

Study

# Beherrschbarkeit eines nicht-redundanten Hand-Wheel-Actuators bei Ausfall des aktiven Feedback-Moments

Studien zur Kontrollierbarkeit von Loss of Feedback in SbW Fahrzeugen



Der im VDA angesiedelte DIN Arbeitskreis NA 052-00-33-18 AK „Sicherheitsanforderungen für ein „steer-by-wire“-Lenksystem“ hat das fka mit der Erarbeitung der beigefügten wissenschaftlichen Studie beauftragt.

Diese Studie ist Teil weiterer Studien, die durchgeführt wurden zur Begleitung der Normungsarbeit an der ISO 19725 „Straßenfahrzeuge – „Steer-by-wire“-Lenksysteme – Anforderungen an die Sicherheit“.

Die nachstehenden Firmen und Organisationen haben sich an der Finanzierung der Studie beteiligt:

|                                                                                                                             |                                                                                                                         |                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>BMW AG</p>                             |  <p>Bosch Automotive Steering GmbH</p> |  <p>Ford-Werke GmbH</p>                           |
|  <p>HL Mando Corporation Europe GmbH</p> |  <p>Mercedes-Benz AG</p>             |  <p>Schaeffler Technologies AG &amp; Co. KG</p> |
|  <p>ThyssenKrupp Presta AG</p>           |  <p>Volkswagen AG PKW</p>            |  <p>ZF Automotive Germany GmbH</p>              |

fka GmbH

## **Abschlussbericht**

# **Beherrschbarkeit eines nicht-redundanten Hand-Wheel-Actuators bei Ausfall des aktiven Feedback-Moments**

**Studien zur Kontrollierbarkeit von Loss of Feedback in SbW Fahrzeugen**

### **Projektnummer**

245750

### **Auftraggeber**

NA 052-00-33-18 AK – Sicherheitsanforderungen an ein Steer-by-Wire Lenksystem  
(VDA/DIN AK 33-18)

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

Dipl.-Ing. Jörn Lützow

Julia Pelzer M. Sc.

Dr.-Ing. Daniel Wegener

Head of Chassis & NVH

Dr. phil. Stefan Ladwig

Leiter Verkehrspsychologie und Akzeptanz

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

Dr.-Ing. Jens Kotte

Managing Director

Aachen, April 2025

**Inhalt**

|         |                                                              |    |
|---------|--------------------------------------------------------------|----|
| 1       | Einleitung.....                                              | 4  |
| 1.1     | Forschungsfrage.....                                         | 5  |
| 1.2     | Studienkonzept.....                                          | 5  |
| 2       | Expertenstudie.....                                          | 8  |
| 2.1     | Methode .....                                                | 8  |
| 2.1.1   | Studiendesign .....                                          | 8  |
| 2.1.2   | Fahrzeuge, Fehlerbild und LoF-Dämpfungscharakteristiken..... | 9  |
| 2.1.3   | Fahrparcours und Fahrszenarien .....                         | 11 |
| 2.1.4   | Abhängige Variablen .....                                    | 12 |
| 2.1.4.1 | Objektivdaten .....                                          | 12 |
| 2.1.4.2 | Subjektivdaten .....                                         | 14 |
| 2.1.5   | Studienablauf .....                                          | 15 |
| 2.2     | Ergebnisse .....                                             | 16 |
| 2.2.1   | Objektivdaten .....                                          | 16 |
| 2.2.1.1 | Ford Edge .....                                              | 20 |
| 2.2.1.2 | VW ID.4 .....                                                | 23 |
| 2.2.2   | Subjektivdaten.....                                          | 26 |
| 2.2.2.1 | Ford Edge .....                                              | 26 |
| 2.2.2.2 | VW ID.4 .....                                                | 29 |
| 2.2.3   | Abgleich der Subjektiv- und Objektivdaten .....              | 32 |
| 2.3     | Fazit .....                                                  | 33 |
| 3       | Nutzerstudie .....                                           | 36 |
| 3.1     | Methode .....                                                | 36 |
| 3.1.1   | Studiendesign .....                                          | 36 |
| 3.1.2   | Fahrzeug, Fehlerbild und LoF-Dämpfungscharakteristik .....   | 37 |
| 3.1.3   | Fahrparcours und Fahrszenarien .....                         | 38 |
| 3.1.4   | Abhängige Variablen .....                                    | 42 |
| 3.1.4.1 | Spureinhaltung.....                                          | 42 |
| 3.1.4.2 | Objektivdaten.....                                           | 44 |

---

|         |                                                 |    |
|---------|-------------------------------------------------|----|
| 3.1.4.3 | Subjektivdaten .....                            | 46 |
| 3.1.5   | Studienablauf .....                             | 48 |
| 3.1.6   | Stichprobe .....                                | 50 |
| 3.2     | Ergebnisse .....                                | 51 |
| 3.2.1   | Spureinhaltung .....                            | 51 |
| 3.2.1.1 | Zielsetzung 1 – LoF-Erstfehler .....            | 51 |
| 3.2.1.2 | Zielsetzung 2 – LoF-Adaption .....              | 52 |
| 3.2.2   | Objektivdaten .....                             | 52 |
| 3.2.2.1 | Zielsetzung 1 – LoF-Erstfehler .....            | 52 |
| 3.2.2.2 | Zielsetzung 2 – LoF-Adaption .....              | 59 |
| 3.2.3   | Subjektivdaten.....                             | 65 |
| 3.2.3.1 | Fehlerunabhängige Daten.....                    | 66 |
| 3.2.3.2 | Zielsetzung 1 – LoF-Erstfehler .....            | 74 |
| 3.2.3.3 | Zielsetzung 2 – LoF-Adaption .....              | 77 |
| 3.2.3.4 | Nachbefragung .....                             | 78 |
| 3.2.4   | Abgleich der Subjektiv- und Objektivdaten ..... | 79 |
| 3.2.5   | Erweitere Auswertung .....                      | 79 |
| 3.3     | Diskussion .....                                | 82 |
| 3.3.1   | Zielsetzung 1 – LoF-Erstfehler .....            | 82 |
| 3.3.2   | Zielsetzung 2 – LoF-Adaption.....               | 84 |
| 3.3.3   | Limitationen.....                               | 85 |
| 4       | Fazit und Ausblick .....                        | 87 |
| 5       | Literatur .....                                 | 90 |
| 6       | Anhang .....                                    | 91 |

## 1 Einleitung

Die Technologie Steer-by-Wire (SbW) ermöglicht im Vergleich zu konventionellen, mechanisch gekoppelten Lenksystemen eine Vielzahl von neuen Möglichkeiten. Dies betrifft sowohl die Gestaltung der Interaktion zwischen Fahrennden und Fahrzeug als auch die Integration des Lenksystems in die Architektur und das Package eines Fahrzeugs. SbW-Lenksysteme ermöglichen darüber hinaus 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 Fahrennden während der (teil-)automatisierten Fahrt mehr Freiraum gewähren und dabei eine intuitive Handhabung gewährleisten. In den nächsten Jahren wird eine schrittweise, weltweite Einführung von SbW-Systemen in die Masse der produzierten Fahrzeuge erwartet. Ein zentraler Aspekt mit Blick auf der breiten Einführung der SbW-Technologie in den Markt liegt auf der Systemsicherheit.

Da bei SbW-Systemen keine mechanische Verbindung zwischen dem Lenkrad und den gelenkten Fahrzeuigrädern besteht, wird die Fahrerrückmeldung – das Lenkgefühl – virtuell über den fahrerseitig mit dem Lenkrad gekoppelten „Hand-Wheel-Actuator“ (HWA) (auch „Feedback-Actuator (FBA)“) nachgebildet. Der HWA simuliert das Lenkgefühl dabei, indem er aktiv das Feedback-Moment und die aktive Rückführung zum Lenkrad bereitstellt, die den Rückstellkräften der gelenkten Räder weitestgehend entsprechen. Mit Blick auf die Systemsicherheit bildet eine redundante Auslegung des HWAs sowie aller übrigen relevanten Systemkomponenten des SbW-Systems den derzeitigen Stand der Technik, um eine uneingeschränkte Funktion und Beherrschbarkeit des Systems im Fehlerfall zu garantieren.

Um den hohen ASIL-Anforderungen für die Sicherheitsziele wie die Verhinderung des Verlusts der Kontrollierbarkeit bei einem Ausfall des Lenksystems, die Verhinderung eines Selbstlenkens oder die Verhinderung eines Blockierens der Lenkung gerecht zu werden, sind weitreichende Überlegungen sowie besondere Sicherheits- und Abschwächungsmaßnahmen erforderlich. Auch ein möglicher Verlust des aktiven, durch den HWA bereitgestellten Feedbackmoments („Loss of Feedback“ (LoF)) ist im Rahmen einer vollumfänglichen Sicherheitsbetrachtung eines SbW-Systems zu berücksichtigen. Hierbei ist sicherzustellen, dass auch bei einem möglichen Ausfall des aktiven HWA-Feedbackmoments die Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs gewährleistet werden kann. Die sich daraus ergebenden Herausforderungen und Randbedingungen haben direkten Einfluss auf die Auslegung, das Design, die Komplexität und das Package eines HWA-Systems. In der Industrie befinden sich aktuell unterschiedliche Systemansätze in der Entwicklung. Hierzu gehören unter anderem redundante aktive Systeme, aktive Systeme mit passiver Rückfallebene oder auch eine Kombination aus beiden Ansätzen. Systeme mit einer passiven Rückfallebene bieten dabei im Vergleich zu redundanten aktiven Systemen mitunter Vorteile aufgrund einer reduzierten Systemkomplexität. Die passive Rückfallebene für das Feedback-Moment basiert bei diesen Systemen in der Regel auf Reibung oder Dämpfung, wobei sich gezeigt hat, dass eine Dämpfungscharakteristik im Vergleich zur Reibung vorteilhaft ist.

Mit Blick auf die Sicherstellung der Kontrollierbarkeit eines SbW-Systems im Fehlerfall ergeben sich bei der Auslegung einer dämpfungsbasierten passiven HWA-Rückfallebene unter anderem die folgenden Herausforderungen:

- Kontrollierbare Auslegung der plötzlichen Änderung des HWA-Lenkmoments im Falle eines LoF-Fehlers,
- Beherrschbarkeit des fehlenden automatischen Zurücklenkens („Active Return“) im LoF-Fehlerfall,
- Anpassung der Nutzer (Fahrer/Fahrerin) an die veränderte HWA-Lenkmomentencharakteristik.

Im Sinne einer nutzergerechten Gestaltung ist den genannten Punkten bei der Auslegung einer passiven HWA-Rückfallebene für ein SbW-System Rechnung zu tragen.

### 1.1 Forschungsfrage

Aufgrund der angesprochenen Vorteile einer passiven HWA-Rückfallebene gegenüber einem komplexeren HWA-Layout mit redundanter Auslegung des aktiven Feedback-Aktuators wird aktuell diskutiert, ob fahrerseitig auch ein nicht-redundanter HWA, der die Anforderungen an die Fahrzeugbeherrschbarkeit im Fehlerfall und nach einem Fehler gemäß DIN 70065 erfüllt (siehe [DIN24], Architekturbeispiel: Anhang C.3, Bild C.4), eine Möglichkeit darstellt, die Systemkomplexität eines SbW-Systems unter gleichzeitiger Beibehaltung der Beherrschbarkeit im Fehlerfall zu optimieren. Aus dieser Überlegung heraus und unter Berücksichtigung der oben genannten Herausforderungen an eine dämpfungsbasierte passive HWA-Rückfallebene motiviert sich das vorliegende Projekt, das im Auftrag des NA 052-00-33-18 AK (VDA/DIN AK 33-18 – Sicherheitsanforderungen an ein Steer-by-Wire Lenksystem SbW) durch die fka GmbH in Kooperation mit dem Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University als unabhängige Institutionen durchgeführt wurde. Die sich aus den Überlegungen und Diskussionen rund um das Thema „nicht-redundanter HWA“ abgeleitete zentrale Fragestellung lautet:

***„Ist ein Ausfall des HWAs und ein damit einhergehender Verlust des aktiven Feedbacks bei einer nicht-redundanten Auslegung des HWAs mit einer passiven HWA-Rückfallebene durch Normalfahrende kontrollierbar?“***

Zur Beantwortung der zentralen Fragestellung wurde ein Studienkonzept – bestehend aus einer vorgelagerten Expertenstudie und einer auf den Ergebnissen aufbauenden Nutzerstudie mit naiven Alltagsfahrenden – entwickelt. Im Rahmen der Studien wurden schließlich empirische Daten zur Beantwortung der gestellten Forschungsfrage erhoben und ausgewertet.

### 1.2 Studienkonzept

Eine Übersicht über die aufeinander aufbauenden Studien zur Erhebung von empirischen Daten zur Beantwortung der in Kapitel 1.1 formulierten zentralen Forschungsfrage ist in Abb. 1-1 dargestellt.

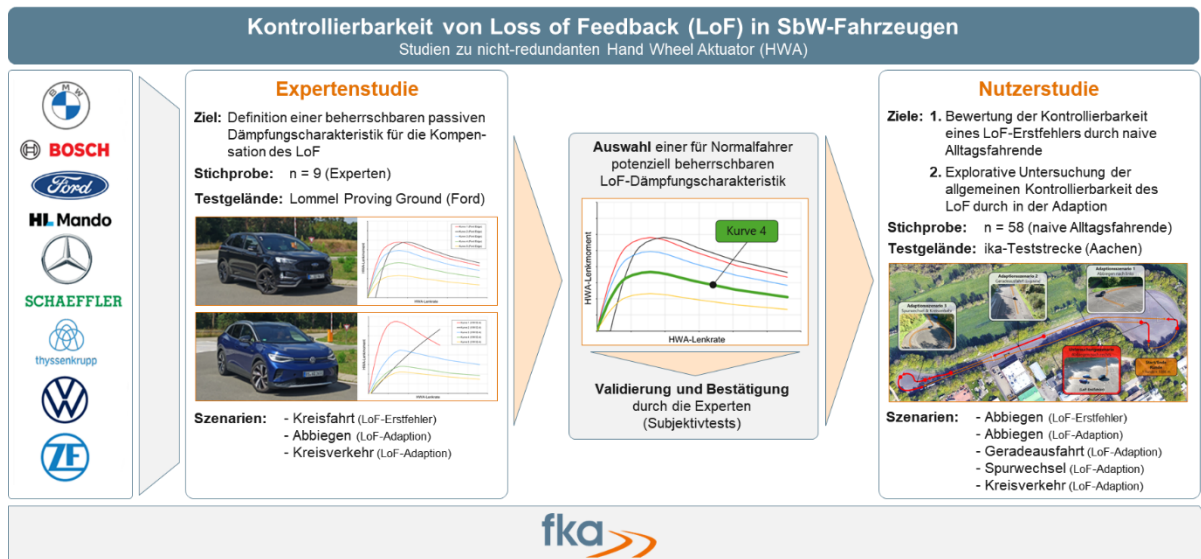


Abb. 1-1: Übersicht des Studienkonzeptes zur Untersuchung der Kontrollierbarkeit von Loss of Feedback (LoF) in SbW-Fahrzeugen

Das entwickelte Studienkonzept beinhaltet eine vorgelagerte Expertenstudie mit Experten aus den teilnehmenden Häusern aus dem Kreis des VDA/DIN AK 33-18. Aufbauend auf den Ergebnissen der Expertenstudie wurde eine nachfolgende Nutzerstudie mit naiven Alltagsfahrenden durchgeführt.

Die Expertenstudie hatte zum Ziel, verschiedene Dämpfungscharakteristiken für eine passive HWA-Rückfallebene hinsichtlich ihrer Kontrollierbarkeit zu bewerten und eine Dämpfungscharakteristik für die Testung mit Normalfahrenden auszuwählen. Hierzu wurden im Rahmen der Expertenstudie Versuchsfahrten mit zwei Versuchsfahrzeugen durchgeführt. In diesen wurde neben der LoF-Fehlerrückmeldung auch die Adaption an die passive LoF-Dämpfungscharakteristik in definierten Fahrszenarien durch die Experten bewertet. Auf Basis der Bewertung wählten die Experten eine für Normalfahrende als beherrschbar angesehene LoF-Dämpfungscharakteristik für die passive HWA-Rückfallebene aus.

In der nachfolgenden Nutzerstudie wurde die ausgewählte LoF-Dämpfungscharakteristik hinsichtlich der Kontrollierbarkeit mit einer Stichprobe naiver Versuchspersonen überprüft. Der Fokus lag dabei auf der Überprüfung der Kontrollierbarkeit eines unerwartet auftretenden LoF mit Rückfall auf die passive LoF-Dämpfungscharakteristik in einem definierten Fahrszenario. Als Fahrszenario diente in diesem Fall ein Abbiegevorgang nach rechts, wobei der SbW-Fehler unmittelbar vor dem Abbiegevorgang aufgeschaltet wurde. Die Auswahl des Untersuchungsszenarios erfolgte durch die Experten des VDA/DIN AK33-18. Neben der Untersuchung einer möglichen Änderung des Lenkverhaltens der Versuchspersonen aufgrund der geänderten Lenkcharakteristik sollte in dem häufig auftretenden Alltagsszenario auch die Reaktion der Versuchspersonen auf das Ausbleiben des „Active Returns“ (automatisches Zurücklenken beim Loslassen des Lenkrades) adressiert werden. Neben der fokussierten Untersuchung der Kontrollierbarkeit dieser LoF-Erstfehlersituation wurde im Rahmen der Nutzerstudie explorativ

auch die Kontrollierbarkeit der Weiterfahrt mit dem passiv gedämpften Lenksystem untersucht (LoF-Adaption).

Der Aufbau, der Ablauf und die Ergebnisse der beiden aufeinander aufbauenden Studien werden in den nachfolgenden Kapiteln detailliert beschrieben. Während sich Kapitel 2 mit der durchgeführten Expertenstudie befasst, wird die Nutzerstudie in Kapitel 3 behandelt. Abschließend werden die Projektergebnisse in Kapitel 4 zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage (siehe Kapitel 1.1) herangezogen und diskutiert.

## 2 Expertenstudie

Mit dem Ziel, eine geeignete, beherrschbare passive LoF-Dämpfungscharakteristik für die passive HWA-Rückfallebene für die nachfolgende Nutzerstudie zu definieren, wurde eine Expertenstudie durchgeführt. Nachfolgend werden das methodische Vorgehen (siehe Kapitel 2.1) sowie die auf den erhobenen Daten basierenden Ergebnisse und Erkenntnisse (siehe Kapitel 2.2 und 2.3) detailliert erläutert.

