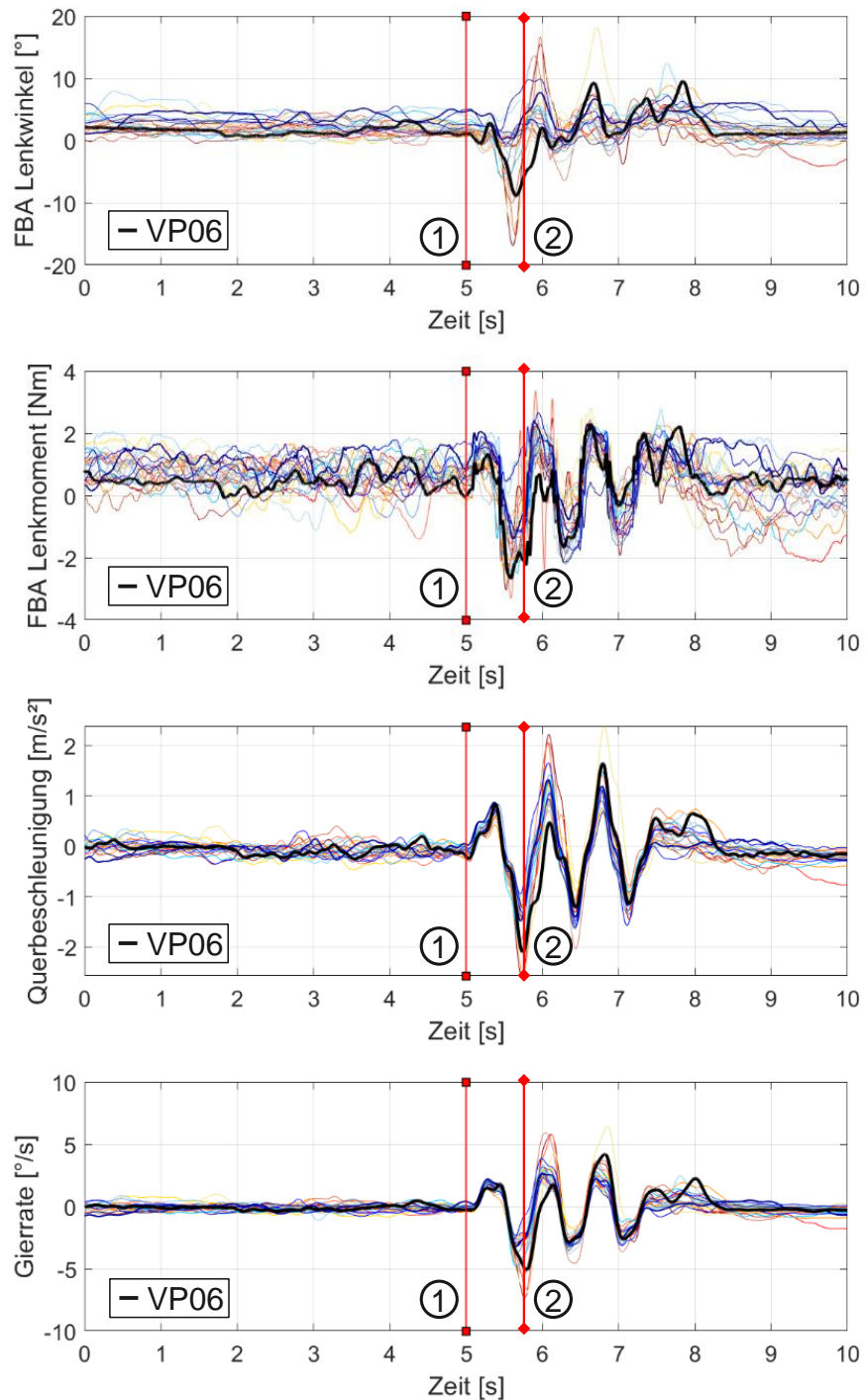
Mit Aufschaltung des Fehlers *RWA Rechteckschwingung* ist es in einem Fall ( $n = 1$ ) zu einem Spurverlassen in Form einer berührten Pylone gekommen. Für die Kombination aus Versuchsfahrzeug und RWA-Fehler muss die Hypothese somit abgelehnt werden. Das von Experten für diesen Fehler definierte C0-Level konnte nicht von allen Versuchspersonen kontrolliert werden.

##### 3.6.2.2.1.1 Analyse Spurverlassen

Abbildung 103 zeigt ausgewählte Fahrzeugmessgrößen von Versuchsperson 06 im Vergleich zu den übrigen validen Messdatensätzen der *RWA Rechteckschwingung* Fehleraufschaltung im Fahrzeug SUV 2. Der Zeitpunkt der Fehleraufschaltung (1) sowie der Zeitpunkt des Pylonenkontakts (2) sind auf der Zeitachse markiert. Hinsichtlich der Fahrereingaben (Lenkwinkel, Lenkmoment) zeigt Versuchsperson 06 im Vergleich zu den anderen Versuchspersonen sowohl vor der Fehleraufschaltung (1) und dem Kontakt mit der Pylone (2) keine auffällige Fahrweise. Dies spiegelt sich auch in der resultierenden Fahrzeugdynamik (Querbesehleunigung, Gierrate) wieder, die vor dem Pylonenkontakt ebenfalls keine Auffälligkeiten im Vergleich zu den anderen Versuchspersonen zeigt. Für eine graphische Darstellung der Situation siehe Anhang 6.6.

Abbildung 103

Fahrzeugmessdaten RWA Rechteckschwingung-Fehlerrückmeldung (SUV2) – VP06 vs. valide RWA Rechteckschwingung-Messdaten; (1) Zeitpunkt der Fehlerrückmeldung, (2) Zeitpunkt des Pylonenkontakts



### 3.6.2.2.2 Fehlerbild: *Geblockter FBA*

Im Folgenden werden die objektiven Fahrzeugmessdaten zur Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge des Fehlers *Geblockter FBA*, sowie die Ergebnisse hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung der Aufschaltung berichtet.

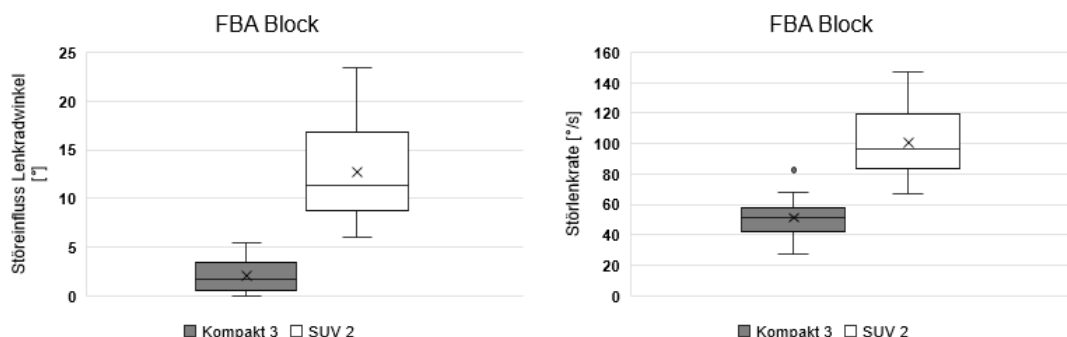
### 3.6.2.2.3 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistischen Verteilungen der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das Fehlerbild *Geblockter FBA* im Fahrzeug SUV 2 sind in Abbildung 104 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierrate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug bei dem untersuchten Fehlerbild sind zusätzlich in Tabelle 32 zusammengefasst. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 104 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig.

Im vorliegenden Fall zeigt der SUV 2 im Vergleich zum Kompakt 3 deutlich größere Störeinflüsse in Bezug auf die Lenkreaktion der Fahrer und die resultierende Fahrzeugdynamik. Hierbei ist zu beachten, dass die Aufschaltdauer des Fehlers beim SUV 2 mit 200 ms auch doppelt so lang wie die Fehleraufschaltdauer im ID.3 gewählt wurde. Außerdem wurden die Fehler jeweils an anderen Stellen im Slalomparcours aufgeschaltet.

Abbildung 104

*Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störleakrate, Störquerbeschleunigung und Störgierrate für das Fehlerbild Geblockter FBA (weiß: SUV 2; grau: Kompakt 3)*



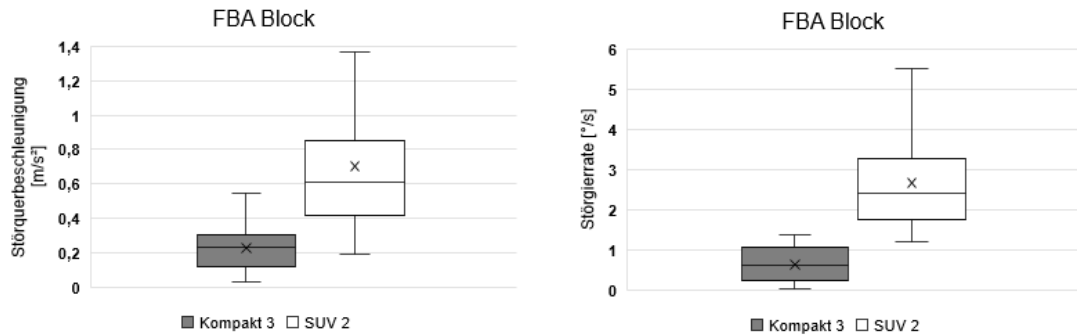


Tabelle 32

Deskriptive Statistikkenwerte Fehlerbild Geblockter FBA (SUV 2)

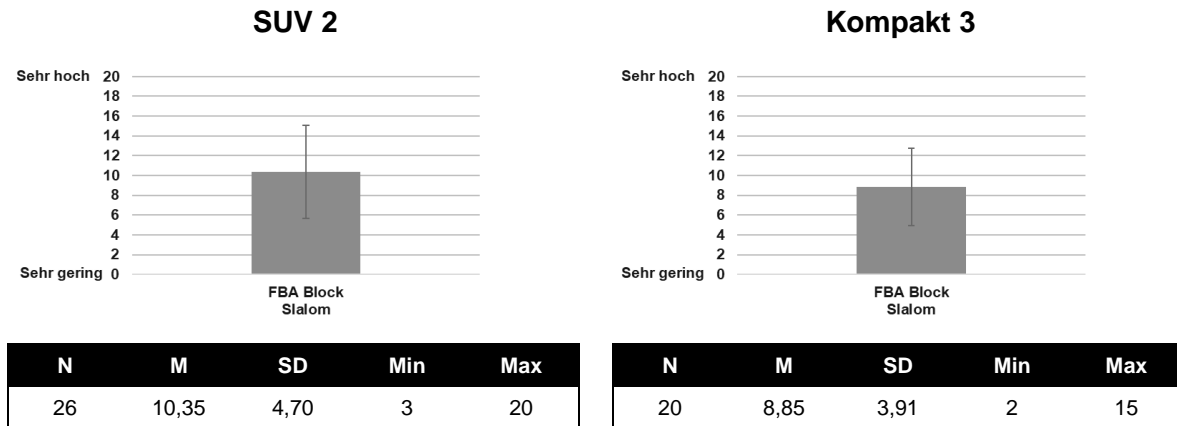
Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
SUV 2	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	26	12,61	4,54	11,32	6,01	23,43
	Störleakrate [°/s]	26	100,58	22,13	96,09	67,40	146,99
	Störquerbeschleunigung [m/s²]	26	0,70	0,37	0,61	0,19	1,69
	Störgierate [°/s]	26	2,67	1,08	2,42	1,20	5,53

### 3.6.2.2.4 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

Im Folgenden wird auf die empfundene Schwierigkeit des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers eingegangen. Die Erfassung erfolgte mittels drei Fragen hinsichtlich der erlebten mentalen und körperlichen Anforderungen sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering bis 20 = sehr hoch) in Anlehnung an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006). Die Ergebnisse werden gemeinsam mit jenen der Teilstudie 4 (für Details siehe 3.1) mit dem Versuchsfahrzeug Kompakt 3 dargestellt, da hier der gleiche Fehlertyp Berücksichtigung fand. Unterschiede zwischen beiden Teilstudien können jedoch lediglich beschrieben und aufgrund der gleichzeitigen Manipulation von Fehlerparametrierung und Fahrzeug nicht erklärt werden. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze. Sowohl in der Teilstudie mit dem Versuchsfahrzeug SUV 2 als auch in der Teilstudie mit dem Versuchsfahrzeug Kompakt 3 wurden die mentalen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Slalom mit Fehleraufschaltung in einem mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala berichtet (SUV 2:  $M = 10,35$ ,  $SD = 4,70$ ; Kompakt 3:  $M = 8,85$ ,  $SD = 3,91$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 105.