### 2.1 Methode

Die Expertenstudie fand im August 2024 auf der Handlingstrecke des Ford Lommel Proving Grounds in Lommel (Belgien) statt. Insgesamt neun Experten aus teilnehmenden Häusern (OEM und Zulieferer) des VDA/DIN AK 33-18 bewerteten jeweils fünf unterschiedliche LoF-Dämpfungscharakteristiken in zwei Versuchsfahrzeugen. Die detaillierte Beschreibung der Methodik erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

#### 2.1.1 Studiendesign

Die Expertenstudie teilte sich in zwei konsekutive Abschnitte. Im ersten Abschnitt erfolgte die Bewertung verschiedener passiver LoF-Dämpfungscharakteristiken für eine passive HWA-Rückfallebene im Falle eines Fehlers des aktiven HWAs. Dazu wurden den neun Experten jeweils fünf verschiedene LoF-Dämpfungscharakteristiken (siehe Kapitel 2.1.2) in zwei unterschiedlichen Fahrzeugen präsentiert (Innersubjekt-Design). Im Rahmen von Testfahrten durch einen definierten Fahrparcours wurden von den Experten in jeweils einer Runde je Dämpfungscharakteristik vier unterschiedliche Fahraufgaben absolviert (siehe Kapitel 2.1.3), um die Ausprägungen der verschiedenen Dämpfungscharakteristiken in unterschiedlichen Situationen zu erleben und bewerten zu können. Die Reihenfolge der beiden Versuchsfahrzeuge sowie die Reihenfolge der erlebten LoF-Dämpfungscharakteristiken in dem jeweiligen Fahrzeug wurde dabei randomisiert, um den Einfluss von Gewöhnungs- und Reihenfolgeeffekten zu minimieren. Die Bewertung der einzelnen LoF-Dämpfungscharakteristiken in den beiden Versuchsfahrzeugen erfolgte subjektiv durch die Beantwortung eines Fragebogens. Zusätzlich wurden während jeder der absolvierten Fahrten objektive Messgrößen aufgezeichnet und einer nachgelagerten Auswertung zugeführt (siehe Kapitel 2.1.4).

Im zweiten Abschnitt wurde die – nach einer ersten Auswertung der erhobenen Daten – favorisierte LoF-Dämpfungscharakteristik in dem für die Nutzerstudie definierten Fahrszenario (Abbiegen nach rechts) überprüft. Zudem wurde das Warnkonzept, welches in der Nutzerstudie verwendet werden sollte, durch die Experten geprüft und bestätigt.

Zur Darstellung des methodischen Vorgehens fokussieren die nachfolgenden Kapitel den ersten Abschnitt der Expertenstudie.

### 2.1.2 Fahrzeuge, Fehlerbild und LoF-Dämpfungscharakteristiken

Für die Expertenstudie wurden zwei Fahrzeuge mit einer SbW-Lenkung, gestellt von teilnehmenden Häusern aus dem VDA/DIN AK 33-18, verwendet. Ein Ford Edge wurde dabei als Vertreter der Fahrzeugklasse SUV und ein VW ID.4 als Vertreter der Kompaktklasse gewählt. Die beiden im Rahmen der Expertenstudie verwendeten Fahrzeuge sind in Abb. 2-1 dargestellt. Beide Fahrzeuge weisen eine ähnliche On-Center-Lenkübersetzung sowie einen ähnlichen Lenkraddurchmesser auf. Leichte Unterschiede bestehen hinsichtlich der mechanischen Grundreibung des HWAs. Während das Lenksystem des Ford Edge eine eher geringe mechanische Grundreibung besitzt, weist das Lenksystem des VW ID.4 eine etwas höhere Grundreibung auf.



Abb. 2-1: Expertenstudie – SbW-Versuchsfahrzeug (links: Ford Edge; rechts: VW ID.4)

In beiden Fahrzeugen wurde für die Durchführung der Studie das Fehlerbild des Ausfalls des HWAs implementiert. Dieser Fehler äußert sich für Fahrende im Moment der Fehleraufschaltung als plötzlicher Einbruch des Handmoments mit anschließend dauerhaft fehlendem aktiven Feedback (LoF) des HWAs. Zur Kompensation des LoF wurden systemseitig verschiedene passive LoF-Dämpfungscharakteristiken als passive Rückfallebene implementiert und nach der Fehleraufschaltung durch das jeweilige SbW-System simuliert, um sie im Rahmen der Expertenstudie testen und bewerten zu können. Die passiven LoF-Dämpfungscharakteristiken werden jeweils durch einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem HWA-Lenkmoment und der HWA-Lenkrate am Lenkrad charakterisiert, der durch eine entsprechende Kennlinie beschrieben wird. Die verschiedenen Kennlinien unterscheiden sich dabei in Bezug auf drei zentrale Merkmale:

- Einlaufpunkt,
- Steigung,
- Maximalkraft.

Der Einlaufpunkt beschreibt, ab welcher Lenkrate sich ein Lenkmoment aufbaut. Die Steigung beschreibt die Stärke des Anstiegs des Lenkmoments in Abhängigkeit der Lenkrate (Lenkwinkelelgeschwindigkeit). Die Maximalkraft beschreibt das maximal gestellte Lenkmoment. Die in den beiden Fahrzeugen umgesetzten Varianten einer passiven Dämpfung des HWAs in Folge eines LoF wurden durch die Experten des VDA/DIN AK 33-18 im Vorfeld entwickelt und für die Durchführung der Studie zur Verfügung gestellt. Die jeweils in den Fahrzeugen umgesetzten

fünf passiven LoF-Dämpfungscharakteristiken unterschieden sich dabei in ihrer Ausprägung zwischen den jeweiligen Fahrzeugen (siehe Abb. 2-2).

Im Ford Edge weist die Dämpfungscharakteristik 2 (Kurve 2, schwarz) eine vergleichsweise große Einlauflänge auf. In diesem Bereich der Lenkrate wird durch die simulierte passive Rückfallebene kein Lenkmoment erzeugt. Erst bei Lenkraten, die über die Einlauflänge hinausgehen, erfolgt der Aufbau eines Lenkmoments. Neben der großen Einlauflänge weist Dämpfungscharakteristik 2 im Ford Edge eine vergleichsweise hohe Steigung sowie einen hohen Maximalwert des passiv erzeugten Lenkmoments auf. Die übrigen vier Dämpfungscharakteristiken im Ford Edge (Kurve 1, rot; Kurve 3, blau; Kurve 4, grün; Kurve 5, gelb) weisen keine Einlauflänge auf. Bei diesen Dämpfungscharakteristiken wird also selbst bei kleinen Lenkraten bereits ein entsprechendes passives Lenkmoment am HWA erzeugt. Die vier Dämpfungscharakteristiken unterschieden sich dabei durch die gewählte Steigung und das maximal erzeugte Lenkmoment am HWA (siehe Abb. 2-2, linkes Diagramm).

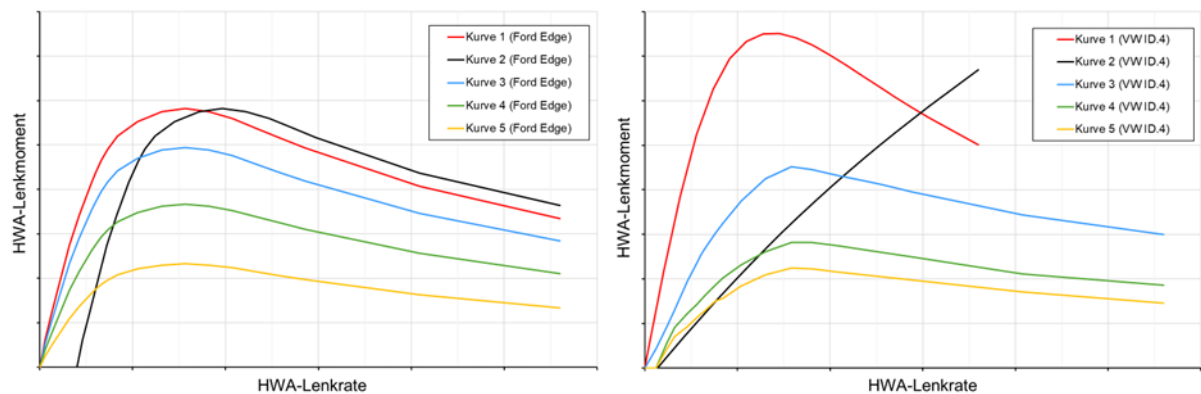


Abb. 2-2: Expertenstudie – LoF-Dämpfungscharakteristiken für die passive HWA-Rückfallebene in den beiden Versuchsfahrzeugen (links: Ford Edge; rechts: VW ID.4)

Von den im VW ID.4 umgesetzten passiven LoF-Dämpfungscharakteristiken weisen Dämpfungscharakteristik 2, 4 und 5 (Kurve 2, schwarz; Kurve 4, grün; Kurve 5, gelb) eine Einlauflänge auf (siehe Abb. 2-2, rechtes Diagramm). Der gewählte Wert für die Einlauflänge ist jedoch deutlich kleiner als bei Dämpfungscharakteristik 2 im Ford Edge. Dämpfungscharakteristik 2 (Kurve 2, schwarz) im VW ID.4 unterscheidet sich aufgrund ihrer Charakteristik von den übrigen Dämpfungskurven. Im Vergleich zu den anderen Dämpfungscharakteristiken weist sie kein lokales Maximum auf und steigt stetig mit einem leicht degressiven Verlauf bis zu Maximalkraft an. Die Dämpfungscharakteristiken 5 (Kurve 5, gelb) und 4 (Kurve 4, grün) weisen nach der Einlauflänge eine zunächst hohe Steigung auf, die aber im weiteren Verlauf bis hin zum jeweiligen Maximalwert für das Lenkmoment etwas abnimmt. Sowohl die Steigung als auch der Maximalwert sind dabei bei Dämpfungscharakteristik 4 (Kurve 4, grün) etwas höher als bei Dämpfungscharakteristik 5 (Kurve 5, gelb). Die übrigen zwei Dämpfungscharakteristiken im VW ID.4 (Kurve 1, rot; Kurve 3, blau) weisen keine Einlauflänge auf (siehe Abb. 2-2, rechtes Diagramm). Aus dem Ursprung heraus steigen diese Kurven bis zum jeweiligen Maximalwert des Lenkmoments an und fallen anschließend im weiteren Verlauf leicht ab. Dämp-

fungscharakteristik 1 (Kurve 1, rot) weist dabei im Vergleich die höhere Steigung und den höheren Maximalwert für das Lenkmoment am HWA auf. Die gezeigten LoF-Dämpfungscharakteristiken superpositionieren sich dabei mit der mechanischen Grundreibung im HWA des jeweiligen Versuchsfahrzeugs. Die fahrzeugspezifische Gestaltung der der in Abb. 2-2 vorgestellten LoF-Dämpfungscharakteristiken berücksichtigt dabei die unterschiedlichen Grundparameter und Grundeigenschaften der beiden Versuchsfahrzeuge. Im Einklang mit diesen Eigenschaften ergibt sich für jedes der beiden Versuchsfahrzeuge im LoF-Fehlerfall ein passend abgestimmtes System- und Lenkverhalten.

### 2.1.3 Fahrparcours und Fahrscenarien

Die Expertenstudie wurde auf der Handlingstrecke des Ford Lommel Proving Grounds durchgeführt. Abb. 2-3 zeigt den zu absolvierenden Fahrparcours mit einer Länge von circa 2350 m aus der Vogelperspektive.

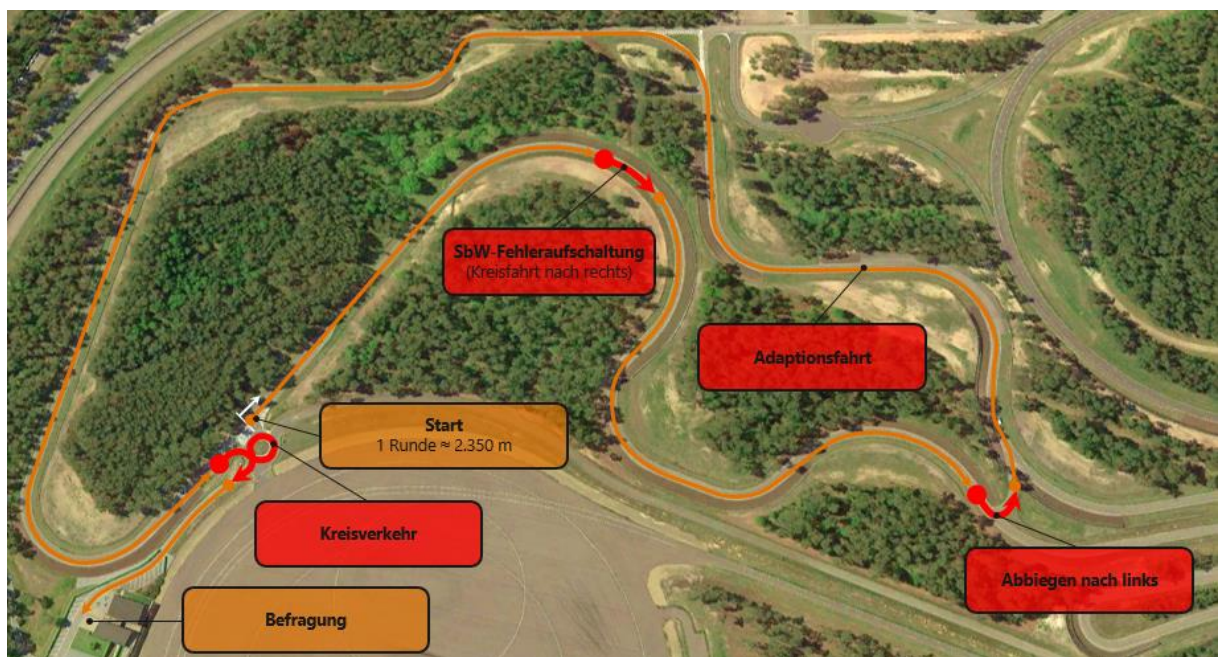


Abb. 2-3: Fahrparcours der Expertenstudie auf der Handlingstrecke des Ford Lommel Proving Grounds

Der Fahrparcours auf der Handlingstrecke umfasste insgesamt vier Fahrscenarien (siehe Abb. 2-3), für die die Experten eine subjektive Bewertung hinsichtlich der Beherrschbarkeit abgeben sollten (siehe Kapitel 2.1.4). Bei den gewählten Fahrscenarien handelt es sich um:

- die SbW-Fehlerrückmeldung (LoF-Erstfehler) während einer Kreisfahrt nach rechts,
- ein Abbiegen nach links,
- einer freien Adaptionsfahrt und
- das Befahren eines Kreisverkehrs.

Die Erstfehlermeldung des LoF erfolgte im Rahmen der Kreisfahrt nach rechts (Fahrscenario 1). Der Kurvenradius während der Kreisfahrt betrug ca. 85 m bei einer vorgegebenen

Fahrgeschwindigkeit von ca. 70 km/h, sodass sich eine stationäre Querschleunigung von ca.  $4.4 \text{ m/s}^2$  ergab. Gemäß den Vorgaben waren die Experten angehalten, die Kurve und den nachfolgenden Abschnitt des Fahrparcours auf der markierten rechten Fahrspur zu absolvieren. Im weiteren Verlauf des Parcours erfolgte die Durchfahrt des zweiten Fahrszenarios „Abbiegen nach links“. Dem Verlauf der Handlingstrecke folgend fand im Anschluss eine freie Adaptionsfahrt statt. In dieser war den Experten die Wahl des Fahrstreifens freigestellt sowie das Explorieren des Lenkverhaltens beispielsweise durch Anlenken und Spurwechsel möglich. Als letztes Fahrszenario wurde ein Kreisverkehr (Radius ca. 8 m) durchfahren, bevor der Befragungsort abseits der Handlingstrecke angefahren wurde. Für das Durchfahren der Fahrszenarien „Abbiegen nach links“ und Kreisverkehr“ wurden den Experten keine spezifischen Vorgaben (z.B. bezüglich der Fahrgeschwindigkeit) gemacht. Die Randbedingungen für diese beiden Fahrszenarien ergaben sich vorrangig aus den streckenspezifischen Gegebenheiten (Fahrszenario „Abbiegen nach links“: Fahrspur zu Beginn des Abbiegevorgangs, Haltelinie am Ende des Abbiegevorgangs; Fahrszenario „Kreisverkehr“: Vorgaben durch die bauliche Gestaltung des Kreisverkehrs).

#### **2.1.4 Abhängige Variablen**

Im Rahmen der Expertenstudie wurden sowohl objektive als auch subjektive Maße zur Bewertung der Beherrschbarkeit der verschiedenen LoF-Dämpfungscharakteristiken in den getesteten Fahrszenarien erhoben.

##### **2.1.4.1 Objektivdaten**

Im Rahmen der Versuchsfahrten der Experten in den beiden Versuchsfahrzeugen wurden über die Fahrzeugsensorik allgemeine Fahrzustandsgrößen (z.B. Fahrgeschwindigkeit, Querschleunigung) sowie relevante Größen des SbW-Lenksystems (z.B. HWA-Lenkmoment, HWA-Lenkwinkel) erfasst, aufgezeichnet und im Rahmen eines Post-Processings ausgewertet. Eine zusammenfassende Auflistung der während der Expertenstudie aufgezeichneten Objektivmessdaten ist in Tab. 2-1 dargestellt.

Das auf die aufgezeichneten Messdaten angewendete Post-Processing und die darin enthaltene Auswertung der Objektivmessdaten ist in Abb. 2-4 schematisch dargestellt. Aufbauend auf einer Datenkonvertierung zur Überführung der fahrzeugspezifischen Messdaten in ein einheitliches Messdatenformat und einem allgemeinen Post-Processing der Messdaten wurde der Datenbereich auf die relevanten Zeitbereiche der drei für die Auswertung ausgewählten Fahrszenarien (LoF-Fehlerrückmeldung während der Kreisfahrt, Abbiegen nach links, Kreisverkehr) zugeschnitten. Das Fahrszenario „Adaptionsfahrt“ wurde bei der Objektivdatenauswertung nicht weiter berücksichtigt, da den Experten das Fahren in diesem Fahrszenario weitestgehend freigestellt war, sodass eine direkt vergleichende Auswertung der Objektivdaten für diesen Fahrabschnitt nicht zielführend ist. Die im allgemeinen Post-Processing bearbeiteten und zugeschnittenen Messdatensätze der einzelnen Fahrszenarien wurden anschließend einer szenarienabhängigen Datenauswertung zugeführt. Im Rahmen dieses Auswertungsschrittes wurden die Messdatensätze der einzelnen Fahrszenarien spezifisch ausgewertet.