Abbildung 105

*Mentale Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers Geblockter FBA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

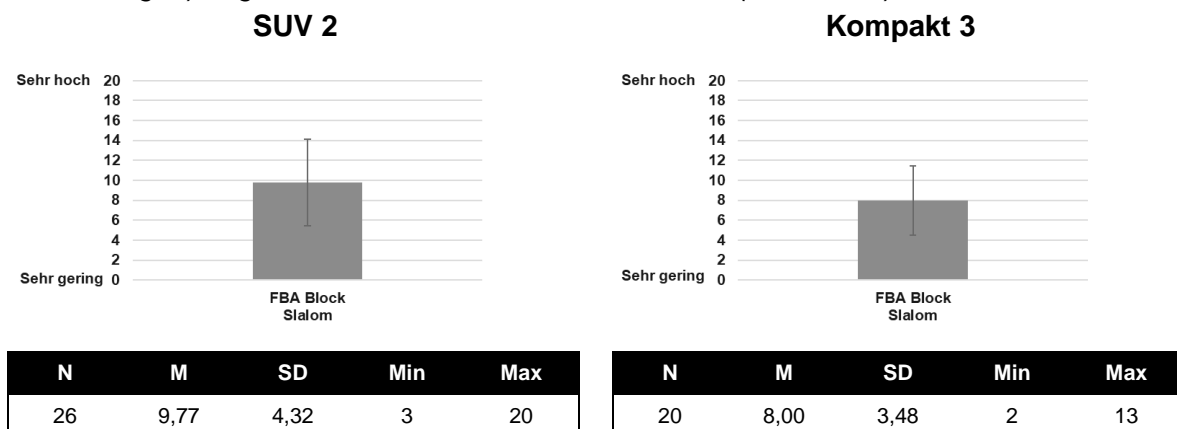


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Slalom im Kontext des Erlebens der Fehleraufschaltung wurden in beiden Teilstudien im mittleren Bereich der Antwortskala eingeschätzt (SUV 2:  $M = 9,77$ ,  $SD = 4,32$ ; Kompakt 3:  $M = 8,00$ ,  $SD = 3,48$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 106.

Abbildung 106

*Körperliche Anforderungen des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers Geblockter FBA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

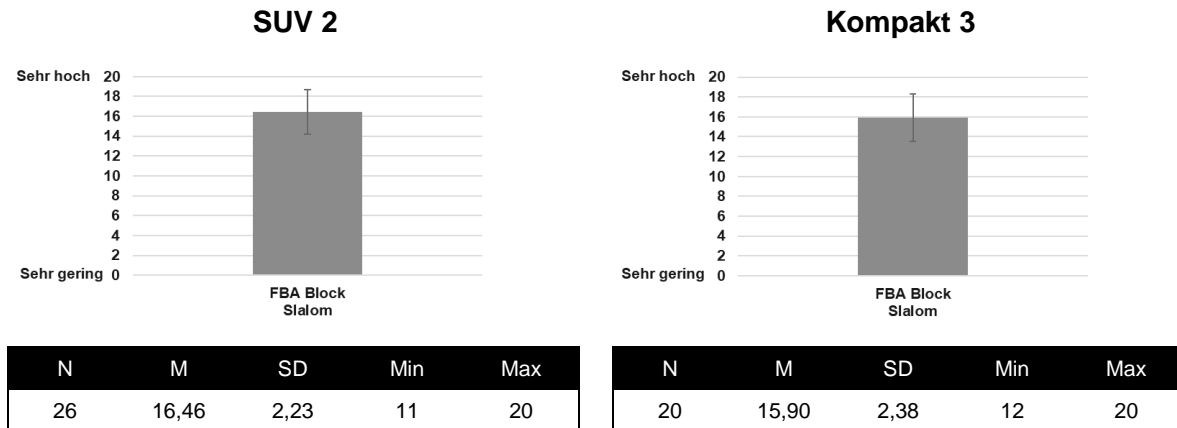


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung hinsichtlich der Absolvierung des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers liegt in beiden Teilstudien im mittleren bis hohen Bereich der 20-stufigen Antwortskala (SUV 2:  $M = 9,77$ ,  $SD = 4,32$ , Kompakt 3:  $M = 8,00$ ,  $SD = 3,48$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 107.

Abbildung 107

Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Slalom mit Aufschaltung des Fehlers Geblockter FBA erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).

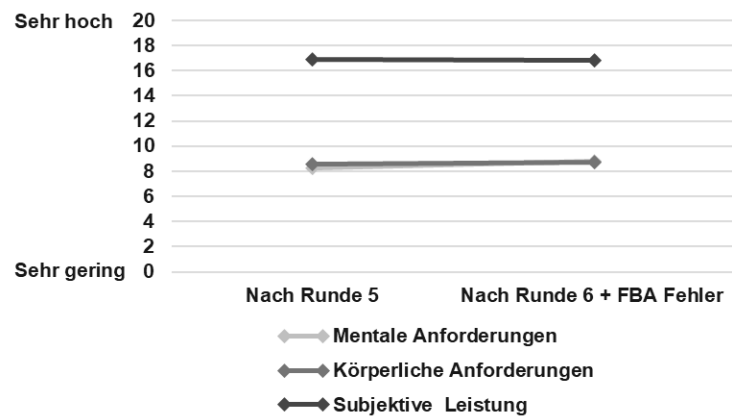


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich

Mit dem Ziel der Identifikation des Einflusses der Fehleraufschaltung auf die empfundene Schwierigkeit des Manövers wurden die wahrgenommenen mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung nach Runde 5 ohne Fehler mit jenen nach erfolgter Fehleraufschaltung in Runde 6 verglichen. Zugrundeliegende Annahme war, dass zu diesem fortgeschrittenen Zeitpunkt in der Testung die Lernkurve der Versuchspersonen hinsichtlich der Absolvierung des Manövers bereits abgeflacht ist und Unterschiede zwischen den Bewertungen auf das Erleben des Fehlers zurück zu führen sind. Aufgrund der randomisierten Aufschaltung beider Fehler dieser Teilstudie (FBA- und RWA-Fehler) auf die Runden 3 und 6, liegt die Anzahl der Datensätze, welche in der Analyse berücksichtigt wurden bei der Hälfte aller validen Datensätze (in denen die Aufschaltung des jeweiligen Fehlers in Runde 6 erfolgte). Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs der beiden Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem  $t$ -Test. Für die Teilstudie mit dem Fahrzeug SUV 2 zeigte sich, dass die mentalen und körperlichen Anforderungen, genauso wie die Einschätzung der eigenen Leistung über beide Befragungszeitpunkte konstant bleibt (mentale Anforderungen:  $t(12) = -0,5$ ,  $p = ,31$ , körperliche Anforderungen:  $t(12) = -0,14$ ,  $p = ,44$ , subjektive Leistung:  $t(12) = 0,22$ ,  $p = ,41$ ). Für eine graphische Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 108.

Abbildung 108

Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Slalom in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des Fehlers Geblockter FBA. (Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)



Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	13	8,23	4,29	2	16
	Nach Runde 6 + Fehler	13	8,77	4,25	3	15
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	13	8,54	3,87	3	15
	Nach Runde 6 + Fehler	13	8,69	4,21	3	15
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	13	16,92	2,87	11	20
	Nach Runde 6 + Fehler	13	16,85	2,70	11	20

Zum Zeitpunkt der Aufschaltung des Fehlers erfolgte eine Verhaltensbeobachtung der Versuchspersonen durch die Versuchsleitung zur Erfassung einer initialen Reaktion auf das Ereignis. In diesem Fall zeigte jedoch keine der Versuchspersonen eine für die Versuchsleitung merkbare Reaktion. Im Nachgang an die Absolvierung des Manövers wurden die Versuchspersonen gefragt, ob ihnen etwas Besonderes aufgefallen ist. Dies bejahten 73,08% der Versuchspersonen ( $n = 19$ ). Das Ereignis wurde am häufigsten beschrieben als Blockade / Veränderung am Lenkrad ( $n = 14$ ). Daran anknüpfend wurden die Versuchspersonen, die den Fehler bemerkt hatten, gebeten ihre Reaktion auf affektiver, kognitiver und behavioraler Ebene zu beschreiben. Zur Erfassung der affektiven Reaktion wurden sie gebeten die Gefühle zu beschreiben, welche die Wahrnehmung des Fehlers begleiteten. Am häufigsten wurde jedoch erwähnt, dass keine spezifische Gefühlsregung einherging ( $n = 11$ ). Deutlich seltener, jedoch am zweithäufigsten wurde eine (leichte)

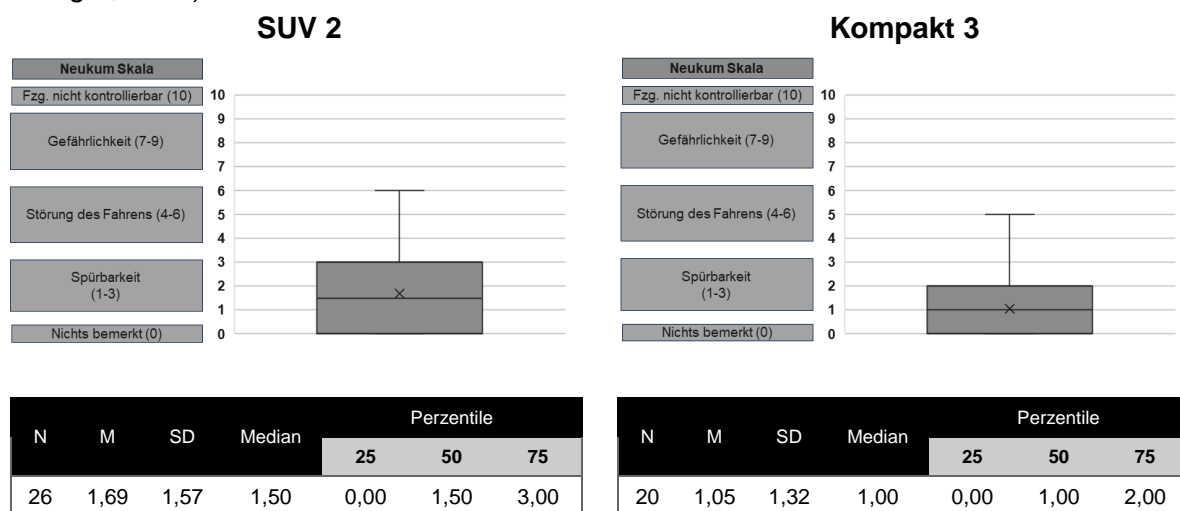


Überraschung / Erschrecken ( $n = 3$ ) erwähnt. Zur Erfassung der kognitiven Reaktion wurden die Versuchspersonen gebeten, ihre Gedanken zum Zeitpunkt des Ereignisses zu beschreiben. Am häufigsten ( $n = 5$ ) wurde der Gedanke, dass etwas anders / nicht in Ordnung sei, genannt. Es wurde sich  $n = 3$  Mal mit der Frage auseinandergesetzt, „ob da etwas war?“. Zur Beschreibung der behavioralen Reaktion wurden die Versuchspersonen gebeten zu erläutern, was sie infolge des Ereignisses getan haben. Am häufigsten wurde erwähnt normal weiter gefahren zu sein ( $n = 10$ ), oder Gegengelenkt/korrigiert zu haben ( $n = 9$ ).

Zur Erfassung der mit der Fehleraufschaltung einhergehenden subjektiv empfundenen Kritikalität wurde die Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003) gewählt. An dieser Stelle erfolgt nochmals eine Gegenüberstellung der Ergebnisse dieser Teilstudie mit denen aus der Teilstudie 4 (für Details siehe 3.4) mit dem Versuchsfahrzeug Kompakt 3, da sich diese mit dem gleichen Fehlertypen befasste. Mögliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen beider Teilstudien können lediglich beschrieben, jedoch aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nicht erklärt werden. Für die Analyse wurden alle validen Datensätze berücksichtigt. Die mittlere subjektiv empfundene Kritikalität der Aufschaltung des Fehlers *Geblockter FBA* lag in der Teilstudie 6 mit dem SUV 2 auf einem niedrigen bis mittleren Bereich der Kategorie Spürbarkeit ( $M = 1,69$ ,  $SD = 1,57$ ) auf der 11-stufigen Antwortskala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar). In der Teilstudie mit dem Fahrzeug Kompakt 3 wird die Kritikalität deskriptiv etwas geringer auf einem niedrigen Niveau der Kategorie Spürbarkeit eingeordnet ( $M = 1,05$ ,  $SD = 1,32$ ). Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 109.

Abbildung 109

*Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlertypen Geblockter FBA in den beiden Teilstudien mit den Versuchsfahrzeugen SUV2 und Kompakt 3 erhoben mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003).*



*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

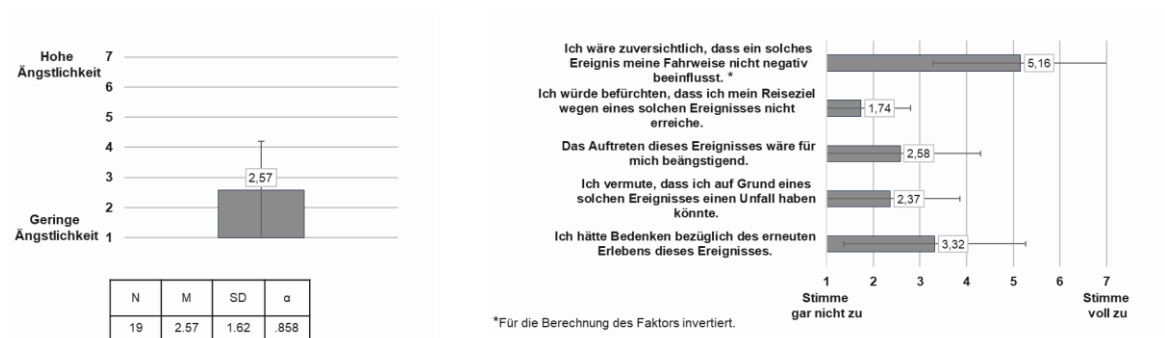
Zur Erhebung des Situationserlebens wurden die beiden Faktoren *Anxiety* und *Perceived Safety* des *Car Technology Acceptance Models* (Osswald et al., 2012) ausgewählt und

angepasst. Erhoben wurden diese Daten von allen Versuchspersonen, die angegeben haben, den Fehler bemerkt zu haben.

Die Ängstlichkeit mit Auftreten des Fehlerereignisses wurde auf einem niedrigen Niveau der 7-stufigen Skala (1 = geringe Ängstlichkeit – 7 = hohe Ängstlichkeit) eingeordnet ( $M = 2,57$ ,  $SD = 1,62$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse für den Faktor *Anxiety* sowie der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 110.

Abbildung 110

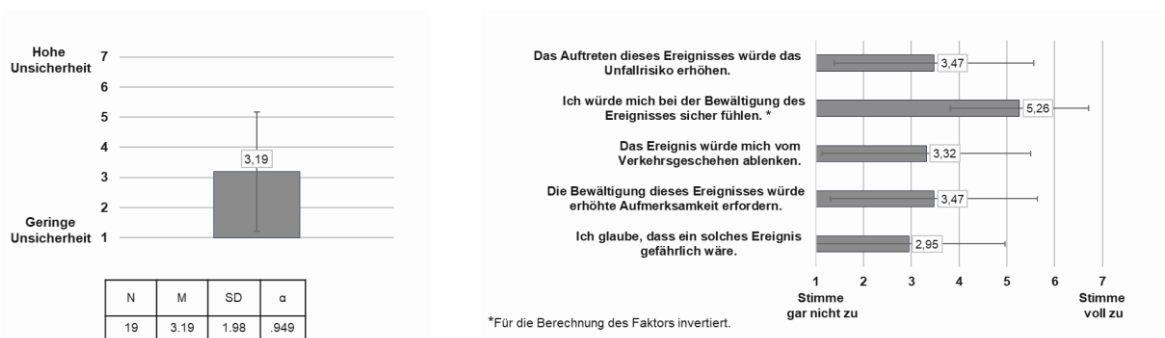
Ergebnisse des Faktors *Anxiety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses Geblockter FBA.



Die wahrgenommene Unsicherheit mit Auftreten des Fehlerereignisses wird auf einem mittleren Niveau der 7-stufigen Antwortskala (1 = geringer Unsicherheit – 7 = hohe Unsicherheit) berichtet ( $M = 3,19$ ,  $SD = 1,98$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* und der Einzelitems siehe Abbildung 111.

Abbildung 111

Ergebnisse des Faktors *Perceived Safety* (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses Geblockter FBA.



### 3.6.2.2.5 Fehlerbild: *RWA Rechteckschwingung*

Nachfolgend werden die objektiven Ergebnisse zur Beschreibung der Fahrzeug- und Fahrerreaktion infolge der Aufschaltung des Fehlerbildes *RWA Rechteckschwingung* im Manöver Geradeausfahrt beschrieben, sowie die Ergebnisse hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung der Fehleraufschaltung.

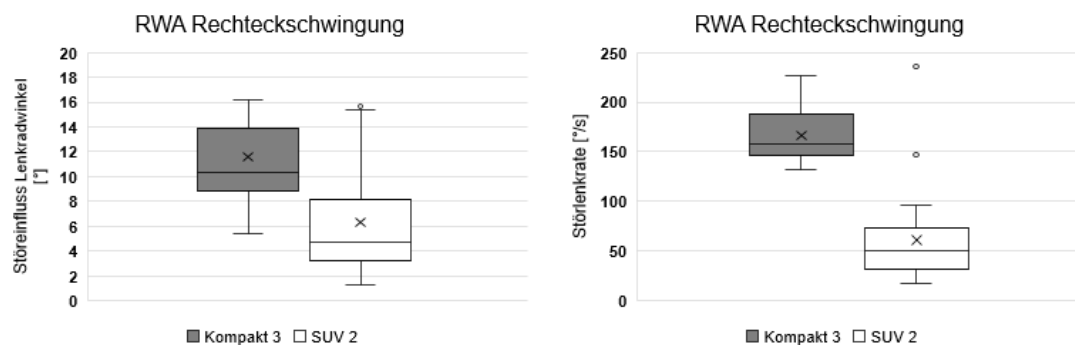
### 3.6.2.2.6 Ergebnisse objektiver Fahrzeugmessdaten

Die statistischen Verteilungen der anhand der aufgezeichneten Fahrzeugmessgrößen ermittelten Objektivkennwerte für das Fehlerbild *RWA Rechteckschwingung* im SUV 2 sind in Abbildung 112 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilungen für den ermittelten Störeinfluss auf den Lenkwinkel, die Störleakrate, die Störquerbeschleunigung sowie die Störgierate. Die deskriptive Statistik der ermittelten Objektivkennwerte für das Fahrzeug bei dem untersuchten Fehlerbild sind zusätzlich in Tabelle 33 zusammengefasst. Für einen qualitativen Vergleich der ermittelten Objektivkennwerte sind in Abbildung 112 ebenfalls die statistischen Auswertungen für das zweite Fahrzeug dargestellt, welches im Rahmen der Gesamtstudie mit dem gleichen Fehlerbild untersucht wurde. Aufgrund von fahrzeug- und systemspezifischen Unterschieden sowie nicht vollständig identischen Fehlerbildern ist ein direkter Vergleich der objektiven Kennwerte allerdings nur eingeschränkt möglich und bedingt aussagekräftig.

Im vorliegenden Fall zeigt der SUV 2 im Vergleich zum Kompakt 3 bezüglich des Fehlerbildes *RWA Rechteckschwingung* geringere Störeinflüsse hinsichtlich der Lenkreaktion des Fahrers. Sowohl der Störeinfluss auf den Lenkwinkel als auch die Störleakrate fallen geringer aus als die Vergleichswerte im Kompakt 3. Auch hinsichtlich der Fahrzeugreaktion ergeben sich geringere Störeinflüsse bezüglich der Querbewegung und der Gierate.

Abbildung 112

*Statistische Auswertung der berechneten Objektivkennwerte Störeinfluss Lenkwinkel, Störleakrate, Störquerbeschleunigung und Störgierate für das Fehlerbild RWA Rechteckschwingung (weiß: SUV 2, grau: Kompakt 3)*



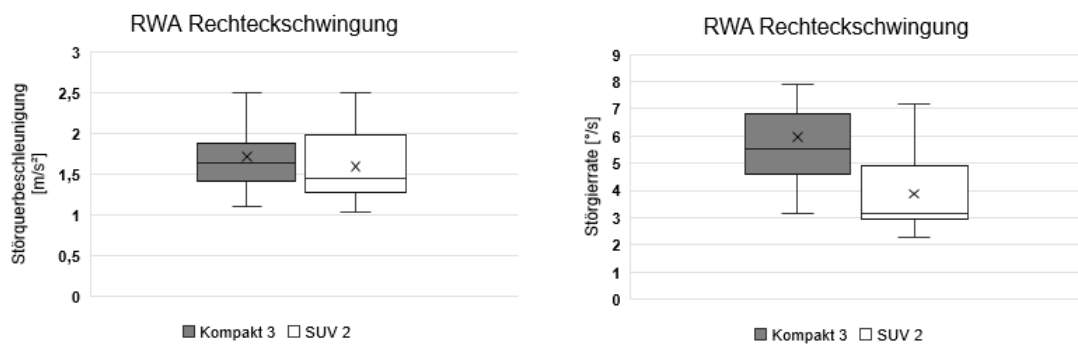


Tabelle 33

Deskriptive Statistikennwerte Fehlerbild RWA Rechteckschwingung (SUV 2)

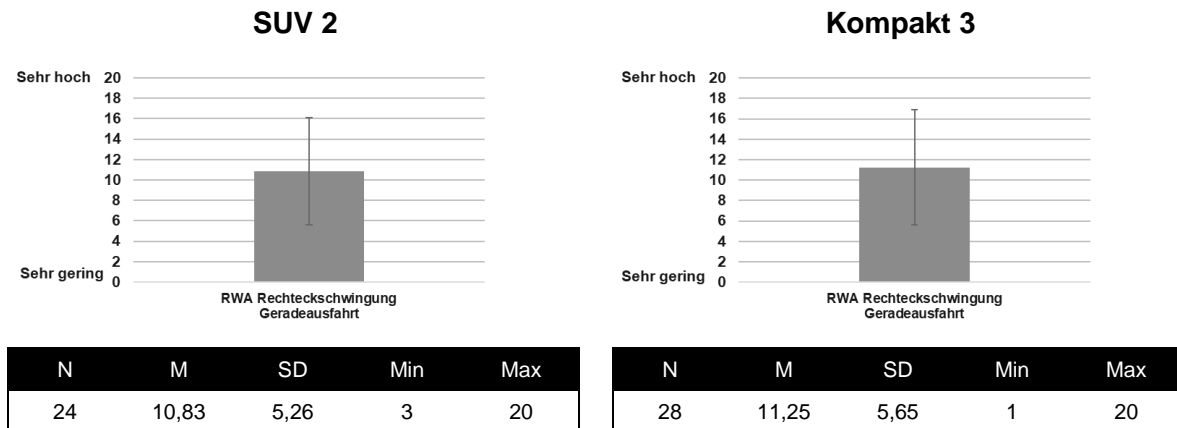
Fahrzeug	Störgröße	N	M	SD	Median	Min.	Max.
SUV 2	Störeinfluss Lenkwinkel [°]	24	6,23	4,10	4,68	1,30	15,68
	Störleakrate [°/s]	24	61,42	46,75	50,59	17,22	236,28
	Störquerbeschleunigung [m/s²]	24	1,60	0,44	1,44	1,04	2,50
	Störgierrate [°/s]	24	3,88	1,44	3,14	2,30	7,17

### 3.6.2.2.7 Ergebnisse subjektiver Messgrößen

In der folgenden Passage wird auf die wahrgenommene Schwierigkeit des Manövers Geradeausfahrt mit Fehleraufschaltung eingegangen, welche in Anlehnung an das Inventar NASA-TLX über drei Fragen bezüglich der mentalen und körperlichen Anforderungen sowie der subjektiven Einschätzung der eigenen Leistung mittels 20-stufiger Antwortskala (1 = sehr gering – 20 = sehr hoch) erhoben wurde. Die Ergebnisse werden gegenübergestellt mit jenen der Teilstudie 4 (für Details siehe 3.4) mit dem Kompakt 3, da auch hier der Fehlertyp *RWA Rechteckschwingung* betrachtet wurde. Eine Erklärung von möglichen Unterschieden zwischen beiden Teilstudien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fehlerparametrierung und Fahrzeug nicht möglich. In die Analyse eingeflossen sind alle validen Datensätze. Die mentalen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers Geradeausfahrt mit Fehleraufschaltung werden in beiden Studien im mittleren Bereich der 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr gering – 20 = sehr hoch) eingeschätzt (SUV 2:  $M = 10,83$ ,  $SD = 5,26$ ; Kompakt 3:  $M = 11,25$ ,  $SD = 5,65$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 113.