Dies beinhaltet unter anderem die Erstellung und Auswertung spezifischer Datenplots sowie die Berechnung relevanter Kenngrößen.

| Signal-gruppe |                             | Signal                  | Einheit   | Ford Edge | VW ID.4 |
|---------------|-----------------------------|-------------------------|-----------|-----------|---------|
| Fahrer        |                             | Fahrpedal (Betätigung)  | [-]       | ✓         | ✗       |
|               |                             | Bremspedal (Betätigung) | [-]       | ✓         | ✗       |
| Fahrzeug      |                             | Geschwindigkeit         | [km/h]    | ✓         | ✓       |
|               |                             | Längsbeschleunigung     | [m/s²]    | ✓         | ✓       |
|               |                             | Querbeschleunigung      | [m/s²]    | ✓         | ✓       |
|               |                             | Gierrate                | [°/s]     | ✓         | ✓       |
| HWA           | FBA<br>(Feedback-Aktuator)  | FBA Lenkmoment          | [Nm]      | ✓         | ✓       |
|               |                             | FBA Lenkwinkel          | [°]       | ✓         | ✓       |
|               |                             | FBA Lenkrate            | [°/s]     | ✓         | ✓       |
| RWA           | RWA<br>(Roadwheel-Aktuator) | RWA Lenkkraft/-moment   | [N]; [Nm] | ✓         | ✓       |
|               |                             | RWA Lenkwinkel/-weg     | [°]; [mm] | ✓         | ✓       |
| SbW-Fehler    |                             | SbW Fehler Indikator    | [-]       | ✓         | ✓       |

Tab. 2-1: Übersicht der in den beiden Versuchsfahrzeugen der Expertenstudie verfügbaren Objektivmessdaten

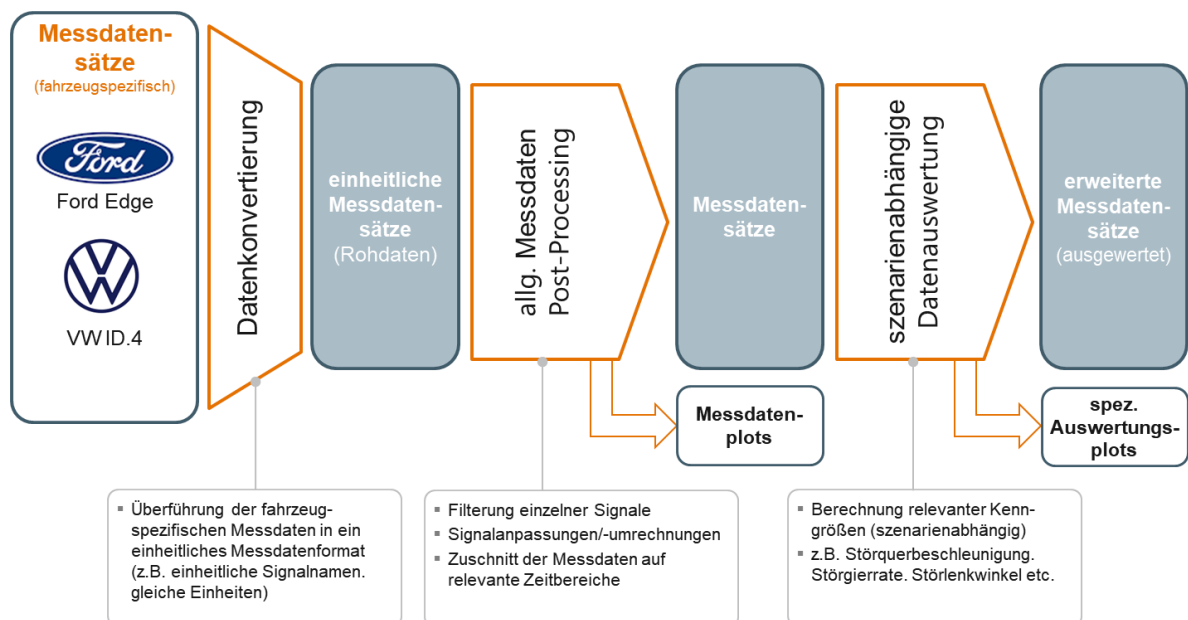


Abb. 2-4: Post-Processing und Auswertung der Objektivmessdaten im Rahmen der Expertenstudie (schematische Darstellung)

Für die drei auszuwertenden Fahrszenarien wurden in der szenarienabhängigen Datenauswertung die im Folgenden aufgelisteten Auswertungsschritte und Kenngrößenberechnungen durchgeführt:

- **Fahrszenario „Kreisfahrt nach rechts“ (LoF-Erstfehleraufschaltung)**
  - Störeinfluss Lenkwinkel
  - Störeinfluss Lenkrate
  - Störeinfluss Querschleunigung
  - Störeinfluss Gierrate
  - Gemittelte Signalverläufe aller Experten (inkl. Mittelung der Störeinflüsse)
- **Fahrszenario „Abbiegen nach links“ (LoF-Adaption)**
  - Ermittlung der max. Lenkwinkelamplitude beim Abbiegen nach links
  - Ermittlung der max. Lenkraten am HWA (Einlenken und Zurücklenken)
  - Ermittlung des max. Lenkmoments am HWA (Einlenken und Zurücklenken)
- **Fahrszenario „Kreisverkehr“ (LoF-Adaption)**
  - Ermittlung der max. Lenkwinkelamplitude (Kreisverkehr und Ausfahrt Kreisverkehr)
  - Ermittlung der max. Lenkraten am HWA (Einfahrt und Ausfahrt Kreisverkehr)
  - Ermittlung des max. Lenkmoments am HWA (Einfahrt und Ausfahrt Kreisverkehr)

#### 2.1.4.2 Subjektivdaten

Die subjektive Bewertung der Experten wurde mit Hilfe von Fragebögen erfasst. Die Befragung gliederte sich in drei Abschnitte: Bewertung der LoF-Dämpfungscharakteristik isoliert für jedes der absolvierten Fahrszenarien, Bewertung der LoF-Dämpfungscharakteristik über den gesamten Parcours hinweg und eine vergleichende Gesamtbewertung der fünf LoF-Dämpfungscharakteristiken in dem jeweiligen Versuchsfahrzeug.

Zur isolierten Bewertung der Beherrschbarkeit der LoF-Dämpfungscharakteristik in den Fahrszenarien (Kreisfahrt mit LoF-Erstfehler, Abbiegen, Adaption, Kreisverkehr) wurde die Neukum-Skala [NEU03] verwendet. Die Experten wurden gebeten, die entsprechende Situation für Normalfahrende auf einer Skala von 0 (nichts bemerkt) bis 10 (nicht kontrollierbar) zu beurteilen. Des Weiteren wurden sie gebeten, die Wahrscheinlichkeit einzuschätzen, mit der sich für Normalfahrende durch die LoF-Lenkcharakteristik eine kritische Fahrsituation ergibt (1 – sehr unwahrscheinlich bis 6 – sehr wahrscheinlich). Im Anschluss wurden die Experten gebeten, ihre Einschätzung offen zu begründen.

Im Zuge der Gesamtbewertung der Dämpfungscharakteristik wurde zunächst die allgemeine Beherrschbarkeit des Fahrzeugs für Normalfahrende auf einer Skala von 1 (gar nicht beherrschbar) bis 6 (voll und ganz beherrschbar) erfragt. Im Anschluss wurden die Experten gebeten, auf einer jeweilig fünfstufigen Skala den Einlaufpunkt (1 – zu früh, 3 – passend, 5 – zu spät), die Steigung (1 – zu gering, 3 – passend, 5 – zu stark) und die Maximalkraft (1 – zu gering, 3 – passend, 5 – zu stark) der LoF-Dämpfungscharakteristik zu bewerten. Darüber hinaus konnten weitere Anmerkungen zur erlebten Fahrt in einem offenen Format genannt werden.

Nach Erleben aller fünf LoF-Dämpfungscharakteristiken in einem Versuchsfahrzeug wurden die Experten abschließend gebeten, eine Rangreihenfolge unter den erlebten Varianten zu erstellen. Dabei war es auch möglich, einen Rangplatz doppelt zu vergeben oder freizulassen. Abschließend gab es auch hier im Rahmen eines offenen Items die Möglichkeit, allgemeine Kommentare abzugeben.

### **2.1.5 Studienablauf**

Die Durchführung der Expertenstudie erstreckte sich über insgesamt drei Tage. Die ersten beiden Tage dienten dabei der Erhebung der Subjektiv- und Objektivdaten zur Bewertung der Beherrschbarkeit der verschiedenen LoF-Dämpfungscharakteristiken. Der dritte Tag wurde dann genutzt, um die ausgewählte LoF-Charakteristik sowie das Warnkonzept für die Fehleraufschaltung mit Hinblick auf die nachfolgende Nutzerstudie zu bestätigen.

Im Rahmen der Datenerhebung bewerteten insgesamt neun Experten alle fünf LoF-Dämpfungscharakteristiken in den zwei Versuchsfahrzeugen (siehe Abb. 2-2). Um eine zeitlich effiziente Durchführung zu gewährleisten, wurden beide Fahrzeuge parallel auf der Teststrecke bewegt. So bewertete Experte A zunächst die fünf Varianten im ersten Fahrzeug, während Experte B parallel dazu die Bewertung im zweiten Fahrzeug durchführte. Nach einer kurzen Pause wechselten die Experten dann das Fahrzeug und beurteilten die LoF-Dämpfungscharakteristiken im jeweils anderen Fahrzeug. Die Abfolge der Varianten wurde für beide Fahrzeuge randomisiert, um Reihenfolgeeffekte in der Bewertung zu minimieren. Für die Bewertung der fünf Varianten waren pro Fahrzeug circa 90 Minuten vorgesehen.

Der Experte nahm auf dem Fahrersitz Platz. Zusätzlich befanden sich im Fahrzeug ein Fahrzeugbetreuer auf dem Beifahrersitz, der für die Fehleraufschaltung des LoF und die Objektivdatenaufzeichnung zuständig war, sowie eine Versuchsleitung auf dem Rücksitz, die die Instruktion der Experten und die Erhebung der Subjektivdaten durchführte. Zu Beginn fuhr jeder Experte ein bis zwei Runden durch den festgelegten Parcours (siehe Abb. 2-3), um sich an das jeweilige Versuchsfahrzeug zu gewöhnen und den Parcours sowie die definierten Fahr-szenarien kennenzulernen. Nachfolgend absolvierte jeder Experte fünf weitere Runden durch den Parcours. In jeder Runde erfolgte in der Kreisfahrt nach rechts die Aufschaltung des LoF-Erstfehlers einhergehend mit dem Rückfall auf die passive HWA-Rückfallebene mit einer der fünf vorgegebenen LoF-Dämpfungscharakteristiken. Mit der passiven LoF-Dämpfungscharakteristik durchfuhr der Experte auch die folgenden Fahr-szenarien (Abbiegen, Adaption, Kreisverkehr) und kehrte im Anschluss an die Runde zum Befragungspunkt außerhalb der Strecke zurück. Am Befragungspunkt und füllte der Experte die Befragungen zur isolierten Bewertung der LoF-Dämpfungscharakteristik in den einzelnen Fahr-szenarien und zur gesamthaften Bewertung über den Parcours hinweg aus. Nach der Durchführung der Fahrten mit allen fünf LoF-Dämpfungscharakteristiken erfolgte abschließend noch die vergleichende Bewertung (siehe Kapitel 2.1.4.2).

## 2.2 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden sowohl die Ergebnisse der Auswertung und Analyse der Objektiv- als auch der Subjektivdaten jeweils getrennt für die beiden Versuchsfahrzeuge beschrieben.

### 2.2.1 Objektivdaten

Die Auswertung der während der Expertenstudie aufgezeichneten Objektivdaten erfolgte auf Basis des in Kapitel 2.1.4.1 in Grundzügen beschriebenen Post-Processing- und Auswertungsprozesses. Im Folgenden wird zunächst allgemein anhand von ausgesuchten Beispielen auf die angewendete Auswertemethodik, die erzeugten Datenplots sowie die berechneten szenarienabhängigen Kennwerte eingegangen. Im Anschluss daran werden in den Kapiteln 2.2.1.1 und 2.2.1.2 die aggregierten Ergebnisse der Objektivdatenauswertung für die Versuche mit den beiden Versuchsfahrzeugen vorgestellt.

Abb. 2-5 zeigt exemplarisch einen Messdatenplot der relevanten objektiven Fahrzeugmessgrößen während des Fahr Szenarios „Kreisfahrt mit LoF-Erstfehleraufschaltung“. Bei den im Messdatenplot dargestellten Messgrößen handelt es sich um die Fahrgeschwindigkeit, die Querbeschleunigung, die Gierrate sowie die relevanten Messgrößen am HWA (Lenkwinkel, Lenkrate, Lenkmoment am Lenkrad). Der Zeitpunkt der LoF-Fehleraufschaltung ( $t = 3$  s) ist in den einzelnen Datenplots markiert. Für die LoF-Fehleraufschaltung während der Kreisfahrt wurden im Rahmen der Objektivdatenauswertung für jede Messung die Störeinflüsse auf den Regelkreis Fahrer-Lenkung-Fahrzeug berechnet. Die Berechnung der Störeinflüsse in Bezug auf die HWA-Messgrößen Lenkwinkel und Lenkrate sowie die resultierenden Fahrzeuggrößen Querbeschleunigung und Gierrate sind exemplarisch in Abb. 2-6 dargestellt.

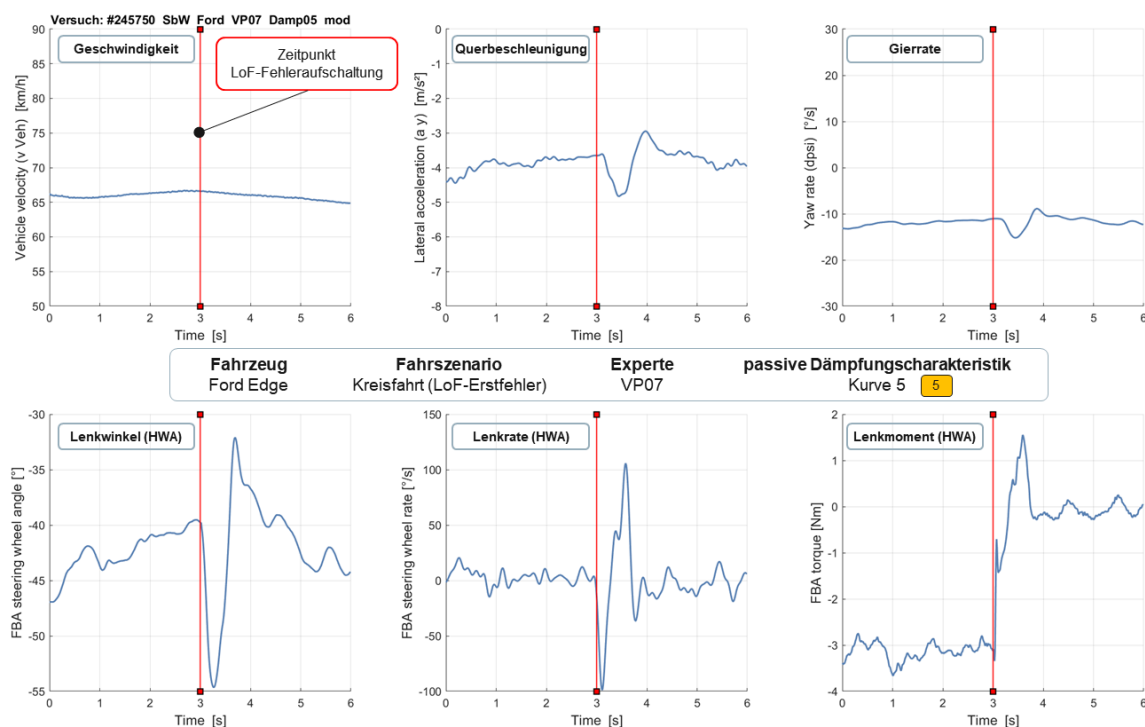


Abb. 2-5: Exemplarischer Messdatenplot  
(Ford Edge, Kreisfahrt mit LoF-Erstfehleraufschaltung, Dämpfungscharakteristik 5)

Neben dem Mittelwert der entsprechenden Messgröße während der stationären Kreisfahrt vor der LoF-Fehlerrückmeldung wird der maximale Ausschlag der Messgröße in einem definierten Zeitintervall direkt nach der LoF-Fehlerrückmeldung bestimmt. Die Differenz zwischen dem Mittelwert der Messgröße vor der Fehlerrückmeldung und dem ermittelten Maximalausschlag bildet den Störeinfluss, den der LoF-Fehler in dem betrachteten Fahrszenario auf den Regelkreis Lenkung-Fahrer-Fahrzeug hat. In der exemplarischen Messung in Abb. 2-6 beträgt der ermittelte individuelle Störeinfluss auf den HWA-Lenkswinkel  $\Delta\delta_h = 13.029^\circ$ , die maximale Störleakrate  $d\delta_{h,Peak} = 98.932^\circ/s$ , der Störeinfluss auf die Querbewegung  $\Delta a_y = 1.024 \text{ m/s}^2$  und der maximale Störeinfluss auf die Gierrate  $\Delta d\psi = 3.481^\circ/s$ . Die Berechnung der individuellen Störeinflüsse wurde für jeden Messdatensatz (Fahrt eines Experten mit einer spezifischen LoF-Dämpfungscharakteristik) durchgeführt. Dies ermöglicht in den nachfolgenden Kapiteln für das Fahrszenario „Kreisfahrt mit LoF-Fehlerrückmeldung“ eine vergleichende Auswertung des Störeinflusses in Abhängigkeit des Versuchsfahrzeugs und der aufgeschalteten LoF-Dämpfungscharakteristik.