Abbildung 113

*Mentale Anforderungen des Manövers Geradeausfahrt mit Aufschaltung des Fehlers RWA Rechteckschwung erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

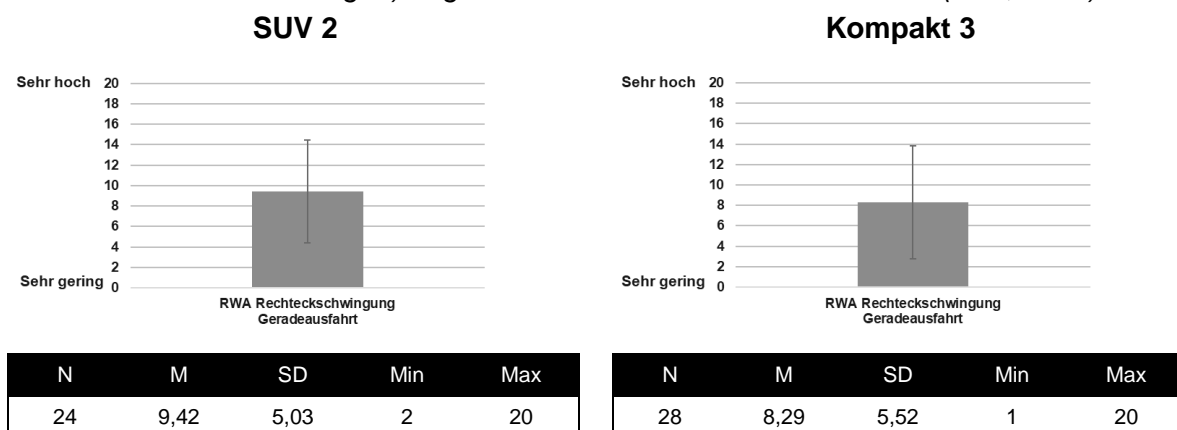


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Auch die körperlichen Anforderungen zur Absolvierung des Manövers mit Aufschaltung des Fehlers werden in beiden Teilstudien im mittleren Bereich der Antwortskala eingeordnet (SUV 2:  $M = 9,42$ ,  $SD = 5,03$ ; Kompakt 3:  $M = 8,29$ ,  $SD = 5,52$ ). Für eine Darstellung siehe Abbildung 114.

Abbildung 114

*Körperliche Anforderungen des Manövers Geradeausfahrt mit Aufschaltung des Fehlers RWA Rechteckschwung erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Anforderungen) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).*

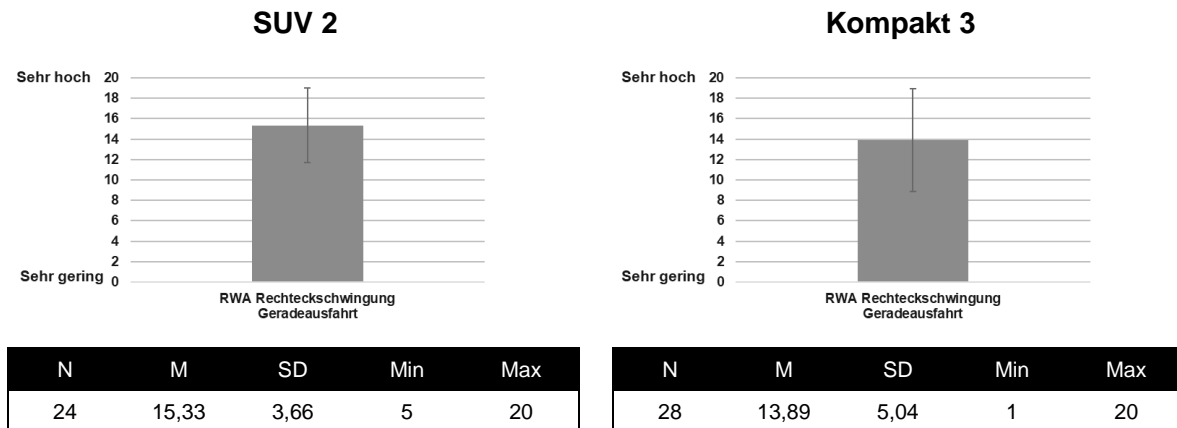


*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die Einschätzung der eigenen Leistung bei der Absolvierung der Geradeausfahrt mit Fehleraufschaltung wird in beiden Teilstudien in einem mittleren bis hohen Bereich der 20-stufigen Antwortskala eingeordnet (SUV 2:  $M = 15,33$ ,  $SD = 3,66$ ; Kompakt 3:  $M = 13,89$ ,  $SD = 5,04$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 115.

Abbildung 115

Subjektive Leistung bei der Absolvierung des Manövers Geradeausfahrt mit Aufschaltung des Fehlers RWA Rechteckschwung erhoben auf einer 20-stufigen Antwortskala (1 = sehr geringe bis 20 = sehr hohe Leistung) angelehnt an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006).

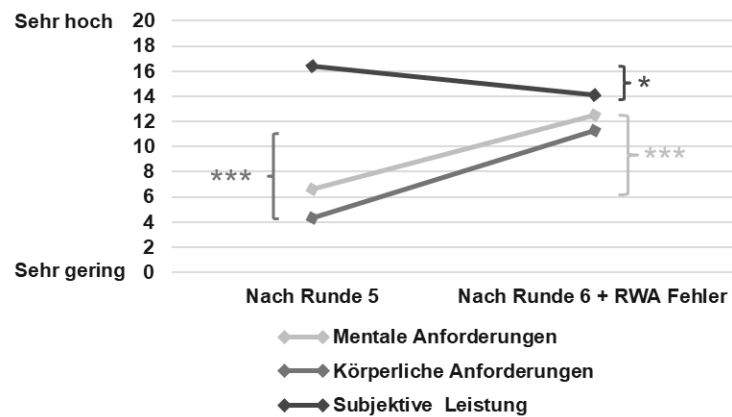


Anmerkung. Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Zur Identifikation des Einflusses des Fehlerereignisses auf die wahrgenommene Schwierigkeit des Manövers Geradeausfahrt, wurden die mentalen und körperlichen Anforderungen, sowie die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung nach Runde 5 ohne Fehleraufschaltung mit jenen nach erfolgter Aufschaltung in Runde 6 verglichen. Die inferenzstatistische Analyse des Vergleichs beider Befragungszeitpunkte erfolgte mittels gepaartem  $t$ -Test. Es zeigte sich, dass mentale und körperliche Anforderungen in der letzten Runde mit Aufschaltung des RWA-Fehlers im Vergleich zur vorherigen Runde ohne Fehleraufschaltung signifikant anstiegen (mentale Anforderungen:  $t(13) = -5,86$ ,  $p < ,001$ ,  $d = -1,57$ ; körperliche Anforderungen:  $t(13) = -8,05$ ,  $p < ,001$ ,  $d = -2,15$ ). Ebenso sinkt die subjektiv empfundene Leistung signifikant ( $t(13) = -2,32$ ,  $p = ,019$ ,  $d = 0,62$ ). Für eine graphische Darstellung des Verlaufs und die zugehörigen Kennwerte siehe Abbildung 116.

Abbildung 116

Subjektiv empfundene Schwierigkeit erhoben mittels drei an das Instrument NASA-TLX (Hart, 2006) angelehnte Items bezogen auf die mentalen und körperlichen Anforderungen sowie die subjektiv wahrgenommene Leistung im Manöver Geradeausfahrt in Runde 5 ohne Fehleraufschaltung im Vergleich zu Runde 6 nach erfolgter Aufschaltung des Fehlers RWA Rechteckschwingung. (Signifikanzniveaus: \* = 5% Niveau, \*\* = 1% Niveau, \*\*\* = 0,1% Niveau)



Konstrukt	Messzeitpunkt	N	M	SD	Min	Max
Mentale Anforderungen	Nach Runde 5	14	6,64	4,18	1	15
	Nach Runde 6 + Fehler	14	12,50	4,65	4	20
Körperliche Anforderungen	Nach Runde 5	14	4,36	2,98	1	10
	Nach Runde 6 + Fehler	14	11,29	4,25	6	20
Subjektive Leistung	Nach Runde 5	14	16,43	2,82	10	20
	Nach Runde 6 + Fehler	14	14,14	3,74	5	18

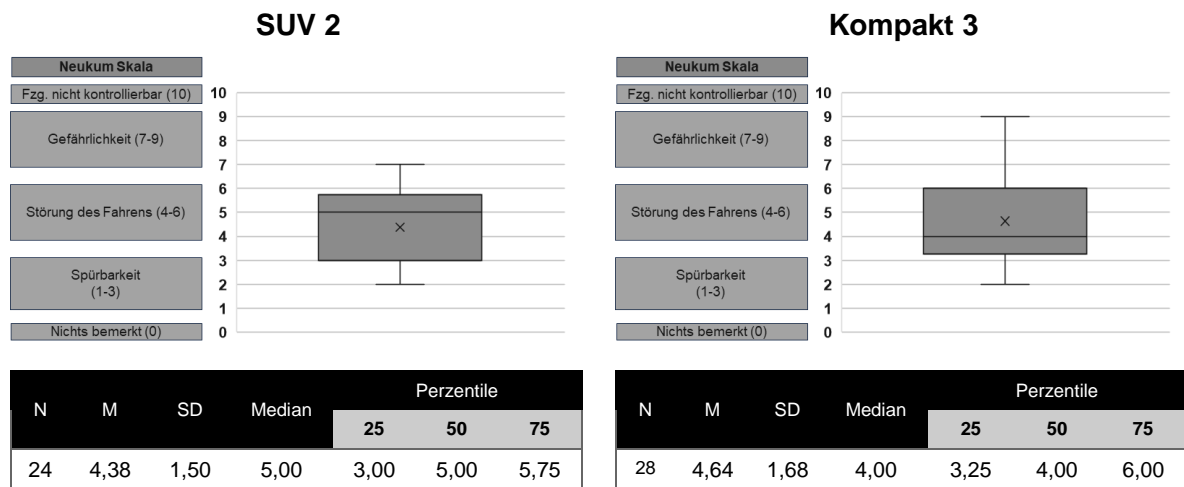
Die Beobachtung der Versuchspersonen zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung ergab, dass 37,50% ( $n = 9$ ) eine beobachtbare Reaktion, am häufigsten in Form einer verbalen Äußerung ( $n = 5$ ), zeigten. Auf Nachfrage gaben 100% der Versuchspersonen an, das Ereignis bemerkt zu haben. Mehrheitlich wurde dieses beschrieben als Ausbrechen des Fahrzeuges / Eingriff in die Lenkung ( $n = 21$ ), wesentlich seltener, obgleich am zweithäufigsten, wurde ein Ruckeln erwähnt ( $n = 4$ ). Zur Erfassung der affektiven Reaktion auf das Ereignis wurden die Versuchspersonen gebeten, ihre Gefühle bei bemerken des Ereignisses zu beschreiben. Die häufigste Nennung lautete hier Überraschung / Erschrecken ( $n = 9$ ), gefolgt von Aufregung / Anspannung als zweithäufigste Nennung ( $n = 4$ ). Auf kognitiver Ebene berichteten die Versuchspersonen, sich mit der Ursache des Ereignisses („Was war das?“) auseinanderzusetzen ( $n = 8$ ), oder sich gedankliche Fahrhinweise zu geben („Lenkrad nicht verreißen“) ( $n = 6$ ). Bezogen auf die behaviorale Reaktion wurde am häufigsten von

Gegenlenken / Korrigieren berichtet ( $n = 15$ ) sowie davon, das Lenkrad fester gehalten zu haben ( $n = 6$ ). Sollte sich das Ereignis wiederholen, würden sich 75% der Versuchspersonen ( $n = 18$ ) wieder genauso verhalten.

Zur Bewertung der subjektiv empfundenen Kritikalität wurde die Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003) herangezogen. Die Ergebnisse werden im Folgenden in Gegenüberstellung mit jenen der Teilstudie 4 (für Details siehe 3.4) mit dem Versuchsfahrzeug Kompakt 3 berichtet, da hier der gleiche Fehlertyp Berücksichtigung fand. Für die Analyse wurden alle validen Datensätze berücksichtigt. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass Unterschiede zwischen den Teilstudien lediglich dargestellt, jedoch nicht erklärt werden können. Grund hierfür ist die gleichzeitige Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung. In beiden Teilstudien wurde die Kritikalität auf der 11-stufigen Skala (0 = nichts bemerkt – 10 = Fahrzeug nicht kontrollierbar) auf einem unteren bis mittleren Niveau der Kategorie Störung des Fahrens eingordnet (SUV 2:  $M = 4,38$ ,  $SD = 1,50$ ; Kompakt 3:  $M = 4,64$ ,  $SD = 1,68$ ;). Für eine Darstellung beider Verteilungen siehe Abbildung 117.

Abbildung 117

*Subjektiv empfundene Kritikalität des Fehlertypen RWA Rechteckschwingung in den beiden Teilstudien mit den Versuchsfahrzeugen SUV 2 und Kompakt 3 erhoben mittels Neukum Skala (Neukum & Krüger, 2003).*



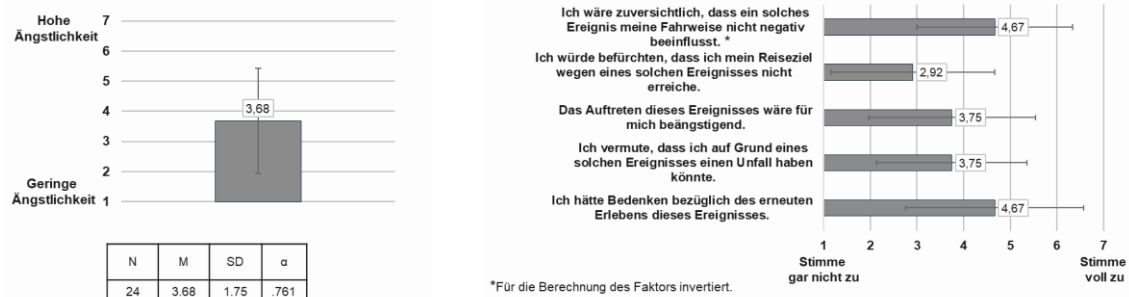
*Anmerkung.* Ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien ist aufgrund der gleichzeitigen Variation von Fahrzeug und Fehlerparametrierung nur eingeschränkt möglich.

Die Ängstlichkeit bei Bemerkten des Ereignisses wurde auf einem mittleren Niveau der 7-stufigen Antwortskala (1 = geringe Ängstlichkeit – 7 = hohe Ängstlichkeit) berichtet ( $M = 3,68$ ,  $SD = 1,75$ ). Für eine Darstellung des Faktors sowie der zur Berechnung hinzugezogenen Einzelitems siehe Abbildung 118.



Abbildung 118

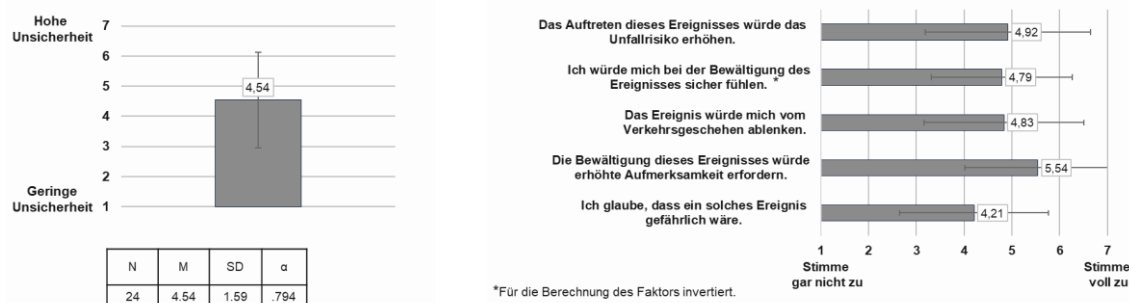
Ergebnisse des Faktors Anxiety (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses RWA Rechteckschwingung.



Die wahrgenommene Unsicherheit mit Bemerkten des Fehlers wurde in einem mittleren Bereich der 7-stufigen Skala (1 = geringe Unsicherheit – 7 = hohe Unsicherheit) eingeordnet ( $M = 4,54$ ,  $SD = 1,59$ ). Für eine Darstellung des Faktors sowie die der Berechnung zugrundeliegenden Einzelitems siehe Abbildung 119.

Abbildung 119

Ergebnisse des Faktors Perceived Safety (links) und der zugrundeliegenden Einzelitems (rechts) in Anlehnung an das Car Technology Acceptance Model (Osswald et al., 2012) und bezogen auf die Aufschaltung des Fehlerereignisses RWA Rechteckschwingung.



### 3.6.2.3 Nachbefragung

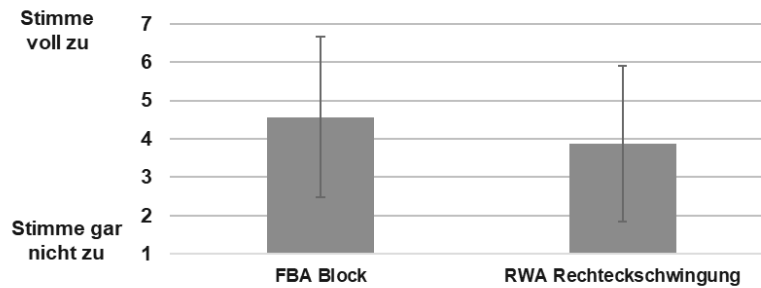
Im Nachgang an die Aufklärung der Versuchspersonen hinsichtlich des Studiengegenstands, erfolgte eine Nachbefragung. Die Fragen wurden von den Versuchspersonen lediglich beantwortet, sofern sie den jeweiligen Fehler im Rahmen der Versuchsdurchführung auch bemerkt hatten. Zunächst wurden die Versuchspersonen um eine Einschätzung gebeten, ob sie ein Fahrzeug nutzen würden, in welchem der erlebte Fehler auftreten könnte (Antwortskala: 1 = stimme gar nicht zu – 7 = stimme voll zu). Die Versuchspersonen, welche den Fehler Geblockter FBA bemerkt hatten ( $n = 18$ ), stimmten weder eindeutig zu noch lehnten sie die Nutzung eindeutig ab ( $M = 4,56$ ,  $SD = 2,09$ ). Für den Fehler RWA Rechteckschwingung lag die Nutzungsintention auf einem etwas geringeren, jedoch ebenfalls neutralen, Niveau

( $M = 3,87$ ,  $SD = 2,03$ ). Dieser Fehler wurde von allen Versuchspersonen bemerkt. Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 120.

Abbildung 120

*Nutzungsintention hinsichtlich eines Fahrzeuges, welches den erlebten Fehler Geblockter FBA oder RWA Rechteckschwung aufweisen könnte, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.*

Item: Ich würde ein Fahrzeug nutzen, bei dem dieser Fehler auftreten könnte.



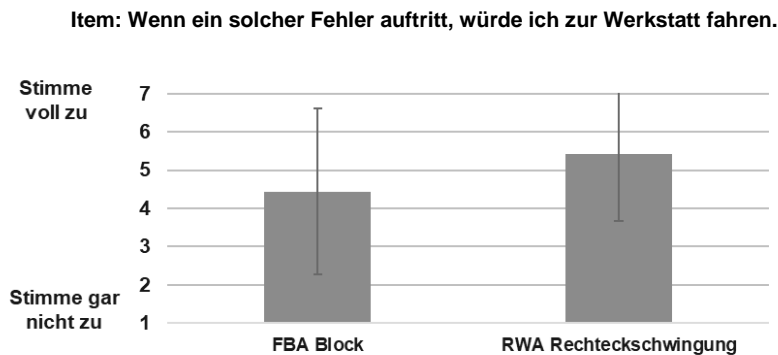
Fehler	N	M	SD	Min	Max
FBA Block	18	4,56	2,09	1	7
RWA Rechteckschwung	23	3,87	2,03	1	7

*Anmerkung.* Die Beantwortung des Items erfolgte lediglich durch Versuchspersonen, die den jeweiligen Fehler im Versuchsdurchlauf bemerkt haben.

Anschließend wurden die Versuchspersonen gebeten anzugeben wie sehr sie der Aussage zustimmen würden bei Bemerkten des jeweiligen Fehlers eine Werkstatt aufzusuchen (7-stufige Antwortskala: 1 = stimme gar nicht zu – 7 = stimme voll zu). Die Personen, die den FBA-Fehler bemerkt haben ( $n = 18$ ), stimmten weder eindeutig zu noch lehnten sie die Aussage ab ( $M = 4,44$ ,  $SD = 2,18$ ). Hinsichtlich der RWA Rechteckschwung, welche von allen Versuchspersonen bemerkt wurde, wurde der Aussage durchschnittlich eher zugestimmt ( $M = 5,43$ ,  $SD = 1,75$ ). Für eine Darstellung der Ergebnisse siehe Abbildung 121.

Abbildung 121

*Absicht eine Werkstatt aufzusuchen bei Auftreten der erlebten Fehler Geblockter FBA oder RWA Rechteckschwingung im eigenen Fahrzeug, erhoben mittels 7-stufiger Likert-Skala.*



Fehler	N	M	SD	Min	Max
FBA Block	18	4,44	2,18	2	7
RWA Rechteckschwingung	23	5,43	1,75	2	7

*Anmerkung.* Die Beantwortung des Items erfolgte lediglich durch Versuchspersonen, die den jeweiligen Fehler im Versuchsdurchlauf bemerkt haben.

### 3.6.3 Zusammenfassung Studie 6

Im Folgenden wird eine Übersicht hinsichtlich der Hauptergebnisse der durchgeführten Teilstudie 6 (Fahrzeug: SUV 2; Fehler: *Geblockter FBA / RWA Rechteckschwingung*) gegeben.

- Die Gestaltung des Parcours erscheint angemessen, die Versuchspersonen werden weder unter- noch überfordert.
- Es wird eine Lernkurve der Versuchspersonen über den Verlauf der Testung deutlich.
- Für den Fehler *Geblockter FBA* konnte die aufgestellte Forschungshypothese beibehalten werden. Für den Fehler *RWA Rechteckschwingung* muss die Hypothese verworfen werden, da es im Fall von  $n = 1$  zu einem Spurverlassen nach Fehleraufschaltung gekommen ist.
- Der Fehler *Geblockter FBA*
  - wurde von 77% der Versuchspersonen bemerkt;
  - bewirkt keinen signifikanten Anstieg der empfunden mentalen und körperlichen Anforderungen sowie keine signifikante Verschlechterung der subjektiv empfundenen Leistung im betreffenden Fahrmanöver;
  - provoziert keine spezifische affektive oder behaviorale Reaktion bei den Versuchspersonen;

- wird bezüglich der Kritikalität auf einem mittleren Niveau der „Spürbarkeit“ eingeordnet.
- Der Fehler *RWA Rechteckschwingung*
  - wurde von allen Versuchspersonen bemerkt;
  - steht in Verbindung mit einem signifikanten Anstieg der empfundenen mentalen und körperlichen Anforderungen, die empfundene eigene Leistung fällt darüber hinaus mit Fehleraufschaltung signifikant ab;
  - wird auf affektiver Ebene mehrheitlich mit Erschrecken und Überraschung assoziiert;
  - provoziert bei einem Großteil der Versuchspersonen eine behaviorale Reaktion (Gegenlenken/ Korrektur), ein Viertel der Versuchspersonen berichten, dass sie bei erneutem Erleben des Fehlers mit einer Geschwindigkeitsreduktion reagieren würden;
  - wird bezüglich der Kritikalität auf einem mittleren Niveau der Kategorie „Störung des Fahrens“ eingeordnet, dabei reicht die Spannweite von einer mittleren Ausprägung der „Spürbarkeit“ bis zu einer niedrigen Ausprägung der Kategorie „Gefährlichkeit“.

Die inhaltliche Diskussion der Ergebnisse der Teilstudien erfolgt übergeordnet für die gesamte Versuchsreihe in Abschnitt 4.

## 4 Diskussion

Die Durchführung der sechs einzelnen Studien hatte zum Ziel, die Einschätzung der Kontrollierbarkeit verschiedener Fehlerbilder in einem Steer-by-Wire Lenksystem durch Experten im Rahmen einer Probandenstudie auf der Teststrecke und im Kontext der dort darstellbaren Fahrgeschwindigkeiten zu überprüfen. Hierbei stand die Hypothese im Vordergrund, dass ein durch Experten festgelegtes C0-Level hinsichtlich einer Fehlerausprägung bei Normalfahrenden in vordefinierten Manövern nicht zu einem Verlassen eines durch die Experten vorgegebenen Fahrkorridors innerhalb eines definierten Zeitabschnitts ab Fehleraufschaltung führt. Wie in den Ergebnisberichten der Einzelstudien dargestellt, wurde die Überprüfung dieser Hypothese in insgesamt zwölf Fällen (für beide Fehler aller sechs Einzelstudien) vorgenommen. Abbildung 122 zeigt eine Übersicht über alle zwölf Fehler-Fahrzeugkombinationen.