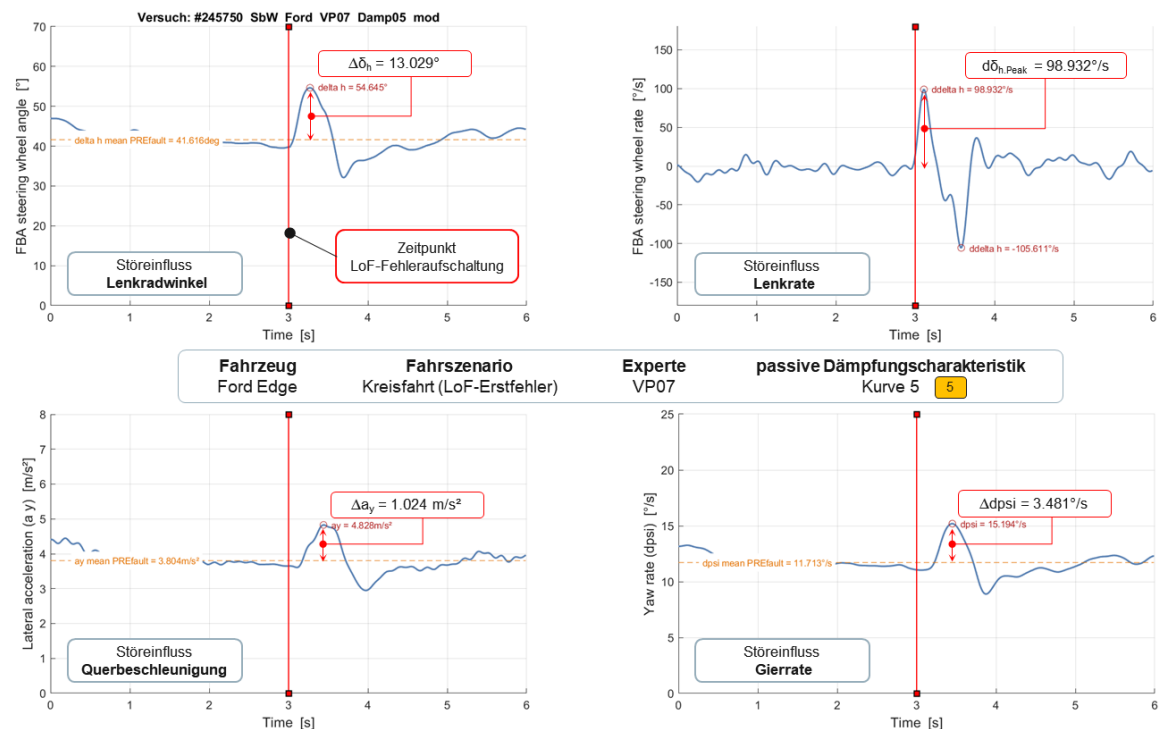


Abb. 2-6: Beispiel – Berechnung der Störeinflüsse infolge der LoF-Erstfehleraufschaltung (Ford Edge, Kreisfahrt mit LoF-Erstfehleraufschaltung, Dämpfungscharakteristik 5)

In einem weiteren Schritt der Objektivdatenauswertung wurden für das Fahrszenario „Kreisfahrt mit LoF-Erstfehleraufschaltung“ die Messdatenverläufe aller Messungen mit der gleichen LoF-Dämpfungscharakteristik gemittelt und so in einen gemittelten Signalverlauf überführt.

Abb. 2-7 zeigt ein Beispiel für die Mittelung der Verläufe des Lenkwinkels und der Lenkrate über alle absolvierten Fahrten der Experten im Ford Edge mit LoF-Dämpfungscharakteristik 5

im Fahrszenario „Kreisfahrt mit LoF-Fehlerrückmeldung“. Die aus der Mittelung gewonnen gemittelten Signalverläufe ermöglichen im Weiteren einen aggregierten Vergleich der sich für die einzelnen Dämpfungscharakteristiken in den beiden Versuchsfahrzeug ergebenden Störeinflüsse infolge der LoF-Fehlerrückmeldung.

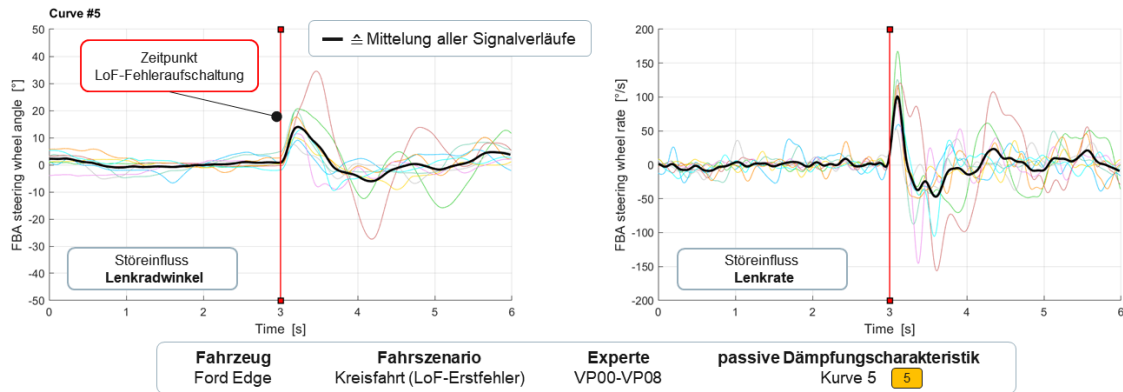


Abb. 2-7: Beispiel - Mittelung der Signalverläufe über alle Experten  
(Ford Edge, Kreisfahrt mit LoF-Erstfehler, Dämpfungscharakteristik 5)

Für die Fahrszenarien „Abbiegen nach links“ und „Kreisverkehr“ im Rahmen der LoF-Adaption (d.h. Fahren mit bekanntem LoF-Fehler) wurden für die durchgeführten Expertenfahrten die Maximalwerte relevanter Lenkungsgrößen ermittelt, um die Bandbreite dieser Größen in Abhängigkeit der gefahrenen LoF-Dämpfungscharakteristik bewerten zu können. Bei den relevanten Lenkungsgrößen handelt es sich um:

- die max. Lenkwinkelamplituden (beim Abbiegen nach links bzw. im Kreisverkehr und bei der Ausfahrt aus dem Kreisverkehr),
- die max. Lenkraten am HWA (Einlenken und Zurücklenken beim Abbiegen bzw. Einfahrt und Ausfahrt Kreisverkehr) und
- die max. Lenkmomente am HWA (Abbiegen und Zurücklenken bzw. während der Einfahrt und Ausfahrt in den Kreisverkehr).

Abb. 2-8 zeigt exemplarisch die Ermittlung der Lenkgrößen für eine Messung während eines Abbiegevorgangs nach links. Sowohl für die Lenkrate als auch für das Lenkmoment wurden jeweils Kennwerte für das Einlenken (Aufbau des Lenkwinkels) sowie das anschließende Zurücklenken in die Geradeausposition des Lenkrades ermittelt (siehe auch Anhang Abb. 6-2).

Abb. 2-9 zeigt analog die Ermittlung der Lenkgrößen für eine Messung des Fahrszenarios „Kreisverkehr“. Für den Lenkwinkel wurde neben dem maximalen Lenkwinkel während der Fahrt im Kreisverkehr auch die Lenkwinkelamplitude bei der Ausfahrt aus dem Kreisverkehr ermittelt. Für die Lenkrate und das Lenkmoment wurden die Kennwerte für die Einfahrt und die Ausfahrt aus dem Kreisverkehr bestimmt (siehe auch Anhang Abb. 6-3).

Die Ergebnisse der durchgeführten Auswertungen der Objektivdaten der Expertenfahrten werden in den folgenden beiden Unterkapiteln getrennt für die beiden Versuchsfahrzeuge zusammengefasst und erläutert.

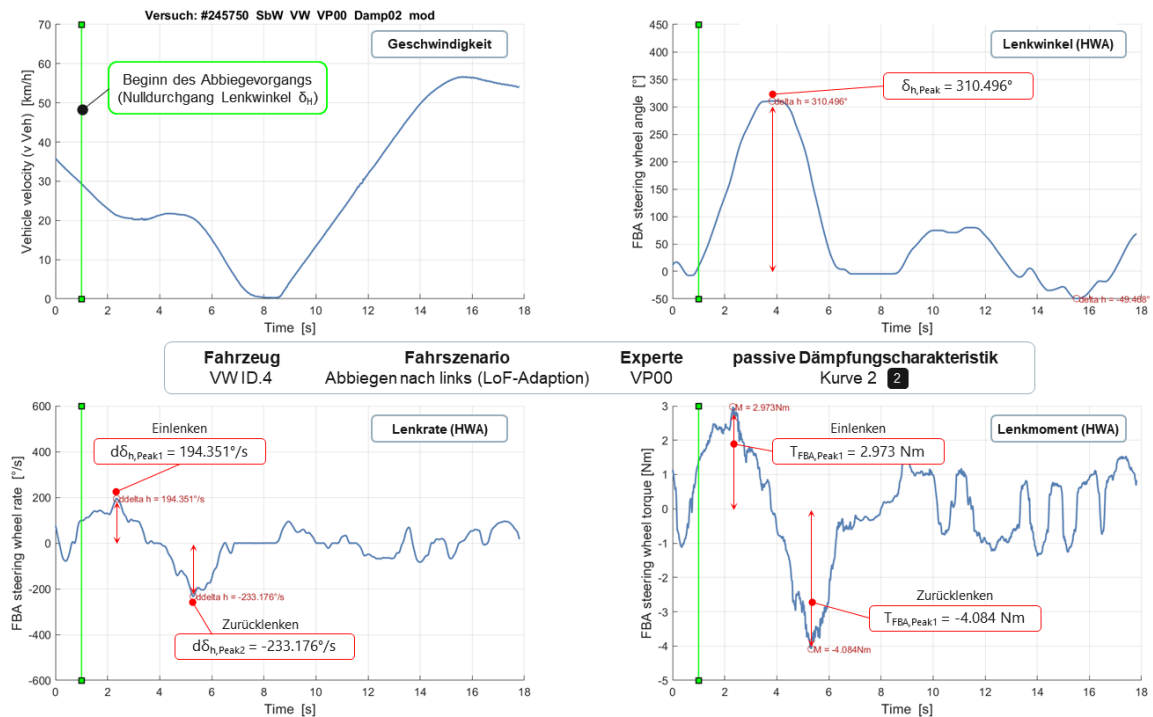


Abb. 2-8: Beispiel – Berechnung Lenkenngrößen – Abbiegen nach links (LoF-Adaption) (VW ID.4, Dämpfungscharakteristik 2)

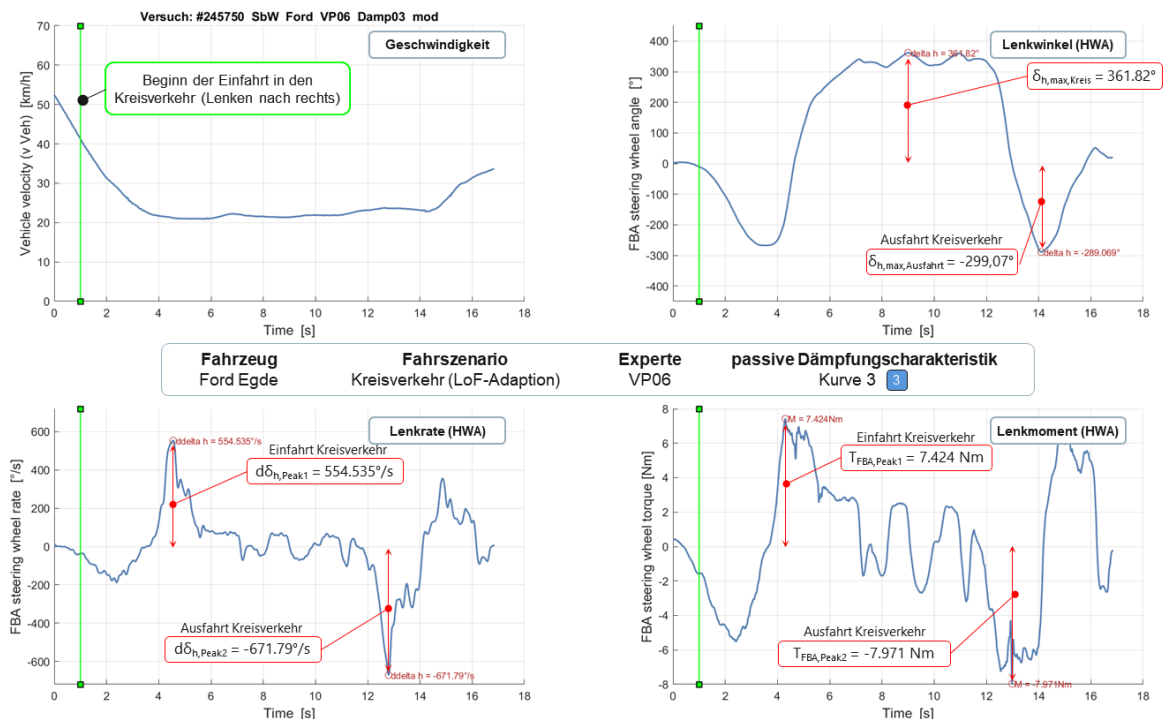


Abb. 2-9: Beispiel – Berechnung Lenkenngrößen – Kreisverkehr (LoF-Adaption) (Ford Edge, Dämpfungscharakteristik 3)

### 2.2.1.1 Ford Edge

Die Störeinflüsse der LoF-Fehlerrückmeldung in Abhängigkeit der verwendeten LoF-Dämpfungscharakteristik während des Fahr Szenarios „Kreisfahrt“ für den Ford Edge sind in Abb. 2-10 anhand der gemittelten Signalverläufe (Mittelung über alle Expertenfahrten mit der entsprechenden LoF-Dämpfungscharakteristik im Ford Edge) dargestellt. Die Messdaten zeigen, dass die größten Störeinflüsse für Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) auftreten. Dämpfungscharakteristik 2 ist vorrangig durch den späten Einlaufpunkt charakterisiert, der die großen Störeinflüsse infolge der LoF-Fehlerrückmeldung begünstigt. Für die übrigen vier Dämpfungscharakteristiken nehmen die Störeinflüsse mit zunehmender Maximalkraft und Steigung ab. Während bei der LoF-Fehlerrückmeldung mit Dämpfungscharakteristik 5 (gelb) mit einer geringen Maximalkraft und einer geringen Steigung im Mittel ebenfalls größere Störeinflüsse erkennbar sind, so fallen bei Dämpfungscharakteristik 1 (rot) mit hoher Maximalkraft und hoher Steigung die Störeinflüsse am geringsten aus. Die Gesamtheit der individuell ermittelten Störeinflüsse für die LoF-Fehlerrückmeldung während der Kreisfahrt ist in Abb. 2-11 dargestellt. Die zugehörigen Mittelwerte der Störeinflüsse sowie die ermittelten Minimal- und Maximalwerte für die einzelnen LoF-Dämpfungscharakteristiken sind in Tab. 2-2 zusammengefasst.

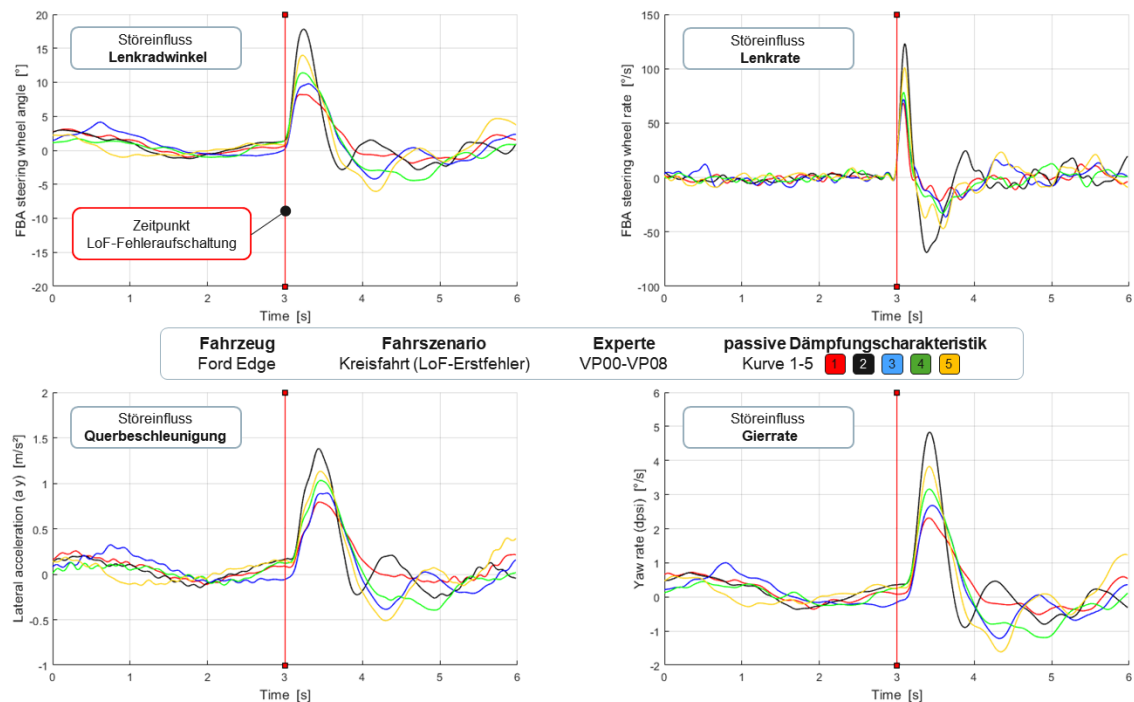


Abb. 2-10: Gemittelte Signalverläufe (Signalverläufe über alle Studienteilnehmer gemittelt) (Ford Edge, Kreisfahrt mit LoF-Erstfehler)

Der Störeinfluss auf den Lenkradwinkel infolge der LoF-Fehlerrückmeldung beträgt im Mittel zwischen 9.19° (Dämpfungscharakteristik 1, rot) und 20.23° (Dämpfungscharakteristik 2, schwarz). Die Störeinflüsse für die Querbeschleunigung und die Gierrate betragen im Mittel zwischen 0.87 m/s<sup>2</sup> und 1.48 m/s<sup>2</sup> bzw. 2.47°/s und 5.26°/s (siehe Tab. 2-2).

| Störeinfluss                           | Kennwert |      | Kurve 1 |       | Kurve 2 |       | Kurve3 |       | Kurve 4 |       | Kurve 5 |       |
|----------------------------------------|----------|------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|---------|-------|---------|-------|
| Lenkradwinkel [°]                      | Mean     |      | 9.19    |       | 20.23   |       | 10.66  |       | 11.78   |       | 16.0    |       |
|                                        | Min.     | Max. | 5.95    | 12.26 | 9.09    | 34.05 | 7.59   | 15.01 | 2.67    | 19.87 | 7.57    | 35.5  |
| Lenkrate [°/s]                         | Mean     |      | 69.85   |       | 125.22  |       | 75.18  |       | 81.52   |       | 102.95  |       |
|                                        | Min.     | Max. | 41.22   | 90.12 | 73.35   | 159.6 | 37.35  | 105.2 | 57.22   | 128.1 | 52.76   | 167.3 |
| Querbesehleunigung [m/s <sup>2</sup> ] | Mean     |      | 0.87    |       | 1.48    |       | 0.97   |       | 1.08    |       | 1.24    |       |
|                                        | Min.     | Max. | 0.47    | 1.19  | 0.42    | 2.40  | 0.61   | 1.38  | 0.19    | 1.92  | 0.56    | 2.66  |
| Gierrate [°/s]                         | Mean     |      | 2.47    |       | 5.26    |       | 2.90   |       | 3.22    |       | 4.26    |       |
|                                        | Min.     | Max. | 1.43    | 3.35  | 2.21    | 8.37  | 1.96   | 3.87  | 0.63    | 5.46  | 2.03    | 8.40  |

Tab. 2-2: Kennwerte der Störeinflüsse (Mittelwert, Minimum, Maximum)  
(Ford Edge, Kreisfahrt mit LoF-Erstfehleraufschaltung)

Hinsichtlich der Verteilung und Streuung der ermittelten Kennwerte ist in Abb. 2-11 zu erkennen, dass die Streuung der Störeinflüsse für die LoF-Dämpfungscharakteristiken mit einem höheren Kraftniveau und einer höheren Steigung (z.B. Dämpfungscharakteristik 1, rot und Dämpfungscharakteristik 3, blau) geringer ausfällt als für die Dämpfungscharakteristiken mit einem geringen Kraftniveau und geringerer Steigung (z.B. Dämpfungscharakteristik 4, grün und Dämpfungscharakteristik 5, gelb).

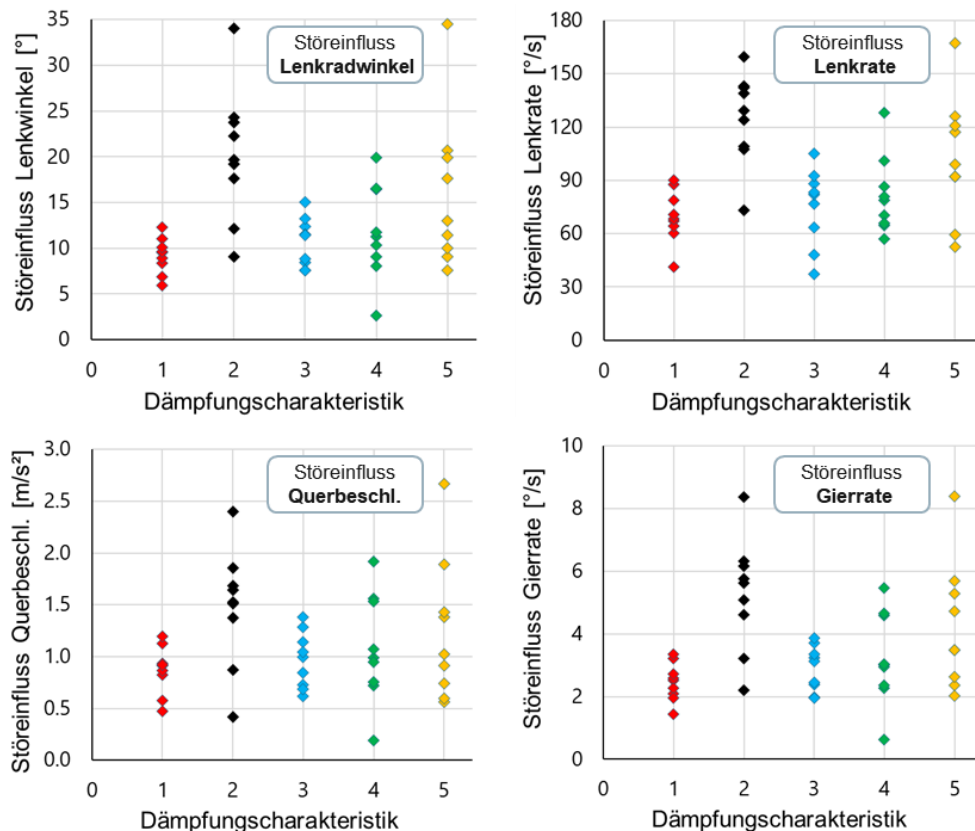


Abb. 2-11: Kennwerte der Störeinflüsse aller Studienteilnehmer  
(Ford Edge, Kreisfahrt mit LoF-Erstfehleraufschaltung)

Die ermittelten Kennwerte der Lenkgrößen für die Fahrsczenarien „Abbiegen nach links“ und „Kreisverkehr“ im Rahmen der LoF-Adaption für den Ford Edge sind in Tab. 2-3 und Tab. 2-4

zusammengefasst. In den Tabellen sind jeweils die Mittelwerte der Kenngröße (Mittelwert aller Fahrten der Experten mit einer LoF-Dämpfungscharakteristik) sowie die jeweiligen Minimal- und Maximalwerte der ermittelten Lenkgrößen angegeben.

Die gemessenen Lenkraten beim Einlenken liegen für alle LoF-Dämpfungscharakteristiken im Bereich zwischen circa 150°/s und 400°/s, der Mittelwert liegt circa bei 250°/s. Die Lenkraten beim Zurücklenken in die Nulllage (Geradausstellung des Lenkrades) liegen für alle Dämpfungscharakteristiken in einem ähnlichen Bereich (circa 150°/s bis 450°/s). Die mittleren Lenkraten der Dämpfungscharakteristiken mit geringerem Kraftniveau (Dämpfungscharakteristik 3, blau; Dämpfungscharakteristik 4, grün; Dämpfungscharakteristik 5, gelb) sind etwas höher und liegen im Bereich über 300°/s (siehe Tab. 2-3). Die Streuungen der gemessenen Werte für die einzelnen Dämpfungscharakteristiken liegen – mit Ausnahme der Streuung für die minimalen und maximalen Lenkmomente bei Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) auf einem ähnlichen Niveau (siehe Anhang Abb. 6-4).

| Kenngröße                                     | Kennwert  | Kurve 1 |        | Kurve 2 |        | Kurve3 |        | Kurve 4 |        | Kurve 5 |        |
|-----------------------------------------------|-----------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|
| <b>Max. Lenkrate</b> [°/s]<br>(Einlenken)     | Mean      | 245.49  |        | 212.36  |        | 250.62 |        | 271.65  |        | 266.40  |        |
|                                               | Min. Max. | 174.9   | 363.9  | 138.5   | 306.9  | 149.0  | 395.8  | 163.6   | 436.1  | 151.7   | 376.7  |
| <b>Min. Lenkrate</b> [°/s]<br>(Zurücklenken)  | Mean      | -272.51 |        | 247.01  |        | 347.28 |        | -332.19 |        | -307.92 |        |
|                                               | Min. Max. | -433.5  | -163.2 | -344.7  | -142.7 | -510.6 | -159.1 | -566.2  | -188.0 | -431.5  | -209.3 |
| <b>Max. Lenkmoment</b> [Nm]<br>(Einlenken)    | Mean      | 7.06    |        | 4.27    |        | 6.11   |        | 4.67    |        | 3.07    |        |
|                                               | Min. Max. | 6.26    | 7.93   | 1.68    | 6.6    | 4.88   | 6.82   | 3.83    | 5.47   | 2.36    | 3.76   |
| <b>Min. Lenkmoment</b> [Nm]<br>(Zurücklenken) | Mean      | -7.29   |        | -5.01   |        | -6.56  |        | -5.04   |        | -3.25   |        |
|                                               | Min. Max. | -8.36   | -5.92  | -7.02   | -1.48  | -7.53  | -5.12  | -6.11   | -4.20  | -3.61   | -2.81  |

Tab. 2-3: Kennwerte der Lenkgrößen – Abbiegen nach links (LoF-Adaption)  
(Ford Edge)

Tab. 2-4 zeigt die ermittelten Kennwerte der Lenkgrößen für das Fahrscenario „Kreisverkehr“. Bei Einfahrt in den Kreisverkehr liegen die Lenkraten für alle Dämpfungscharakteristiken im Bereich zwischen circa 340°/s und 780°/s, der Mittelwert liegt circa bei 475°/s. Bei der Ausfahrt aus dem Kreisverkehr sind die ermittelten Werte etwas höher und liegen im Bereich zwischen circa 350°/s und 840°/s. Der Mittelwert liegt bei circa bei 530°/s. Die Streuungen der gemessenen Werte für die minimalen und maximalen Lenkraten bei den einzelnen Dämpfungscharakteristiken variieren leicht, liegen aber auf einem ähnlichen Niveau (siehe Anhang Abb. 6-5).

| Kenngröße                                              | Kennwert  | Kurve 1 |        | Kurve 2 |        | Kurve3  |        | Kurve 4 |        | Kurve 5 |        |
|--------------------------------------------------------|-----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| <b>Max. Lenkrate</b> [°/s]<br>(Einfahrt Kreisverkehr)  | Mean      | 490.24  |        | 524.0   |        | 473.95  |        | 460.7   |        | 423.27  |        |
|                                                        | Min. Max. | 373.2   | 787.6  | 370.1   | 713.2  | 410.8   | 594.6  | 337.9   | 768.9  | 351.3   | 518.1  |
| <b>Min. Lenkrate</b> [°/s]<br>(Ausfahrt Kreisverkehr)  | Mean      | -532.40 |        | -566.3  |        | -514.62 |        | -537.63 |        | -489.6  |        |
|                                                        | Min. Max. | -845.5  | -368.2 | -801.7  | -469.5 | -671.8  | -340.8 | -495.6  | -348.3 | -684.6  | -348.3 |
| <b>Max. Lenkmoment</b> [Nm]<br>(Einfahrt Kreisverkehr) | Mean      | 8.48    |        | 8.21    |        | 7.27    |        | 5.64    |        | 3.57    |        |
|                                                        | Min. Max. | 8.05    | 9.22   | 7.65    | 8.81   | 6.95    | 7.80   | 5.21    | 6.45   | 3.35    | 3.76   |
| <b>Min. Lenkmoment</b> [Nm]<br>(Ausfahrt Kreisverkehr) | Mean      | -8.49   |        | -8.70   |        | -7.36   |        | -6.01   |        | -3.88   |        |
|                                                        | Min. Max. | -9.19   | -8.03  | -9.57   | -8.02  | -7.97   | -6.78  | -7.60   | -5.28  | -4.19   | -3.47  |

Tab. 2-4: Kennwerte der Lenkgrößen – Kreisverkehr (LoF-Adaption)  
(Ford Edge)

Die Höhe der während der Einfahrt und der Ausfahrt aus dem Kreisverkehr gemessenen maximal auftretenden Lenkmomente ist abhängig von der jeweils angewendeten LoF-Dämpfungscharakteristik und weist dementsprechend große Unterschiede auf (im Mittel 8.48 Nm bei Dämpfungscharakteristik 1 (rot) und 3.57 Nm bei Dämpfungscharakteristik 5 (gelb)). Die Streuungen der Werte für das minimale und maximale Lenkmoment während der Einfahrt beziehungsweise Ausfahrt aus dem Kreisverkehr liegen für alle fünf Dämpfungscharakteristiken auf einem ähnlichen Niveau (siehe Anhang Abb. 6-5). Die Streubreite beträgt circa 1 bis 1.5 Nm.

### 2.2.1.2 VW ID.4

Die während der Expertenfahrten ermittelten Störeinflüsse infolge der LoF-Fehlerrückmeldung während des Fahr Szenarios „Kreisfahrt“ sind in Abb. 2-12 dargestellt. Auch in dieser Abbildung sind wieder die gemittelten Signalverläufe aller Expertenfahrten für die jeweilige Dämpfungscharakteristik dargestellt. Die größten Störeinflüsse infolge der LoF-Fehlerrückmeldung treten beim VW ID.4 für die Dämpfungscharakteristiken 2 (schwarz) und 5 (gelb) auf. Beide LoF-Dämpfungscharakteristiken besitzen einen identischen Einlaufpunkt, unterscheiden sich aber in ihrem weiteren Verlauf. Die geringsten Störeinflüsse treten auch beim VW ID.4 für Dämpfungscharakteristik 1 (rot) auf, die die höchste Steigung und die höchste Maximalkraft aufweist.

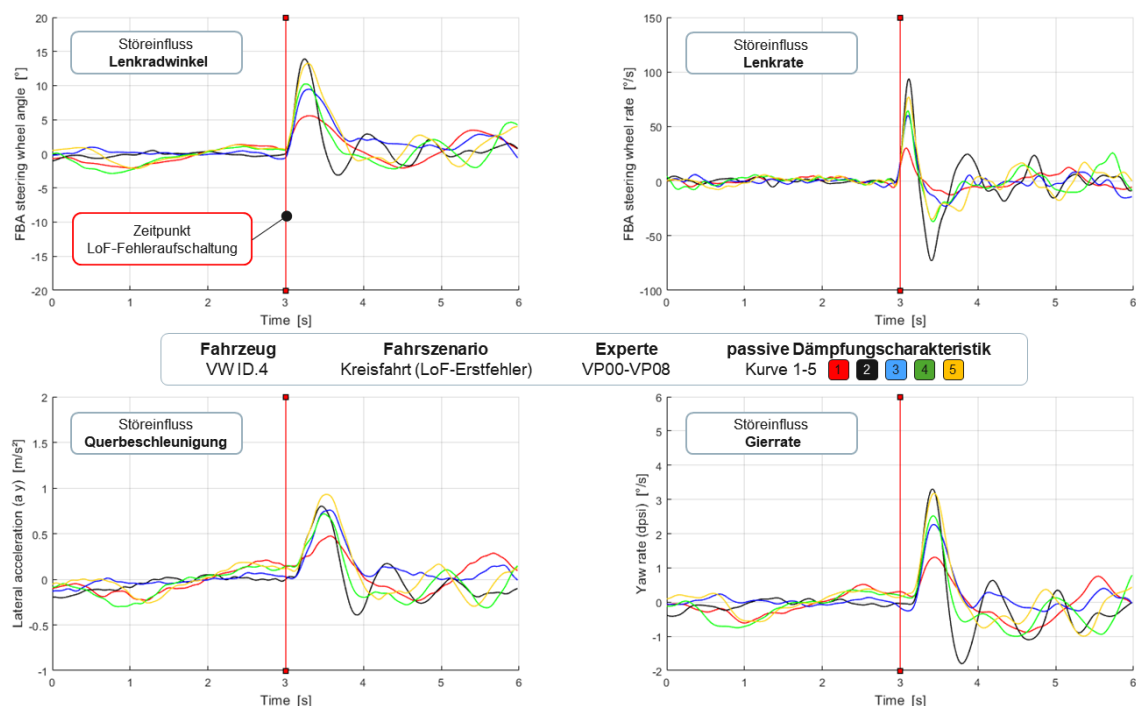


Abb. 2-12: Gemittelte Signalverläufe (Signalverläufe über alle Studienteilnehmer gemittelt) (VW ID.4, Kreisfahrt mit LoF-Erstfehleraufschaltung)

Die Gesamtheit der individuell ermittelten Störeinflüsse für die LoF-Fehlerrückmeldung während der Kreisfahrt ist in Abb. 2-13 dargestellt. Die zugehörigen Mittelwerte der Störeinflüsse sowie die ermittelten Minimal- und Maximalwerte für die einzelnen LoF-Dämpfungscharakteristiken im VW ID.4 sind in Tab. 2-5 zusammengefasst.

Die Höhe der einzelnen Störeinflüsse infolge der LoF-Fehlerrückmeldung liegen beim VW ID.4 im Vergleich zum Ford Edge auf einem ähnlichen Niveau. Auch die Streubreite der individuell ermittelten Störeinflüsse während der Kreisfahrt ist in beiden Versuchsfahrzeugen vergleichbar (siehe Anhang Abb. 6-1).