Abbildung 122

*Übersicht über die Hypothesenprüfung*

FBA Selfsteer & Loss of Feedback	FBA Sprung	Geblockter FBA	Geblockter RWA	Ungeregelter RWA	RWA Rechtecksinus
SUV 1 ✓	Kompakt 2 ✓	Kompakt 3 ✓	SUV 1 ✓	Kompakt 2 ✓	Kompakt 3 ✓
Kompakt 1 ✓	Limousine ✗ <i>n = 1 Spurverlassen</i>	SUV 2 ✓	Kompakt 1 ✗ <i>n &lt; 20</i>	Limousine ✓	SUV 2 ✗ <i>n = 1 Spurverlassen</i>

In neun von zwölf Fällen konnte die Hypothese basierend auf den Studienergebnissen beibehalten werden (grün markiert). Im Fall der Testung des Fehlers *Geblockter RWA* im Fahrzeug Kompakt 1 (grau markiert) konnte die Überprüfung nicht durchgeführt werden, da die Mindestanzahl von 20 validen Datensätzen nicht in der Auswertung zur Verfügung stand. In den verbliebenen und analysierten  $n = 15$  validen Datensätzen ist kein Spurverlassen bei einer Versuchsperson aufgetreten. Sowohl beim *FBA Sprung* im Fahrzeug Limousine als auch beim *RWA Rechteckschwingung* im Fahrzeug SUV 2 (rot markiert) kam es zu einem Fall des Spurverlassens in Folge der Fehleraufschaltung durch jeweils eine Versuchsperson, sodass die Hypothese für diese beiden Fehler-Fahrzeugkombinationen abgelehnt werden musste.

Neben dem objektiven Kriterium für die Kontrollierbarkeit geben die erhobenen Fahrzeugmessgrößen und die Fragebogendaten weiteren Aufschluss über die initiale Fahrer- sowie Fahrzeugreaktion auf die verschiedenen Fehlerereignisse, sowohl auf objektiv messbarer als auch auf subjektiv empfundener Ebene. Hier zeigte sich, dass

- Fahrende in der Lage sind, zwischen verschiedenen Fehlerereignissen zu diskriminieren;
- diese Fehlerereignisse unterschiedlich kritisch bewertet werden;
- die objektiv messbaren Fahrer- und Fahrzeugreaktionen pro Fehler-Fahrzeugkombination ein ähnliches Verhalten aufweisen;

- manche Fehlerereignisse trotz objektiv nachweisbarer Ausprägung von einem Großteil der Fahrenden nicht wahrgenommen werden;
- einzelne Versuchspersonen Fehler auch als sehr kritisch wahrnehmen, der Mittelwert der Stichprobe je nach Fehlerbild aber im niedrigen bis mittleren Bereich der subjektiven Kritikalität liegt;
- Versuchspersonen subjektiv von einem Gefühl des Erschreckens bzw. der Überraschung in Reaktion auf manche Fehler berichten.

Die Ergebnisse der Studie sind immer vor dem Hintergrund der verwendeten Methode zu verstehen, zu interpretieren und zu diskutieren. Im Folgenden werden die für die Studienreihe getroffenen, einflussreichsten Entscheidungen und Annahmen diskutiert.

Aus methodischer Sicht lässt sich hier zunächst die Anzahl an Fehleraufschaltungen pro Versuchsperson anführen (siehe Abschnitt 2.1). Die Studiendurchführungen zeigen, dass auch für zukünftige Versuche eine Berücksichtigung von mehr als zwei unterschiedlichen Fehlerbildern pro Versuchsperson nicht empfehlenswert ist. Für die Untersuchung der Kontrollierbarkeit ist im Besonderen die Provokation und Erfassung der initialen Reaktion der Versuchspersonen entscheidend, welche aber mit zunehmender Anzahl an Fehleraufschaltungen durch einen Erwartungseffekt beeinflusst wird. Versuchspersonen wissen, dass ihr Verhalten beobachtet wird und entwickeln so eine gewisse Erwartungshaltung hinsichtlich etwaiger besonderer Ereignisse, die im täglichen Straßenverkehr eher nicht erwartet werden.

Hinzu kommt, dass sich Versuchspersonen im Rahmen einer Studiendurchführung auf einem Testgelände erfahrungsgemäß sehr aufmerksam verhalten. Dieses Phänomen ist in der psychologischen Literatur und dem Begriff „Reaktivitätsproblem“ hinlänglich bekannt und beschrieben. Bei der Erstellung des Versuchsdesigns wurde das Reaktivitätsproblem mit Blick auf die Möglichkeit der Präsentation von mehreren Fehleraufschaltsituationen diskutiert. So könnte die erhöhte Vigilanz der Versuchspersonen bereits einer zweiten Fehleraufschaltung im Sinne einer erhöhten Detektions-wahrscheinlichkeit entgegenstehen. In der vorliegenden Studie wurden dementsprechend drei methodische Gegenmaßnahmen installiert, die jedoch das Reaktivitätsproblem nicht vollständig auflösen können. Zum einen wurden Ort und Zeitpunkt der Aufschaltungen systematisch variiert und durch die Zusammenführung der drei Manöver zu einem Gesamtparcours für die Versuchspersonen nicht vorhersehbar. Weiter wurde eine Coverstory dargeboten, die die Aufmerksamkeit auf einen nicht studienassoziierten Fokus lenken sollte. Zum anderen wurden sogenannte Distraktorfahrten durchgeführt, in denen keine Fehleraufschaltung vorgenommen, die Befragung jedoch konstant gehalten wurde. Somit konnte die Fehleraufschaltung bestmöglich maskiert werden. Eine erhöhte Vigilanz und damit Reaktionsfähigkeit der Versuchspersonen ist aufgrund des Fahrens auf einem Testgelände dennoch gegeben.

Des Weiteren ist zu reflektieren, dass die Kontrollierbarkeit ausschließlich über objektiv messbare Kriterien abgebildet wird (siehe Abschnitt 2.4.1). Das Bestreben, die Kontrollierbarkeit einer Fehlersituation durch Normalfahrende zusätzlich über subjektive

Kriterien abzubilden, wurde in dieser Studie aus den folgenden Gründen nicht weiterverfolgt. Ausschlaggebend für diese Entscheidung war, dass die subjektive Wahrnehmung einer Situation unabhängig davon ist, ob Fahrende die Situation objektiv betrachtet beherrscht haben oder nicht. Naturgemäß unterliegen Subjektivurteile breiterer inter- sowie intraindividuelle Variabilität, da sie nebst anderem von Störgrößen wie Vorerfahrung, Tagesform, Stimmung etc. beeinflusst werden. Zwar sind die vorgenannten Faktoren ebenfalls nachweisliche Einflussgrößen auf die Fahrperformanz von Fahrenden (vgl. Precht et al., 2017). Einem ähnlichen Einfluss auf das Objektivmaß der Kontrollierbarkeit wurde jedoch durch die Kontrolle der in Abschnitt 2.6 benannten Stichprobencharakteristik und den durchgeführten Eingewöhnungsrunden entgegengewirkt. Somit stellt die objektive Messung der Kontrollierbarkeit ein im höheren Maße reliables Maß der Beherrschbarkeit dar. Diese Annahme bestätigte sich bei der post-hoc durchgeführten Analyse des statistischen Zusammenhangs zwischen den objektiven Fahrzeugmessgrößen nach Fehleraufschaltung sowie der angegebenen Subjektivurteile auf der Neukum-Skala (Neukum & Krüger, 2003). Im Zuge dessen ließen sich nur einzelne signifikante Zusammenhänge zeigen. Der deskriptive Vergleich weist darüber hinaus sowohl Fälle auf, bei denen eine vergleichsweise geringe Fehlerreaktion des Fahrzeugs sehr kritisch bewertet wurde, während bei anderen eine sehr stark ausgeprägte Fahrdynamik als Konsequenz der Fehleraufschaltung als unkritisch bewertet wurde. In den hier deskriptiv zitierten Fällen wurde der Fehler objektiv betrachtet jedoch beherrscht. Dies zeigt zum einen, dass die Wahl eines objektiven Kriteriums für die Messung der Beherrschbarkeit geeignet erscheint, macht zum anderen aber auch den zusätzlichen Wert subjektiver Messmethoden deutlich. Somit wurden 3,5 % ( $n = 10$  Bewertungen) der gesamten Anzahl valider Fehleraufschaltungen ( $n = 279$ ) mit dem Attribut „gefährlich“ bewertet (Skalenwerte 7, 8 und 9; Neukum-Skala). Die Ergebnislage zeigt, dass der objektiven Kontrollierbarkeit grundsätzlich eine hohe empfundene Kritikalität der Fahrenden entgegenstehen kann. Im Zuge der Systementwicklung und -auslegung sollte mit Blick auf die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlerfalles bei einer entsprechenden Marktdurchdringung diesem Aspekt zusätzlich Rechnung getragen werden, da von einem negativen Zusammenhang der Konstrukte empfundene Kritikalität und Akzeptanz auszugehen ist (Numan, 1998; Chavillaz et. al., 2016).

Mit Blick auf die Interpretation der Studienergebnisse stellt die Definition der Operationalisierung der beobachtbaren Kontrollierbarkeit einer Fahrsituation einen der wichtigsten Aspekte dar. In der vorliegenden Studie wurde eine kritische Situation durch ein Spurverlassen definiert, was durch das Berühren oder Überfahren der die Gasse markierenden Pylonen operationalisiert wurde. Anders als das alternative Maß der absoluten fehlerinduzierten Spurabweichung bezieht das gewählte Kriterium den Ausgangsversatz in der Pylonengasse nicht ein. In der Folge kann ein vergleichsweise geringer Spurversatz bei einer Versuchsperson, die trotz der Instruktion, die Gasse mittig zu durchfahren, weiter außen zu einer Seite orientiert war, eher zu einem Pylonenkontakt führen, als ein größerer Spurversatz bei einer mittig fahrenden Versuchsperson. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die objektiven Fahrzeugmessgrößen im Vergleich aller Versuchspersonen, wie in den Abschnitten 3.5.2.2.1.1 und 3.6.2.2.1.1 beschrieben, zeigt sich keine auffällig schlechtere Fahrerreaktion

auf die Fehleraufschaltung bei denjenigen Versuchspersonen, die die Fahrspur verlassen haben. Die Nutzung einer Pylonengasse wurde durch die Experten begründet gewählt und als Randbedingung für die Probandenstudie gesetzt. Kern der Begründung ist zum einen die nachvollziehbare Konsistenz zum methodologischen Vorgehen der Expertentests der OEMs, wenngleich dort explizit höhere Dynamiken anliegen. Zum anderen musste ein Testverfahren herangezogen werden, dass für alle Fahrzeuge aus den verschiedenen Häusern mit unterschiedlichen messtechnischen Voraussetzungen anwendbar ist. Darüber hinaus weist das Verfahren eine Passung zur Realität der Alltagsfahrenden und deren üblicher Fahrweise auf. Es ist davon auszugehen, dass bei Versuchspersonen, die im Versuch auf der Teststrecke eine zu einer Seite orientierte Fahrweise zeigen, diese auch im alltäglichen Straßenverkehr entsprechend aufweisen. Somit könnte auch hier ein vergleichsweise geringer Spurversatz für einzelne Fahrende bereits eine kritische Situation hervorrufen. Dies verdeutlicht, dass der tatsächliche, absolute Spurversatz kein einschränkungsfreies Maß für die Kritikalität einer Fahrsituation darstellt, da dieser immer in Relation zur gegebenen Fahrsituation steht.

Ein darauf aufbauender, methodisch zu diskutierender Punkt besteht in der Thematik der gewählten Manöver sowie der Deckelung der maximalen Geschwindigkeit auf 80 km/h. Die im Expertengremium ausgewählten Manöver sowie die dort abgestimmten und im Vergleich zu Expertenversuchen reduzierten Geschwindigkeiten hatten zum Ziel, eine den Fahrfertigkeiten von Normalfahrenden angemessene Fahraufgabe zu entwerfen, die eine spürbare Auswirkung der Fehleraufschaltung ermöglicht (siehe Abschnitt 2.3). Unter diesem Gesichtspunkt sind die Studienergebnisse vor dem Hintergrund des gewählten Geschwindigkeitsbereichs zu bewerten und nicht unmittelbar auf höhere Geschwindigkeiten extrapolierbar, da sich die Dynamik und das entsprechende Lenkverhalten mit zunehmenden Geschwindigkeiten nicht linear zueinander verhalten. In diesem Kontext ist zu berücksichtigen, dass höhere Richtgeschwindigkeiten im Realverkehr in der Regel mit, im Vergleich zur Probandenstudie, breiteren Regelquerschnitten einhergehen. Vor dem Hintergrund, dass höhere Geschwindigkeiten grundsätzlich auch bei Normalfahrenden auftreten können, wäre für entsprechend gelagerte Versuchspersonenstudien eine sichere, standardisierte Testumgebung notwendig, die nicht zu Lasten der Dynamik gehen sollte. So könnte eine Studie in einem dynamischen Fahrsimulator mit entsprechend elaborierten Manövern hier einen weiteren sinnvollen Baustein zur Bewertung der Kontrollierbarkeit von Fehlerfällen durch Normalfahrende in einer sicheren Studienumgebung darstellen.

Für eine Probandenstudie mit Normalfahrenden auf der Teststrecke zeigte sich der Parcours in der Studiendurchführung jedoch als geeignet sowie die vorgenommene Reduzierung der Geschwindigkeiten als notwendig. Der gewählte Parcours, bestehend aus den drei Manövern Geradeausfahrt, Kreisfahrt und Slalom, stellte für die Versuchspersonen weder eine Unterforderung noch eine Überforderung dar. Zudem zeigte sich eine Lernkurve in der Fahrperformanz mit steigender Anzahl an Wiederholungen der Durchfahrten. Um den Einfluss dieses Lernprozesses auf die Ergebnisse zu minimieren, empfiehlt sich das angewandte Vorgehen der Durchführung von mindestens zwei Eingewöhnungsrunden vor Start der eigentlichen experimentellen Testung als notwendige Voraussetzung. Unter den drei Manövern zeigte sich der Slalom erwartungsgemäß als anforderungsreichstes Manöver. Wie



in Abschnitt 2.7 beschrieben, war es dem Großteil der Versuchspersonen nicht möglich, die Richtgeschwindigkeit von 60 km/h über die gesamte Länge des Manövers aufrechtzuerhalten. Zudem wurden im Vergleich im Slalom mehr Pylonen ohne Einfluss von Fehleraufschaltung berührt oder überfahren. Eine Möglichkeit zur Reduktion des potentiellen Einflusses fehlerunabhängiger Pylonenkontakte auf die Studienergebnisse stellt die weitere Reduzierung der Richtgeschwindigkeit für das Slalommanöver oder eine Erweiterung der Gassenbreite in nachfolgenden Studien dar. Allerdings ist dabei zu beachten, dass sowohl die Änderung der Dynamik als auch die Entschärfung der geforderten Fahraufgabe einen Einfluss auf die erlebte Kritikalität eines Fehlers haben kann. Nach Durchführung der Testung erscheint die grundlegende Entscheidung für die Wahl des Slaloms als Testmanöver für die Fehler, die einen wechselnden Lenkeinschlag erfordern, als gerechtfertigt. Das Manöver zeigte sich als grundsätzlich absolvierbar für Normalfahrende und scheint für den Versuch geeigneter als die im Vorfeld der Testung diskutierte und erprobte Alternative eines dynamisch gefahrenen doppelten Spurwechsels.

Einhergehend mit dem Punkt der Auswahl der verschiedenen Manöver ist auch das gewählte Vorgehen zum Ausschluss von Versuchspersonen aufgrund mangelnder Fahrperformanz zu diskutieren. Ziel des gewählten Vorgehens war es, ein objektives und auf alle Studien anwendbares Kriterium zu definieren, welches diejenigen Versuchspersonen von der Auswertung ausschließt, die sich im Vergleich zu ihrer restlichen Stichprobe als auffällig hinsichtlich der Anzahl ihrer Pylonenberührungen unabhängig von einer Fehleraufschaltung zeigten. Es ist beispielsweise denkbar, dass einer solchen Auffälligkeit zugrunde liegt, dass eine Person, die im Alltag einen Kleinwagen fährt, Probleme mit der Einschätzung der Abmessungen eines deutlich größeren Versuchsfahrzeugs hat und demzufolge auch ohne Fehleraufschaltung einzelne Pylonen berührt oder überfährt. Deshalb wurde der Mittelwert der nicht fehlerfrei absolvierten Manöver pro Stichprobe berechnet und alle Versuchspersonen ausgeschlossen, die mehr als zwei Standardabweichungen über ihrem jeweiligen Stichprobenmittelwert lagen. In der Folge variierte die Anzahl der „zulässigen“ Pylonenberührungen zwar pro Fehler-Fahrzeug Kombination, das Kriterium war jedoch über alle Studienteile hinweg einheitlich definiert und ist auch auf zukünftige Studien objektiv anwendbar.

Der Grund für die Notwendigkeit eines solchen Kriteriums liegt dabei in der Minimierung möglicher Störeinflüsse auf das Kriterium des Spurverlassens als Maß für die Kontrollierbarkeit einer Fahrsituation. Bei der Absolvierung eines Manövers mit Fehleraufschaltung kann ein Berühren der begrenzenden Pylonen grundsätzlich verschiedene Ursachen haben. Zum einen kann eine Berührung durch die Auswirkungen des Fehlerbildes zustande kommen. Zum anderen gibt es eine Zufallskomponente, beispielsweise durch kurzzeitige Ablenkung oder Nachlässigkeit der Fahrenden. Abseits davon kann jedoch auch eine unzureichende fahrerische Kompetenz zu einer Pylonenberührung führen (geringe Erfahrung, fehlerhafte Einschätzung der Fahrzeugdimensionen etc.). Gegenstand der Bewertung der experimentellen Messung soll dabei jedoch nur der erste Faktor, die Auswirkungen der Fehleraufschaltung, sein. Um die Wahrscheinlichkeit der Störeinflüsse als Ursache möglicher Pylonenberührungen zu minimieren, wurde, neben der gezielten Definition bestimmter

Stichprobencharakteristiken (siehe Abschnitt 2.6), das erwähnte Ausschlussverfahren gewählt. So konnten diejenigen Personen ausgeschlossen werden, die durch Spurverlassen, unabhängig von den Fehleraufschaltungen, eine im Vergleich zur Reststichprobe erhöhte Wahrscheinlichkeit für Störeinflüsse auf die Kontrollierbarkeitsmessung vermuten lassen.

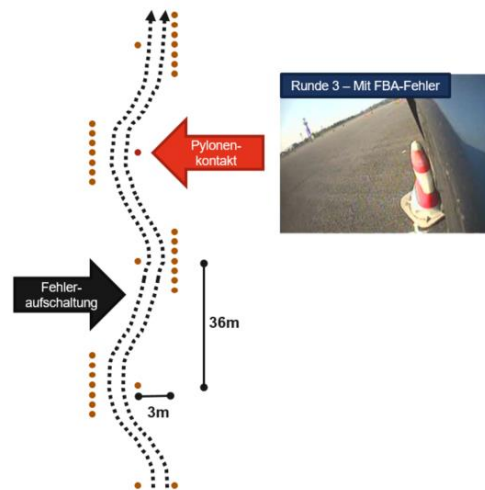
Ein alternatives (oder auch komplementäres) Vorgehen könnte an dieser Stelle ein expertenbasierter Ausschluss (oder erneuter Einschluss) sein, bei dem beispielsweise die mitfahrende Versuchsleitung das Fahrvermögen der Versuchspersonen über den gesamten Fahrversuch hinweg auf Basis ihrer Expertise bewertet, um eine praxisnahe, von der Statistik unabhängige Beurteilung zu erwirken. Nachteilig könnten sich bei einem solchen Vorgehen jedoch die Einbußen zu Lasten der Auswertungsobjektivität auswirken.

Wie oben zusammengefasst, kam es bei zwei Fehler-Fahrzeugkombinationen jeweils zu einem Spurverlassen im Zusammenhang mit der Fehleraufschaltung. Diese werden im Lichte der erläuterten methodischen Annahmen der Probandenstudie im Folgenden beschrieben und diskutiert.

Betrachtet man den Fall des Spurverlassens im Fahrzeug **Limousine** unter Einfluss des Fehlers **FBA Sprung** (siehe Abbildung 123 / größere Darstellung Anhang 6.5) zeigt sich das folgende Bild. Die Versuchsperson hat in allen fünf Runden ohne Fehleraufschaltung die Fahrspur im Slalom nicht verlassen. Auch sonst zeigte diese kein auffallendes Fahrverhalten (kamerabasiert dokumentiert), weder bezüglich der Durchfahrt anderer Manöver noch bezüglich der objektiven Fahrzeugmessgrößen, die während der betroffenen Fehleraufschaltung aufgezeichnet wurden. Somit liegt die Annahme nahe, dass diese Versuchsperson die Fahrspur nicht mangels fahrerischer Kompetenz bei Fehleraufschaltung verlassen hat. Im Vergleich wurden durch die anderen  $n = 21$  validen Versuchspersonen keine fehlerunabhängigen oder fehlerassozierten Pylonenberührungen im Slalom verzeichnet. Bezieht man die gesamte getestete Stichprobe der Einzelstudie in diesen Vergleich ein, kam es bei drei Versuchspersonen zu fehlerunabhängigen Pylonenberührungen. Diese wurden jedoch aufgrund der a-priori definierten Kriterien ausgeschlossen ( $n = 1$  fehlerhafte Messdaten und zu hohe Anzahl an fehlerunabhängig gerissenen Pylonen,  $n = 1$  zu geringe Geschwindigkeit und zu hohe Anzahl an fehlerunabhängig gerissenen Pylonen,  $n = 1$  zu hohe Anzahl an fehlerunabhängig gerissenen Pylonen). Auf Ebene der Subjektivdaten ordnete die Versuchsperson den Fehler auf der Neukum-Skala mit einer 7 (niedrige Ausprägung der Kategorie „Gefährlichkeit“) ein und liegt damit im Bereich des Maximums der Vergleichsstichprobe. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Versuchsperson das Überfahren der Pylone in der Situation bemerkt und den Fehler unter diesem Eindruck bewertet hat.

Abbildung 123

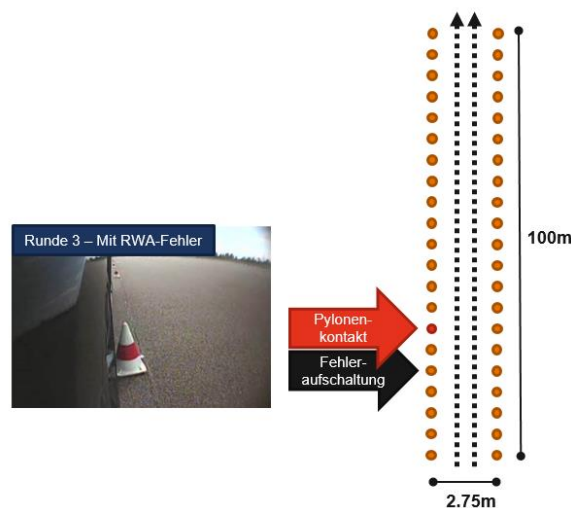
Graphische Darstellung des Falls des Spurverlassens im Fahrzeug Limousine unter Einfluss des Fehlers FBA Sprung.



Im zweiten Fall im Fahrzeug **SUV 2** bei der **RWA Rechteckschwingung** (siehe Abbildung 124 / größere Darstellung Anhang 6.6) hat die Versuchsperson des kritischen Falls ebenfalls ausschließlich in der Runde mit Fehleraufschaltung eine Pylone berührt. In allen anderen Runden wurde das Manöver fehlerfrei absolviert ebenso wie die anderen beiden Manöver in allen sechs Runden. Auf Ebene der Subjektivdaten ordnete die Versuchsperson den Fehler im Bereich Spürbarkeit (2) ein und befindet sich damit im Bereich des Minimums der Vergleichsstichprobe. Bei den weiteren  $n = 23$  validen Datensätzen kam es zu keinem fehlerabhängigen oder fehlerassoziierten Spurverlassen. Im Rahmen des Ausschlusses über Kriterium 3 (Spurhaltung) wurden zwei Versuchspersonen ausgeschlossen, die das Manöver Geradeausfahrt fehlerunabhängig in einer Runde nicht ohne Pylonenberührung durchfahren haben.