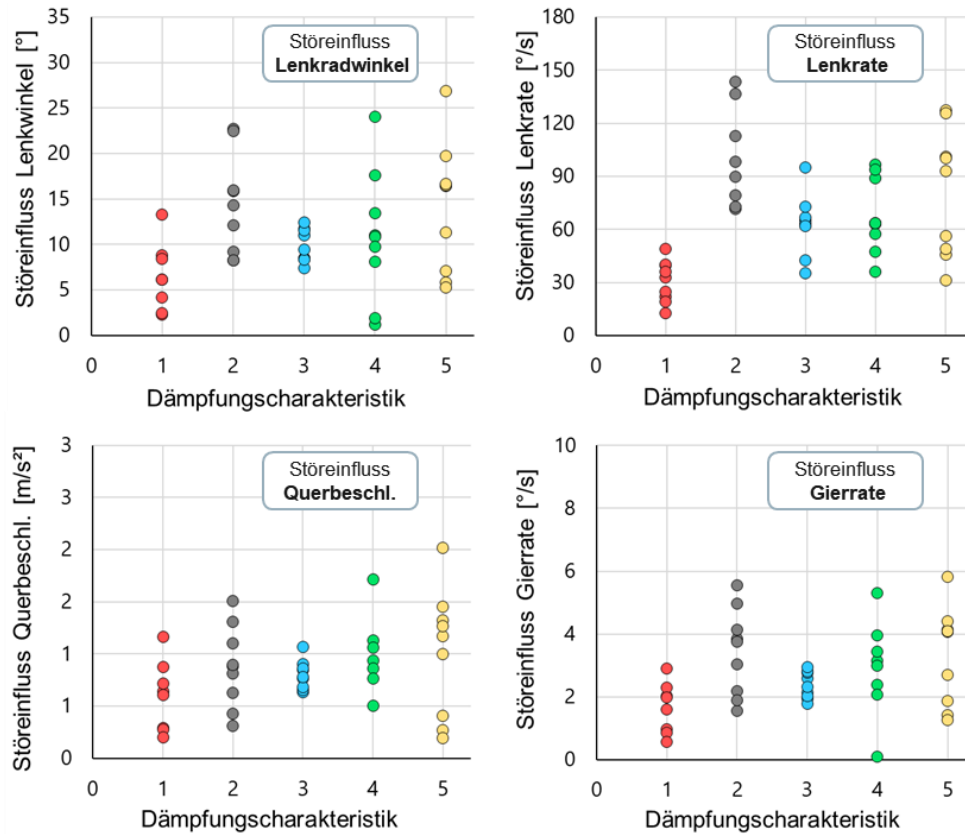


Abb. 2-13: Kennwerte der Störeinflüsse aller Studienteilnehmer (VW ID.4, Kreisfahrt mit LoF-Erstfehlerrückmeldung)

| Störeinfluss              | Kennwert  | Kurve 1 |       | Kurve 2 |       | Kurve 3 |       | Kurve 4 |       | Kurve 5 |       |
|---------------------------|-----------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| Lenkwinkel [°]            | Mean      | 5.68    |       | 14.35   |       | 9.88    |       | 10.87   |       | 13.96   |       |
|                           | Min. Max. | 0.41    | 13.28 | 8.27    | 22.70 | 7.42    | 12.46 | 1.2     | 24.01 | 5.29    | 26.89 |
| Lenkrate [°/s]            | Mean      | 30.80   |       | 97.54   |       | 62.91   |       | 67.92   |       | 81.14   |       |
|                           | Min. Max. | 12.80   | 49.04 | 71.64   | 143.6 | 35.34   | 95.25 | 36.32   | 96.58 | 31.23   | 127.4 |
| Querbeschleunigung [m/s²] | Mean      | 0.52    |       | 0.88    |       | 0.80    |       | 0.77    |       | 1.01    |       |
|                           | Min. Max. | 0.09    | 1.16  | 0.31    | 1.51  | 0.64    | 1.07  | 0.03    | 1.71  | 0.20    | 2.02  |
| Gierrate [°/s]            | Mean      | 1.44    |       | 3.44    |       | 2.37    |       | 2.60    |       | 3.31    |       |
|                           | Min. Max. | 0.20    | 2.90  | 1.56    | 5.55  | 1.77    | 2.94  | 0.01    | 5.31  | 1.27    | 5.82  |

Tab. 2-5: Kennwerte der Störeinflüsse (Mittelwert, Minimum, Maximum) (VW ID.4, Kreisfahrt mit LoF-Erstfehlerrückmeldung)

Die während der Expertenfahrten im VW ID.4 ermittelten Kennwerte der Lenkgrößen für die LoF-Adaptionsszenarien „Abbiegen nach links“ und „Kreisverkehr“ sind in Tab. 2-6 und Tab. 2-7 zusammengefasst. In den Tabellen sind jeweils die Mittelwerte der Kenngrößen (Mittelwert

aller Fahrten der Experten mit einer LoF-Dämpfungscharakteristik) sowie die jeweiligen Minimal- und Maximalwerte der ermittelten Kenngrößen angegeben.

Die gemessenen Lenkraten beim Einlenken liegen für alle LoF-Dämpfungscharakteristiken im Bereich zwischen circa 150°/s und 400°/s, der Mittelwert liegt circa bei 230°/s. Dies entspricht den im Ford Edge gemessenen Lenkraten beim Einlenken (vgl. Tab. 2-3). Die Lenkraten beim Zurücklenken in die Nulllage (Geradausstellung des Lenkrades) liegen für alle Dämpfungscharakteristiken in einem ähnlichen Bereich (circa 150°/s bis 520°/s).

| Kenngröße                                     | Kennwert  | Kurve 1 |        | Kurve 2 |        | Kurve 3 |        | Kurve 4 |        | Kurve 5 |        |
|-----------------------------------------------|-----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| <b>Max. Lenkrate</b> [°/s]<br>(Einlenken)     | Mean      | 236.10  |        | 237.73  |        | 215.42  |        | 248.27  |        | 225.12  |        |
|                                               | Min. Max. | 148.4   | 338.0  | 140.3   | 395.8  | 148.1   | 275.6  | 145.9   | 386.9  | 143.8   | 285.5  |
| <b>Min. Lenkrate</b> [°/s]<br>(Zurücklenken)  | Mean      | -309.34 |        | -262.42 |        | -257.74 |        | -282.08 |        | -296.9  |        |
|                                               | Min. Max. | -521.3  | -156.9 | -436.1  | -162.2 | -362.7  | -171.1 | -489.6  | -166.0 | -430.1  | -164.8 |
| <b>Max. Lenkmoment</b> [Nm]<br>(Einlenken)    | Mean      | -       |        | 3.76    |        | 6.00    |        | 4.22    |        | 3.51    |        |
|                                               | Min. Max. | -       | -      | 2.44    | 5.94   | 4.58    | 7.07   | 3.11    | 5.48   | 2.58    | 4.24   |
| <b>Min. Lenkmoment</b> [Nm]<br>(Zurücklenken) | Mean      | -       |        | -4.56   |        | -7.177  |        | -5.07   |        | -4.48   |        |
|                                               | Min. Max. | -       | -      | -6.65   | -3.00  | -8.66   | -5.86  | -6.45   | -3.85  | -5.23   | -3.32  |

Tab. 2-6: Kennwerte der Lenkgrößen – Abbiegen nach links (LoF-Adaption)  
(VW ID.4)

Dies Spitzenwerte für die Lenkrate liegen damit beim Zurücklenken im VW ID.4 etwas über den im Ford Edge gemessenen Werten. Die Streuungen der ermittelten Kennwerte für die Lenkrate und das Lenkmoment liegen für die fünf LoF-Dämpfungscharakteristiken auf einem sehr ähnlichen Niveau (siehe Anhang Abb. 6-4). Die Höhe der während des Einlenkens und des Zurücklenkens gemessenen maximal auftretenden Lenkmomente ist abhängig von der jeweils angewendeten Dämpfungscharakteristik. Für LoF-Dämpfungscharakteristik 1 (rot) liegen die Messwerte außerhalb des Messbereichs der im Versuchsfahrzeug verbauten Sensorik, weshalb in Tab. 2-6 keine Lenkmomente für diese Lenkungscharakteristik angegeben sind.

Die im Rahmen der Expertenfahrten mit dem VW ID.4 ermittelten Kennwerte der Lenkgrößen für das Fahrscenario „Kreisverkehr“ sind in Tab. 2-7 zusammengefasst.

| Kenngröße                                              | Kennwert  | Kurve 1 |        | Kurve 2 |        | Kurve 3 |        | Kurve 4 |        | Kurve 5 |        |
|--------------------------------------------------------|-----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| <b>Max. Lenkrate</b> [°/s]<br>(Einfahrt Kreisverkehr)  | Mean      | 641.21  |        | 416.86  |        | 454.28  |        | 409.39  |        | 432.06  |        |
|                                                        | Min. Max. | 414.5   | 911.3  | 316.2   | 681.7  | 316.5   | 702.2  | 276.3   | 584.3  | 328.8   | 720.6  |
| <b>Min. Lenkrate</b> [°/s]<br>(Ausfahrt Kreisverkehr)  | Mean      | -531.14 |        | -448.23 |        | -454.83 |        | -474.97 |        | -420.80 |        |
|                                                        | Min. Max. | -756.6  | -309.7 | -583.8  | -363.9 | -729.6  | -337.6 | -893.4  | -312.3 | -640.8  | -354.2 |
| <b>Max. Lenkmoment</b> [Nm]<br>(Einfahrt Kreisverkehr) | Mean      | -       |        | 5.92    |        | 8.02    |        | 5.18    |        | 4.36    |        |
|                                                        | Min. Max. | -       | -      | 4.94    | 8.18   | 7.47    | 8.26   | 4.62    | 5.66   | 4.03    | 4.67   |
| <b>Min. Lenkmoment</b> [Nm]<br>(Ausfahrt Kreisverkehr) | Mean      | -       |        | -6.97   |        | -8.94   |        | -5.89   |        | -5.07   |        |
|                                                        | Min. Max. | -       | -      | -8.95   | -5.82  | -9.56   | -8.23  | -6.86   | -5.27  | -5.85   | -4.56  |

Tab. 2-7: Kennwerte der Lenkgrößen – Kreisverkehr (LoF-Adaption)  
(VW ID.4)

Bei der Einfahrt in den Kreisverkehr liegen die Lenkraten für alle LoF-Dämpfungscharakteristiken im Bereich zwischen circa 280°/s und 720°/s, der Mittelwert liegt circa bei 470°/s. Bei der Ausfahrt aus dem Kreisverkehr sind die ermittelten Werte etwas höher und liegen im Bereich zwischen circa 300°/s bis 760°/s. Der Mittelwert liegt ebenfalls bei circa bei 465°/s. Die Streuungen der ermittelten Kennwerte der Lenkraten für die fünf LoF-Dämpfungscharakteristiken liegen auch hier auf einem ähnlichen Niveau (siehe Anhang Abb. 6-5). Die Höhe der während der Einfahrt und der Ausfahrt aus dem Kreisverkehr gemessenen maximal auftretenden Lenkmomente ist abhängig von der jeweils angewendeten Dämpfungscharakteristik und weist dementsprechend große Unterschiede auf. Für Dämpfungscharakteristik 1 (rot) liegen auch beim Kreisverkehr die Messwerte außerhalb des Messbereichs der im Versuchsfahrzeug verbauten Sensorik, weshalb in Tab. 2-7 keine Lenkmomente für diese Lenkungscharakteristik angegeben sind.

## 2.2.2 Subjektivdaten

Im Rahmen der Subjektivdatenauswertung erfolgte eine deskriptive Auswertung der quantitativen Items. Die offenen Kommentare und Begründungen der Experten wurden im originalen Wortlaut übernommen und sind gesammelt im Anhang (siehe Abb. 6-6 bis Abb. 6-15) einzusehen. Die Datenanalyse erfolgte getrennt für beide Fahrzeuge. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt.

### 2.2.2.1 Ford Edge

Im Rahmen der individuellen Bewertung der fünf LoF-Dämpfungscharakteristiken schätzten die Experten die Kritikalität der Fahrsituation spezifisch für jedes der vier absolvierten Fahr-szenarien ein. Abb. 2-14 zeigt die Mittelwerte mit zugehörigen Standardabweichungen für jede LoF-Dämpfungscharakteristik für jedes Fahr-szenario.

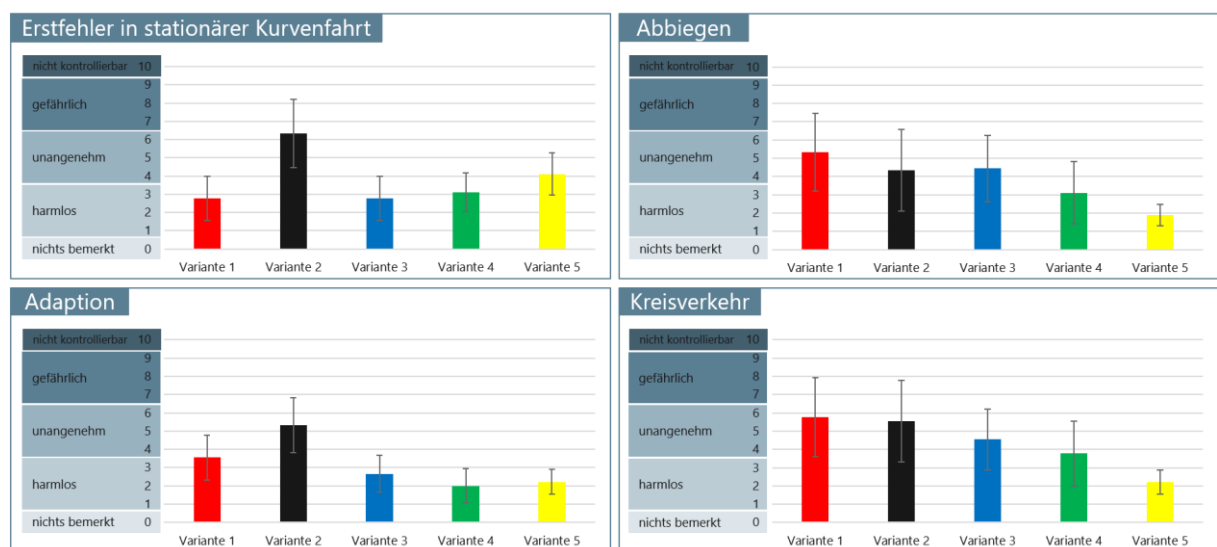


Abb. 2-14: Individuelle Kritikalitätsbewertung für die vier Fahr-szenarien (Ford Edge)

In der Situation der LoF-Fehlerrückmeldung während der Kurvenfahrt wurde Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) am kritischsten bewertet. Ebenfalls als „unangenehm“ wurde die Dämpfungscharakteristik 5 (gelb) empfunden. Die LoF-Dämpfungscharakteristiken 1 (rot), 3 (blau) und 4 (grün) wurden jeweils im harmlosen Bereich eingeschätzt. Im Fahrzenario „Abbiegen nach links“, welches mehr Lenkarbeit erforderte, wurde Dämpfungscharakteristik 1 (rot,) am kritischsten bewertet. Auch Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) und 3 (blau) wurden im Mittel als „unangenehm“ wahrgenommen. Dämpfungscharakteristik 4 (grün) und 5 (gelb) hingegen wurden im Durchschnitt als harmlos eingeschätzt. Im Rahmen der freien Adaptionsfahrt wurde Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) am kritischsten im Bereich „unangenehm“ eingeschätzt, gefolgt von Dämpfungscharakteristik 5 (rot). Dämpfungscharakteristik 3 (blau), 4 (grün) und 5 (gelb) wurden jeweils im Durchschnitt als „harmlos“ wahrgenommen. Im Zuge des vierten Fahrzenarios „Kreisverkehr“ wurden die Dämpfungscharakteristiken 1 (rot), 2 (schwarz) und 3 (blau) durchschnittlich als „unangenehm“ bewertet. Deskriptiv fiel die Bewertung von Dämpfungscharakteristik 4 (grün) im Vergleich etwas weniger kritisch aus, während die Dämpfungscharakteristik 5 (gelb) als „harmlos“ angesehen wurde.

Analog zur Kritikalität wurde auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer kritischen Fahr-situation für Normalfahrende für jedes Fahrzenario einzeln eingeschätzt. Die Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Abb. 2-15 dargestellt.

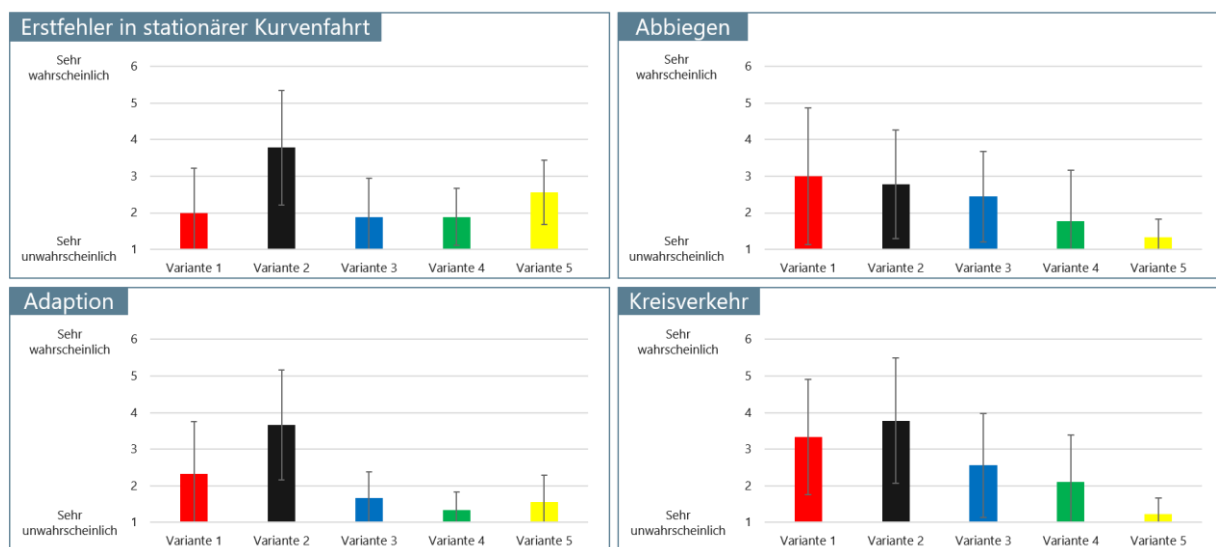


Abb. 2-15: Individuelle Bewertung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer kritischen Fahr-situation für die vier Fahrzenarien (Ford Edge)

Für den LoF-Erstfehlerfall während der stationären Kurvenfahrt wurde die Wahrscheinlichkeit einer kritischen Situation für Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) am wahrscheinlichsten eingeschätzt. Ebenfalls leicht erhöht wurde die Wahrscheinlichkeit für Dämpfungscharakteristik 5 (gelb) eingeschätzt. Für die drei weiteren Dämpfungscharakteristiken lag die Wahrscheinlichkeit im Durchschnitt im niedrigen Bereich. Für das Fahrzenario „Abbiegen“ wurde die Wahrscheinlichkeit für Dämpfungscharakteristik 1 (rot) am höchsten eingeschätzt, gefolgt von

Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) und Dämpfungscharakteristik 3 (blau). Für Dämpfungscharakteristik 4 (grün) und 5 (gelb) wurde die Wahrscheinlichkeit als niedrig eingestuft. Bei der freien Adaptionfahrt wurde erneut Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) am kritischsten bewertet. Auch die Wahrscheinlichkeit einer kritischen Situation für Dämpfungscharakteristik 1 (rot) wurde als leicht erhöht eingeschätzt, während die Wahrscheinlichkeitswerte für die restlichen drei Dämpfungscharakteristiken im niedrigen Bereich lagen. Im Fahrscenario „Kreisverkehr“ wurde die Wahrscheinlichkeit für Dämpfungscharakteristik 1 (rot) und Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) als erhöht eingeschätzt. Leicht erhöht zeigten sich auch die Mittelwerte für Dämpfungscharakteristik 3 (blau) und 4 (grün), während die Wahrscheinlichkeit für Dämpfungscharakteristik 5 (gelb) als niedrig eingestuft wurde.