Abbildung 124

Graphische Darstellung des Falls des Spurverlassens im Fahrzeug SUV 2 unter Einfluss des Fehlers RWA Rechteckschwingung.



Die beiden im obigen Absatz benannten aufgetretenen Fälle des Spurverlassens in Folge von Fehleraufschaltungen zeigen grundsätzlich, dass die gewählte Methodik prinzipiell in der Lage ist, kritische Situationen in Folge eines Fehlerereignisses aufzuzeigen. Im Rahmen der Annahmen der Versuchsreihe ist daher in beiden Fällen die Hypothese, dass Experten die Parametrierung des Fehlers im Bereich des C0-Levels verorten können, abzulehnen.

Auch wenn die Mehrzahl der Hypothesenprüfungen für eine grundsätzliche Verlässlichkeit der Expertenurteile spricht, erscheinen bei diesen Fällen unter den oben diskutierten Rahmenbedingungen erneute Prüfungen und Nachjustierungen der Fehlerbilder notwendig. Offen bleibt ferner, in wie weit Experten die Kontrollierbarkeit von Fehlerereignissen in Steer-by-Wire Lenksystemen bei höheren Fahrgeschwindigkeiten durch Normalfahrende antizipieren können, da sich das querdynamische Übertragungsverhalten eines Kraftfahrzeugs in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit signifikant ändert.

Der Transfer dieser Erkenntnisse auf die tatsächliche Systemauslegung sollte daher an dieser Stelle anhand der oben beschriebenen Annahmen der Studienreihe kritisch diskutiert werden. Im Rahmen dieser Diskussion scheint eine konservative Haltung im Sinne der Sicherheit zukünftiger Nutzender jedoch angemessen. Zudem kann die Evaluierung der objektiven Gesamtfahrzeugreaktion, z.B. durch die Erfassung der Metrik „Spurabweichung“ als Maß für die absolute Fehlerausprägung, als wichtiger Faktor für die Interpretation dienen. Darüber hinaus erscheint auch die Weiterführung des in der Studie angewandten Mehraugenprinzips bei der Beurteilung des C0-Levels eines Fehlerbildes sinnvoll, um den Einfluss einer möglichen Rest-Subjektivität eines einzelnen Expertenurteils zu minimieren.

Zusammenfassend gibt die in der dargestellten Versuchsreihe entwickelte Methodik Experten die Möglichkeit, einen schlaglichtartigen Eindruck zur Fahrleistung von Alltagsfahrenden sowie deren subjektiven und objektiven Umgang mit und Reaktionen auf Fehlerereignisse in Steer-by-Wire Lenksystemen bei begrenzten Fahrgeschwindigkeiten auf einem Testgelände zu erhalten. Im Kern zeigen die Ergebnisse, dass Experten im untersuchten Geschwindigkeitsbereich mit wenigen Ausnahmen in der Lage sind, die Kontrollierbarkeit von Fehlerbildern durch Normalfahrende in ausgewählten Fahrsituationen antizipierend zu bewerten.

## 5 Literaturverzeichnis

- Brockmann (2009). Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS. PReVENT Report v5.0.
- Chancey, E. T., Proaps, A., & Bliss, J. P. (2013, September). The role of trust as a mediator between signaling system reliability and response behaviors. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 57, No. 1, pp. 285-289). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Chavallaz, A., Wastell, D., & Sauer, J. (2016). System reliability, performance and trust in adaptable automation. *Applied Ergonomics*, 52, 333-342.
- Ghazizadeh, M., Peng, Y., Lee, J.D., and Boyle, L.N. (2012b), "Augmenting the technology acceptance model with trust: Commercial drivers' attitudes towards monitoring and feedback." *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 56(1), 2286–2290.
- Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 50, No. 9, pp. 904-908). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage publications.
- Hegner, S.M., Beldad, A.D., and Brunswick, G.J. (2019), "In automatic we trust: Investigating the impact of trust, control, personality, characteristics, and extrinsic and intrinsic motivations on the acceptance of autonomous vehicles." *International Journal of Human-Computer Interaction*, 35(19), 1769–1780.
- IBM Corp. Released 2020. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 27.0. Armonk, NY: IBM Corp
- Körber, M. (2018). Theoretical considerations and development of a questionnaire to measure trust in automation. In *Congress of the International Ergonomics Association* (pp. 13-30). Springer, Cham.
- Neukum, A. & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. *VDI-Berichte*, 1791, 297-318.
- Numan, J.H. (1998), "Knowledge-based systems as companions: Trust, human computer interaction and complex systems." [Doctoral dissertation, University of Groningen]. <http://irs.ub.rug.nl/ppn/169106586>
- Osswald, S., Wurhofer, D., Trösterer, S., Beck, E., & Tscheligi, M. (2012, October). Predicting information technology usage in the car: towards a car technology acceptance model. In *Proceedings of the 4th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 51-58).

- Pavlou, P.A. (2003), "Consumer acceptance of electronic commerce: Integrating trust and risk with the technology acceptance model." *International Journal of Electronic Commerce*, 7(3), 101–134.
- Precht, L., Keinath, A., & Krems, J. F. (2017). Effects of driving anger on driver behavior—Results from naturalistic driving data. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 45, 75-92.

**6 Anhang**

**6.1 Vorbefragung**

**ID:** \_\_\_\_\_ **Datum:** \_\_\_\_\_  
**VL:** \_\_\_\_\_ **Zeit:** \_\_\_\_\_

*Wird vom Versuchsleiter ausgefüllt*

**Demografie**

V01: Alter:

\_\_\_\_\_ Jahre

V02: Geschlecht:

- Weiblich  
 Männlich  
 Divers  
 Keine Angabe

V03: Bestehen heute nicht korrigierte Sehbeeinträchtigungen (z.B. aufgrund von vergessener Brille oder Farbenblindheit)?

- Nein  
 Ja, nämlich: \_\_\_\_\_

V04: Bestehen heute nicht korrigierte Hörbeeinträchtigungen (z.B. aufgrund von vergessenem Hörgerät)?

- Nein  
 Ja, nämlich: \_\_\_\_\_



**Fahrgewohnheiten**

V05: In welchem Jahr haben Sie Ihren PKW Führerschein (Klasse B) erhalten?

Jahr Führerscheinwerb: \_\_\_\_\_

V06: Bitte geben Sie Marke, Modell und Baujahr des von Ihnen, gemessen an der Fahrleistung, am häufigsten genutzten Fahrzeugs an.

Marke: \_\_\_\_\_ Modell: \_\_\_\_\_ Baujahr: \_\_\_\_\_

V07: Wie viele Kilometer sind Sie im letzten Jahr als Fahrer/in gefahren?

\_\_\_\_\_ km

**V08:** Bitte geben Sie an, wie viel praktische Erfahrung Sie mit den folgenden Fahrerassistenzsystemen haben.

Welche der folgenden Fahrerassistenzsysteme zur <b>Längsregelung</b> nutzen Sie? <sup>[1]</sup> :	Ich nutze das System...				
	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
<b>Tempomat:</b> <i>Das System hält eine vom Fahrer eingestellte Fahrgeschwindigkeit soweit wie möglich ein. Dabei findet keine Anpassung an den Verkehr statt, sodass der Fahrer z. B. bei Stau selbst bremsen muss.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Abstandsregeltempomat (ACC):</b> <i>Das System ergänzt den Tempomat um eine Anpassung der Geschwindigkeit an den vorausfahrenden Verkehr, d.h. z.B. Abbremsen bei vorausfahrendem langsamen Fahrzeug.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Weiteres System:</b> _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Welche der folgenden Fahrerassistenzsysteme zur <b>Querregelung</b> nutzen Sie? <sup>[2]</sup> :	Ich nutze das System...				
	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
<b>Blind-spot warning/Totwinkelwarner:</b> <i>Das System gibt ein Signal (Warnlicht, Ton o. ä.), wenn sich ein anderes Fahrzeug im eigenen toten Winkel befindet.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Lane-departure warning:</b> <i>Das System gibt ein Signal (Warnlicht, Ton, Lenkradvibration o. ä.), wenn das Fahrzeug die Fahrstreifenbegrenzung zu überschreiten droht.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Lane-keeping Assistent:</b> <i>Erweiterung der lane-departure warning, bei der das System eine leichten Eingriff durchführt, wenn das Fahrzeug die Fahrstreifenbegrenzung zu überschreiten droht.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Lane centering:</b> <i>Das System hält das Fahrzeug durchgehend in der Fahrstreifenmitte.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Weiteres System:</b> _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Basierend auf:

[1]: Radke, T. (2013). Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. *Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik*, 19, 30-34. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5445/KSP/1000035819>

[2]: ADAS Systems. (2018, August). In *Specialty Equipment Market Association*. Retrieved from <https://www.sema.org/sema-news/2018/08/adas-systems>







B.21: Wie anspruchsvoll empfinden Sie den Parcours insgesamt?

Überhaupt nicht anspruchsvoll 1	2	3	4	5	6	Sehr anspruchsvoll 7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

B.22: Wie sehr stimmen Sie folgender Aussage zu: Ich vertraue dem Fahrzeug?

Stimme gar nicht zu 1	2	3	4	5	6	Stimme voll zu 7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Einstufung

B23: Bitte stufen Sie das Ereignis in das unten abgebildete Schema ein. Wählen Sie dafür zunächst eine der Kategorien auf der linken Seite und anschließend eine Zahl auf der rechten Seite.

<b>Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar</b>	<b>10</b>
<b>Gefährlichkeit</b>	<b>9</b>
	<b>8</b>
	<b>7</b>
<b>Störung des Fahrens</b>	<b>6</b>
	<b>5</b>
	<b>4</b>
<b>Spürbarkeit</b>	<b>3</b>
	<b>2</b>
	<b>1</b>
<b>Nichts bemerkt</b>	<b>0</b>







N03a: Welchen Fehler empfinden Sie als kritischer?

Fehler 1	Fehler 2	Beide gleich
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

N03b: Bitte begründen Sie Ihre Entscheidung.

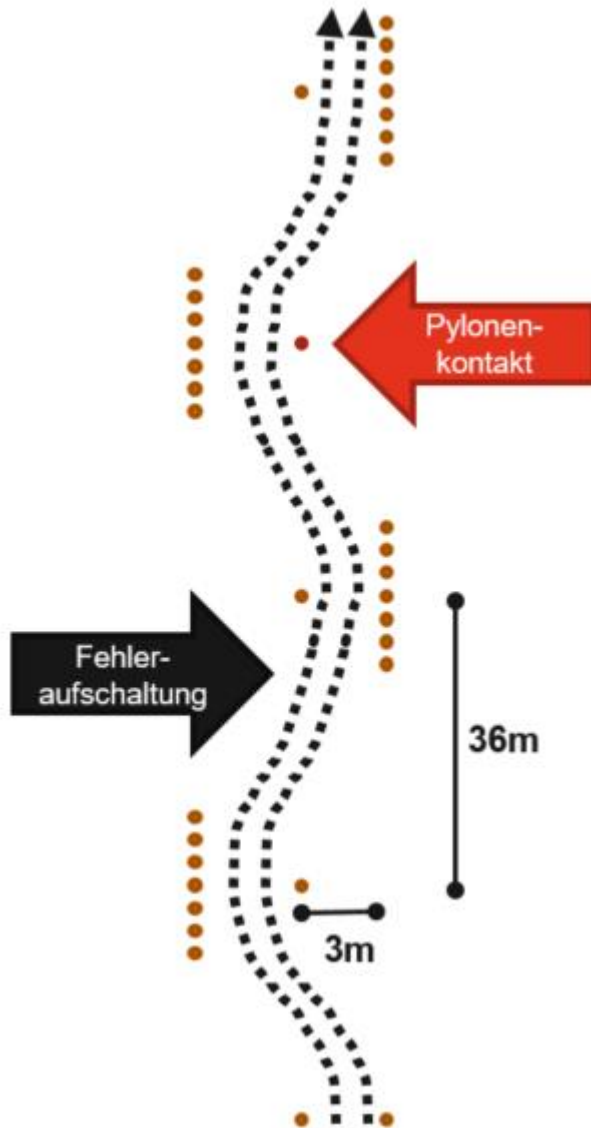
---

---

---

---

### 6.5 Darstellung Spurverlassen – Limousine (FBA Sprung)



## 6.6 Darstellung Spurverlassen – SUV 2 (RWA Rechteckschwingung)