Neben der Bewertung der LoF-Dämpfungscharakteristik in den einzelnen Fahrscenarien erfolgte auch eine Gesamtbewertung hinsichtlich des Kriteriums der allgemeinen Beherrschbarkeit und hinsichtlich der individuellen Merkmale der jeweiligen Dämpfungscharakteristik (Einlaufpunkt, Steigung, Maximalkraft). Die Ergebnisse sind in Abb. 2-16 dargestellt.

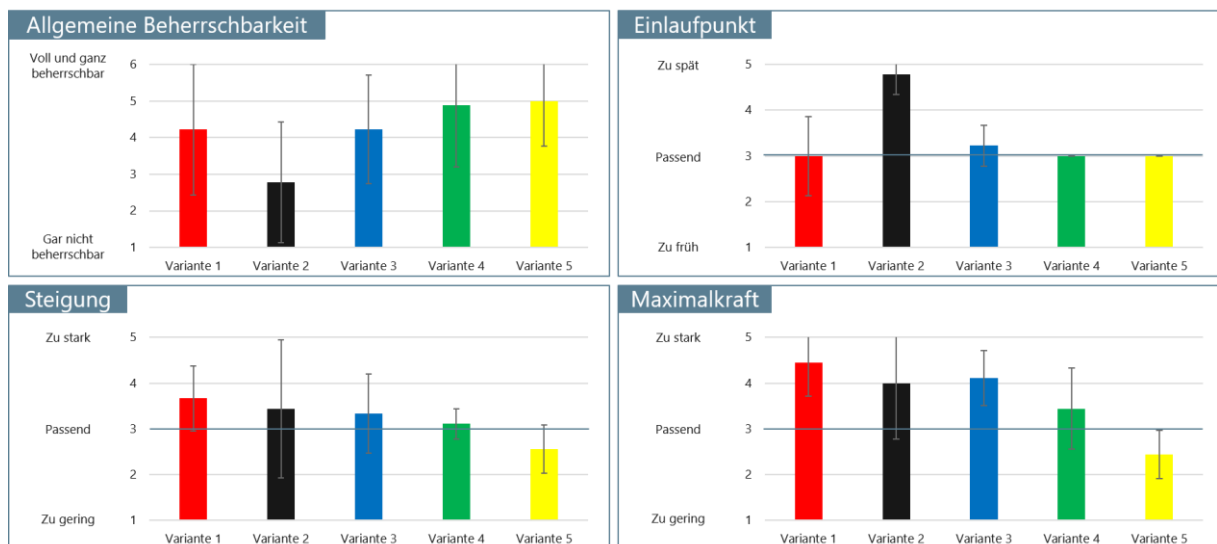


Abb. 2-16: Gesamtbewertung der LoF-Dämpfungscharakteristik (Ford Edge)

Die allgemeine Beherrschbarkeit von Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) wurde durch die Experten über die gesamte Fahrt hinweg am niedrigsten eingestuft. Die Dämpfungscharakteristiken 1 (rot) und 3 (blau) wurden als eher beherrschbar eingeschätzt. Dämpfungscharakteristik 4 (grün) und 5 (gelb) wurden hinsichtlich ihrer Beherrschbarkeit am höchsten eingestuft. Bei der Bewertung des Einlaufpunkts gaben die Experten für Dämpfungscharakteristik 1 (rot), 4 (grün) und 5 (gelb) an, dass dieser passend gewählt sei. Bei der Dämpfungscharakteristik 3 (blau) wurde der Einlaufpunkt als tendenziell zu spät und bei Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) als zu spät wahrgenommen. Die Steigung der Dämpfungskurve wurde bei Dämpfungscharakteristik 4 (grün) als passend bewertet. Während sie bei Dämpfungscharakteristik 5 (gelb) als tendenziell zu gering wahrgenommen wurde, wurde sie bei Dämpfungscharakteristik 1 (rot), 2 (schwarz) und 3 (blau) als eher zu stark eingeschätzt. Ein ähnliches Bild zeigte

sich bei der Bewertung der Maximalkraft, die für Dämpfungscharakteristik 5 (gelb) als zu niedrig und für die Dämpfungscharakteristiken 1 (rot), 2 (schwarz) und 3 (blau) als zu stark bewertet wurde. Bei Dämpfungscharakteristik 4 (grün) wurde die Maximalkraft im Mittel als tendenziell zu stark eingeschätzt.

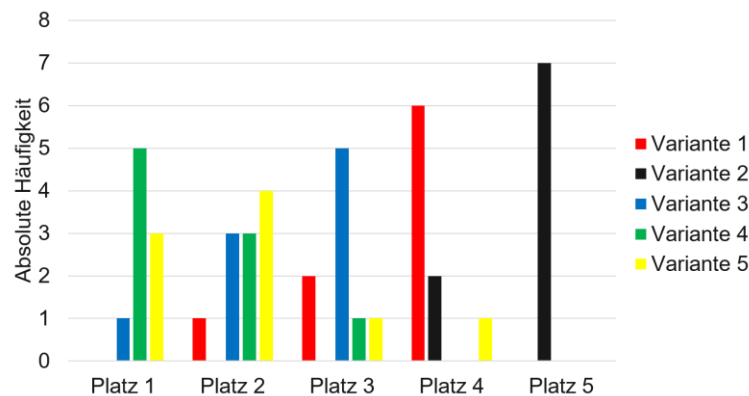


Abb. 2-17: Abschließendes Ranking der fünf LoF-Dämpfungscharakteristiken (Ford Edge)

Das abschließende Ranking der fünf LoF-Dämpfungscharakteristiken hinsichtlich ihrer Beherrschbarkeit ist in Abb. 2-17 dargestellt. Im Rahmen des Rankings war eine mehrfache Vergabe eines Platzes an zwei oder mehr Varianten möglich. Die Mehrheit der Experten vergab den fünften Platz an Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) ( $n = 7$ ). Auf den vierten Platz wurde mehrheitlich Dämpfungscharakteristik 1 (rot) gesetzt ( $n = 6$ ). Auch wenn sich auf den ersten drei Plätzen ein diverseres Bild zeigte, wurde Dämpfungscharakteristik 3 (blau) am häufigsten auf den dritten Platz gesetzt ( $n = 5$ ). Dämpfungscharakteristik 5 (gelb) wurde von vier Experten auf Platz 2 und von drei Experten auf Platz 1 gesetzt. Die grüne Variante (Dämpfungscharakteristik 4) hingegen wurde mehrheitlich auf dem ersten Platz gesehen ( $n = 5$ ).

#### 2.2.2.2 VW ID.4

Die Bewertung der LoF-Dämpfungscharakteristiken erfolgte im VW ID.4 analog zunächst einzeln für die vier absolvierten Fahrscenarien. Abb. 2-18 zeigt die deskriptive Auswertung (Mittelwerte und Standardabweichungen) der Kritikalitätsbewertung.

Im Rahmen der Kurvenfahrt mit LoF-Erstfehleraufschaltung wurden die Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) und 5 (gelb) am kritischsten bewertet. Während die Dämpfungscharakteristiken 1 (rot) und 4 (grün) im Durchschnitt im Bereich „harmlos“ bis „unangenehm“ eingeordnet wurden, wurde Dämpfungscharakteristik 3 (blau) im Vergleich am unkritischsten wahrgenommen. Im Fahrscenario „Abbiegen“ wurde die Dämpfungscharakteristik 1 (rot) im Bereich „unangenehm“ eingeordnet und somit am kritischsten bewertet. Ebenfalls als „unangenehm“ wurde Dämpfungscharakteristik 3 (blau) beschrieben. Die Dämpfungscharakteristiken 2 (schwarz), 4 (grün) und 5 (gelb) wurden als „harmlos“ eingeordnet. Auch in Bezug auf die freie Adaptionfahrt fiel die Bewertung von Dämpfungscharakteristik 1 (rot) am kritischsten aus,

gefolgt von Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz). Die Bewertungen für Dämpfungscharakteristik 3 (blau), 4 (grün) und 5 (gelb) lagen durchschnittlich im Bereich „harmlos“. Für die Durchführung des Fahr Szenarios „Kreisverkehr“ wurde die Dämpfungscharakteristik 1 (rot) im Bereich „unangenehm“ bis „gefährlich“ eingeordnet. Dämpfungscharakteristik 3 (blau) wurde ebenfalls als „unangenehm“ bewertet. Die Bewertungen für die übrigen Dämpfungscharakteristiken lagen jeweils im Bereich „harmlos“.

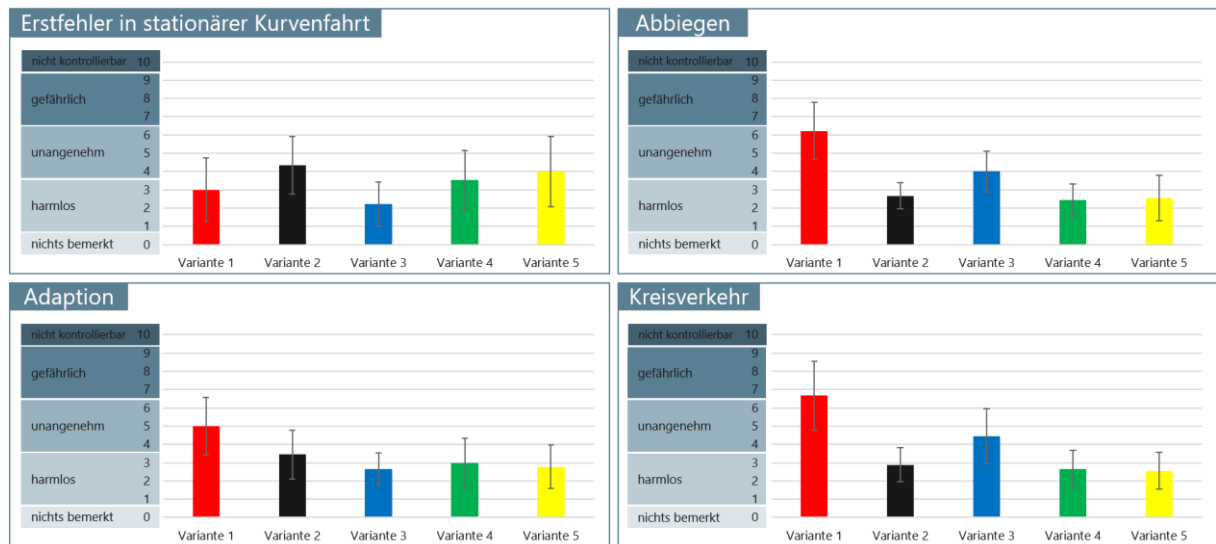


Abb. 2-18: Individuelle Kritikalitätsbewertung für die vier Fahr Szenarien (VW ID.4)

Zusätzlich zur Kritikalität schätzten die Experten ebenfalls die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von kritischen Fahr Situationen ein. Abb. 2-19 illustriert die Mittelwerte und Standardabweichungen der Expertenurteile in Bezug auf alle vier Fahr Szenarien.

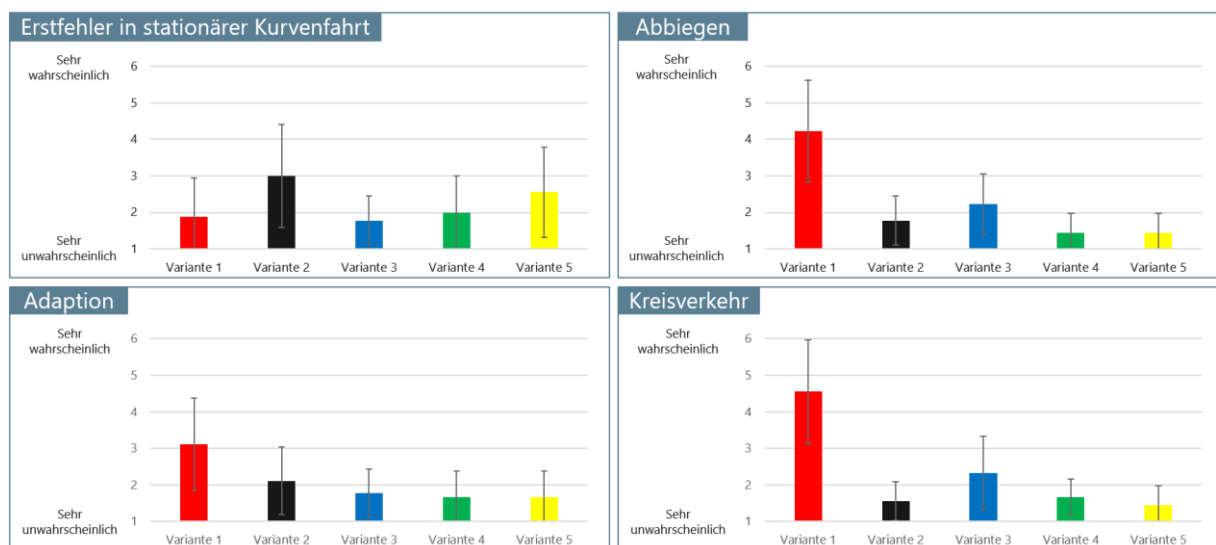


Abb. 2-19: Individuelle Bewertung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer kritischen Situation für die vier Fahrmanöver (VW ID.4)

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten kritischer Fahrsituationen wurde im Kontext der LoF-Erstfehleraufschaltung während der stationären Kurvenfahrt für die Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) als erhöht eingeschätzt. Für die Dämpfungscharakteristik 5 (gelb) wurde diese ebenfalls als leicht erhöht bewertet, während die Urteile für die restlichen drei Dämpfungscharakteristiken eher gering ausfielen. Für das Fahrszenario „Abbiegen“ zeigten sich höhere Werte für Dämpfungscharakteristik 1 (rot) und eine leicht erhöhte Wahrscheinlichkeit für Dämpfungscharakteristik 3 (blau). Die restlichen drei Varianten wurden unkritisch eingeschätzt. Das gleiche Muster zeigte sich für das Fahrszenario „Kreisverkehr“. In der freien Adaptionsfahrt wurde die Wahrscheinlichkeit für Dämpfungscharakteristik 1 (rot) wiederum am höchsten eingeschätzt. Für Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) zeigten sich leicht erhöhte Bewertungen, während die Urteile für die anderen drei Varianten gering ausfielen.

Abb. 2-20 zeigt die deskriptive Auswertung der Gesamtbewertung der LoF-Dämpfungscharakteristiken sowie die allgemeine Einschätzung der drei Kurvenmerkmale (Einlaufpunkt, Steigung, Maximalkraft).

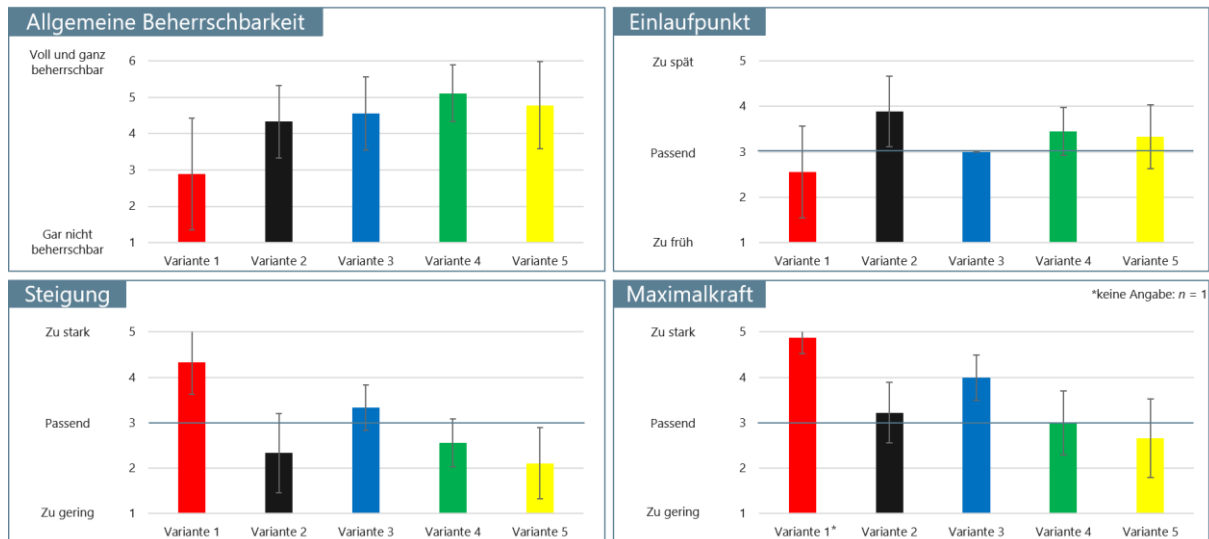


Abb. 2-20: Gesamtbewertung der Dämpfungscharakteristik (VW ID.4)

In der Gesamtbewertung wurden Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz), Dämpfungscharakteristik 3 (blau), Dämpfungscharakteristik 4 (grün) und Dämpfungscharakteristik 5 (gelb) als eher beherrschbar eingeschätzt. Dämpfungscharakteristik 1 (rot) wurde hinsichtlich der Beherrschbarkeit in einem eher niedrigen Bereich eingeordnet. Der Einlaufpunkt von Dämpfungscharakteristik 3 (blau) wurde im Mittel als passend eingeschätzt. Während dieser bei Dämpfungscharakteristik 1 (rot) als tendenziell zu früh angesehen wurde, wurde er bei den Dämpfungscharakteristiken 2 (schwarz), 4 (grün) und 5 (gelb) als eher zu spät bewertet. Die Steigungen von Dämpfungscharakteristik 1 (rot) sowie Dämpfungscharakteristik 3 (blau) wurden jeweils als eher zu stark wahrgenommen, während sie bei Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz), 4 (grün) und 5 (gelb) als eher zu gering eingeschätzt wurden. Hinsichtlich der Maximalkraft lag der Wert von Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) tendenziell sowie der Wert der Dämpfungscharak-

teristik 1 (rot) und der Dämpfungscharakteristik 3 (blau) deutlich zu hoch. Während die Maximalkraft von Dämpfungscharakteristik 4 (grün) als passend bewertet wurde, lag diese bei der Dämpfungscharakteristik 5 (gelb) eher im zu niedrigen Bereich.

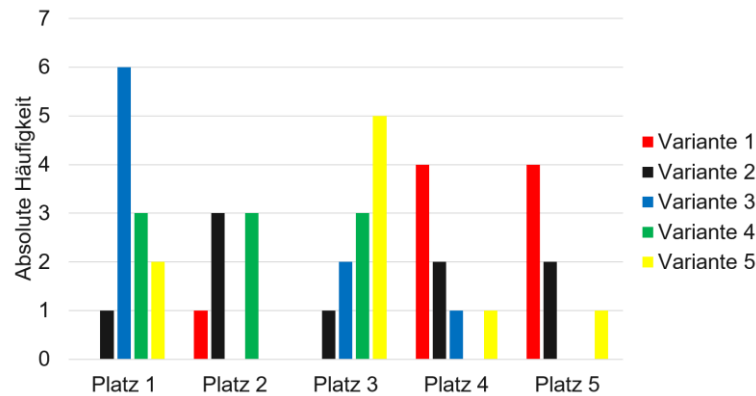


Abb. 2-21: Abschließendes Ranking der fünf LoF-Dämpfungscharakteristiken (VW ID.4)

Das abschließende Ranking der Beherrschbarkeit der fünf LoF-Dämpfungscharakteristiken im VW ID.4 ist in Abb. 2-21 dargestellt. Analog zum Vorgehen beim ersten Versuchsfahrzeug (Ford Edge) konnten die Experten ebenfalls einen Platz an mehrere Varianten vergeben. Dämpfungscharakteristik 1 (rot) wurde von den Experten am häufigsten auf den vierten ( $n = 4$ ) oder den fünften Platz ( $n = 4$ ) gesetzt. Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz) wurde sehr heterogen bewertet und sowohl auf dem ersten Platz ( $n = 1$ ) als auch auf dem letzten Platz gesehen ( $n = 2$ ). Die gelbe Dämpfungskurve (Dämpfungscharakteristik 5) wurde am häufigsten auf dem dritten Platz eingeordnet ( $n = 5$ ). Während Dämpfungscharakteristik 3 (blau) am häufigsten auf dem ersten Platz gesehen wurde ( $n = 6$ ), setzten einzelne Experten diese Variante auch auf den dritten ( $n = 2$ ) oder den vierten Platz ( $n = 1$ ). Die grüne Dämpfungskurve (Dämpfungscharakteristik 4) wurde ausschließlich auf den ersten drei Plätzen einsortiert (jeweils  $n = 3$ ).

### 2.2.3 Abgleich der Subjektiv- und Objektivdaten

Ergänzend zu den spezifischen Auswertungen der Objektiv- und Subjektivdaten erfolgte auch ein übergreifender Abgleich der ausgewerteten Daten und der resultierenden Ergebnisse, um die Validität der Expertenurteile zu überprüfen. Dazu wurde in einem ersten Schritt ein qualitativer Abgleich der erhobenen Daten durchgeführt. Wie Abb. 2-22 an einem Beispiel zeigt, lassen sich deskriptiv Parallelitäten zwischen den mittleren Expertenurteilen und den Objektivdaten finden.

Das Beispiel in Abb. 2-22 zeigt zum einen die Subjektivurteile der Experten hinsichtlich der Kritikalität des LoF-Erstfehlers für Normalfahrende für den Ford Edge während des Fahrzeugszenarios „Kreisfahrt“. Zum anderen enthält sie die gemittelten Störeinflüsse auf den Lenkwinkel während der Expertenfahrten im gleichen Fahrzeug. Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz)

wird in diesem Beispiel von den Experten am kritischsten bewertet und weist auf der Objektivdatenebene auch den größten Störeinfluss in Bezug auf den Lenkwinkel auf. Dämpfungscharakteristik 1 (rot) mit dem geringsten Störeinfluss auf den Lenkwinkel wird von den Experten auf der Subjektivebene als „harmlos“ eingeschätzt. Auch für die übrigen Dämpfungscharakteristiken zeigen sich Parallelen zwischen den subjektiven Bewertungen der Experten und der Höhe des ermittelten Störeinflusses auf den Lenkwinkel.

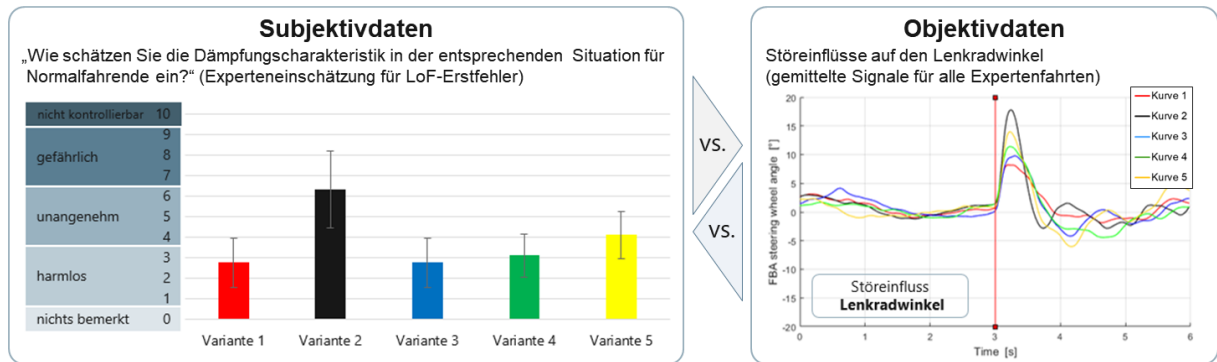


Abb. 2-22: Beispiel – Qualitativer Abgleich zwischen den erhobenen Subjektiv- und Objektivdaten (Ford Edge, Kreisfahrt mit LoF-Erstfehleraufschaltung)

Neben der augenscheinlichen Prüfung wurde auch beispielhaft und explorativ eine statistische Überprüfung der Korrelation zwischen Expertenurteilen und Objektivdaten durchgeführt. In Bezug auf die LoF-Erstfehleraufschaltung zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der subjektiven Kritikalitätsbewertung und dem gemessenen StörLenkwinkel sowohl im Ford Edge ( $r = .576, p < .001$ ) als auch im VW ID.4 ( $r = .425, p < .01$ ). Auch im Adaptionsszenario „Abbiegen“ zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Kritikalität und dem maximal gemessenen Lenkmoment (Ford:  $r = .514, p < .001$ ; VW:  $r = .718, p < .001$ ). Diese beispielhaften Ergebnisse zeigen, dass tendenziell korrelative Zusammenhänge zwischen dem mittleren subjektiven Expertenurteil und relevanten objektiven Messgrößen zu finden sind. Dabei sind in Abhängigkeit des Fahr Szenarios unterschiedliche Objektivparameter zu betrachten. Die Datenanalyse zeigte jedoch auch eine interindividuelle Varianz der Expertenurteile auf. Daher ist eine Auswertung der Daten auf Individualebene an dieser Stelle nicht empfehlenswert. Zusammengenommen weist der Abgleich auf ein plausibles Gesamtbild der Datenlage hin und liefert somit Evidenz für die Validität der subjektiven Expertenurteile.

## 2.3 Fazit

Die Expertenstudie wurde als erster Schritt des Gesamtprojekts durchgeführt, um eine geeignete LoF-Dämpfungscharakteristik für die Überprüfung der Kontrollierbarkeit eines LoF-Fehlers mit einem Rückfall auf die passive LoF-Dämpfungscharakteristik in der nachfolgenden Nutzerstudie festzulegen. Dazu wurden Experten der teilnehmenden Häuser gebeten, in zwei Fahrzeugen jeweils fünf verschiedene Dämpfungscharakteristiken zu erleben und zu bewerten. Im Rahmen der Expertenstudie wurden sowohl subjektive Bewertungen der Experten als auch objektive Fahrzeugmessdaten erfasst und ausgewertet.

Die Auswertung der in den beiden Versuchsfahrzeugen (Ford Edge und VW ID.4) aufgezeichneten Objektivmessdaten erfolgte für die drei Fahr Szenarien „Kreisfahrt mit LoF-Fehlerrückmeldung“, „Abbiegen nach links (LoF-Adaption)“ und „Kreisverkehr (LoF-Adaption)“. Für das Szenario „Kreisfahrt mit LoF-Fehlerrückmeldung“ wurden vorrangig die Störeinflüsse auf den Regelkreis Fahrer-Lenkung-Fahrzeug berechnet. Die gewonnenen Ergebnisse liegen dabei im erwartbaren Bereich. Die ermittelten Störeinflüsse bzw. Fahrerreaktionen korrelieren mit der Gestaltung und Charakteristik der im LoF-Fehlerfall aufgeschalteten Dämpfungscharakteristik. Bei LoF-Dämpfungscharakteristiken mit hoher Dämpfung – also einem hohen Maximalkraftniveau und einer hohen Steigung – ist eine geringere Amplitudenhöhe der Störeinflüsse infolge der LoF-Fehlerrückmeldung zu erkennen. Die Streubreite der Störeinflüsse bzw. Fahrerreaktion fällt für diese Dämpfungscharakteristiken mit hoher Dämpfung geringer aus. Bei den Dämpfungscharakteristiken mit geringerer Dämpfung – geringeres Maximalkraftniveau und geringe Steigung – sind im Vergleich größere Amplituden sowie eine geringere Periodendauer bei den Störeinflüssen zu beobachten. Bei geringerer Dämpfung ist zudem eine deutlich höhere Streuung der Störeinflüsse bzw. Fahrerreaktionen infolge der LoF-Fehlerrückmeldung zu beobachten. Die Dämpfungscharakteristiken mit spätem Einlaufpunkt führen tendenziell zu höheren Störeinflüssen und weisen ebenfalls eine breitere Streuung in den ermittelten Störeinflüssen auf.

Für die beiden Adaptionsszenarien „Abbiegen nach links“ und „Kreisverkehr“ wurden im Rahmen der Objektivdatenauswertung vorrangig die Wertebereiche der innerhalb der Szenarien auftretenden Lenkraten ermittelt. Aufgrund der nicht vorgegebenen, individuellen Fahrweise der Experten ist hierbei im Allgemeinen eine breite Streuung der Lenkraten über alle LoF-Dämpfungscharakteristiken zu erkennen. Der im Rahmen der Expertenfahrten ermittelte Lenkratenbereich für das Abbiegen lag im Bereich von 150 bis 400°/s. Die auftretenden Lenkraten für den Kreisverkehr lagen im Bereich 300 bis 900°/s. Die ermittelten Lenkmomente resultieren aus der Verknüpfung der Lenkraten und der jeweiligen Dämpfungscharakteristik. Die maximal auftretenden Lenkmomente korrelieren dabei mit den entsprechenden Maximalwerten der jeweiligen LoF-Dämpfungscharakteristik. Es hat sich zudem gezeigt, dass insbesondere eine große Einlauflänge (z.B. im Ford Edge Dämpfungscharakteristik 2 (schwarz)) beim Abbiegen die Streuung der während der Expertenfahrten gemessenen Werte für die Lenkrate und insbesondere das Lenkmoment stark erhöht.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Objektivdatenauswertung kann zusammengefasst werden, dass hinsichtlich des gemessenen Lenkmomentenniveaus für das Abbiegen in der LoF-Adaption aber auch hinsichtlich der Störeinflüsse infolge der LoF-Fehlerrückmeldung während der Kreisfahrt eine mittlere LoF-Dämpfungscharakteristik (beispielsweise Dämpfungscharakteristik 4 (grün)) in beiden Fahrzeugen einen guten Kompromiss darstellt. Neben einer vertretbaren Höhe des in den getesteten Adaptionsszenarien erforderlichen Lenkmoments am HWA ergeben sich bei diesen mittleren Dämpfungscharakteristiken auch infolge der LoF-Fehlerrückmeldung nur Störeinflüsse im mittleren Bereich.

Die Erkenntnisse der Objektivdatenauswertung spiegeln sich in den Subjektivdaten wider. Weist die LoF-Dämpfungscharakteristik eine hohe Maximalkraft und Steigung auf, wird sie in

der Erstfehlersituation als beherrschbarer bewertet. In den getesteten Fahrszenarien, die mehr Lenkarbeit benötigen, wirkt sich die hohe Dämpfung jedoch negativ auf die Bewertung der Experten aus. Folglich werden LoF-Dämpfungscharakteristiken mit einer geringen Maximalkraft und geringerer Steigung insbesondere in den Fahrszenarien „Abbiegen“ und „Kreisverkehr“ als beherrschbarer eingestuft. In der Abwägung der Auswirkungen der Dämpfungscharakteristik in den unterschiedlichen Fahrszenarien präferierten die Experten die Varianten, die eine mittlere Steigung und eine mittlere Maximalkraft aufwiesen. Während im Versuchsfahrzeug VW ID.4 die Dämpfungscharakteristik 3 (blau) und Dämpfungscharakteristik 4 (grün) im abschließenden Vergleich am besten bewertet wurden, war Dämpfungscharakteristik 4 (grün) im Versuchsfahrzeug Ford Edge der Favorit hinsichtlich der Kontrollierbarkeit.

Da der Ford Edge als Versuchsfahrzeug in der Nutzerstudie vorgesehen war, wurde die Auswahl der geeigneten LoF-Dämpfungscharakteristik auf die fünf Varianten, die für dieses Fahrzeug abgestimmt wurden, beschränkt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Objektiv- und Subjektivdatenauswertung wurde die Dämpfungscharakteristik 4 (grün) Charakteristik für die Nutzerstudie ausgewählt. Somit liefert die Expertenstudie die Basis für die Überprüfung der Kontrollierbarkeit einer dämpfungsbasierten passiven HWA-Rückfallebene im Falle eines Ausfalls des aktiven HWA-Feedbackmoments. Aufbauend auf diesen Ergebnissen der Expertenstudie wurde im weiteren Projektverlauf die Nutzerstudie geplant, durchgeführt und ausgewertet (siehe Kapitel 3).

### 3 Nutzerstudie

Im Zuge des Gesamtprojektes baute die Nutzerstudie auf den Ergebnissen der Expertenstudie auf. Die Umsetzung der Nutzerstudie verfolgte zwei zentrale Ziele:

1. **Bewertung der Kontrollierbarkeit eines LoF-Erstfehlers**

Bewertung der Kontrollierbarkeit des LoF mit der in der Expertenstudie festgelegten LoF-Dämpfungscharakteristik im Fahrmanöver „Abbiegen nach rechts“ durch naive Alltagsfahrende

2. **Untersuchung der allgemeinen Kontrollierbarkeit in der LoF-Adaption**

Explorative Untersuchung der allgemeinen Kontrollierbarkeit des LoF mit der in der Expertenstudie festgelegten LoF-Dämpfungscharakteristik in einer Adaptionfahrt durch Alltagsfahrende bei bekanntem Fehler

Im Folgenden wird zunächst das methodische Vorgehen detailliert erläutert (Kapitel 3.1). Anschließend werden die Ergebnisse der Datenanalyse dargestellt (Kapitel 3.2) und diskutiert (Kapitel 3.3).

#### 3.1 Methode

Die Nutzerstudie fand im Oktober 2024 mit 56 Versuchspersonen auf der Teststrecke des Instituts für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University statt. Die detaillierte Beschreibung der Methodik erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

##### 3.1.1 Studiendesign

Um die zentralen Forschungsziele in einer Studie zu adressieren, wurde das Versuchsdesign in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase wurde die Frage nach der Kontrollierbarkeit eines LoFs bei einem SbW-System mit dämpfungsbasierter passiver Rückfallebene für naive Versuchspersonen im Erstfehlerfall fokussiert. Nach dem Erleben und Bewerten des LoF-Erstfehlers beschäftigte sich anschließend die zweite Phase des Versuchs explorativ mit der Adaption der Versuchspersonen an die passive LoF-Dämpfungscharakteristik.

Im Zuge der ersten Studienphase wurde der Faktor Warnung (mit/ohne Warnung) als Zwischensubjektfaktor zwischen zwei Teilstichproben variiert. Während der LoF-Fehler bei der Hälfte der Versuchspersonen ( $n = 28$ ) ohne einhergehende Warnung durch das Fahrzeug aufgeschaltet wurde, erhielt die andere Hälfte der Versuchspersonen eine Warnung im Kombiinstrument des Fahrzeugs (siehe Kapitel 3.1.2). Im Zuge der zweiten Studienphase erlebten beide Gruppen dasselbe Versuchssetting.

Um die Kontrollierbarkeit der LoF-Erstfehlersituation im Zuge der ersten Studienphase zu bewerten, wurden drei Arten von abhängigen Variablen betrachtet. Die Einhaltung der für das Fahrscenario definierten Fahrspur durch die Versuchspersonen wurde über eine Überwachung des einzuhaltenden Fahrkorridors operationalisiert. Hierzu wurde der Fahrkorridor des jeweiligen Fahrscenarios beidseitig durch Pylonen begrenzt. Ein Berühren oder Überfahren

der Pylonen indizierte hierbei ein Verlassen der definierten Fahrspur und wurde als Verletzung des Kriteriums „Spureinhaltung“ gewertet. In Anlehnung an [BRO09] ergibt sich Evidenz für eine Kontrollierbarkeit (C0), wenn 100% der Versuchspersonen in der Lage sind, den vorgegebenen Fahrkorridor nach Fehleraufschaltung nicht zu verlassen. Dabei müssen diese 100% mindestens  $n = 20$  gültige Datensätze umfassen. Darüber hinaus wurden objektive Fahrzeugmessdaten erfasst und der subjektive Eindruck der Versuchspersonen mithilfe von Fragebögen erhoben (siehe Kapitel 3.1.4). Im Rahmen der zweiten Studienphase wurden für die explorative Untersuchung der Adaption an das LoF dieselben abhängigen Variablen erhoben.

### 3.1.2 Fahrzeug, Fehlerbild und LoF-Dämpfungscharakteristik

Als Versuchsfahrzeug für die Nutzerstudie diente der Ford Edge, der bereits in der Expertenstudie eingesetzt wurde (siehe Kapitel 2.1.2). Der Ford Edge verfügte über ein SbW-Lenkssystem, auf welches definierte SbW-Fehler durch einen Fahrzeugbetreuer aufgeschaltet werden konnten. Für die Nutzerstudie wurde analog zur Expertenstudie das Fehlerbild eines ausgefallenen HWAs (LoF) appliziert. Dieses ging mit einem initialen Verlust des aktiv gestellten Handmoments und einem Rückfall auf eine passive LoF-Dämpfungscharakteristik einher, bei der das Lenkradmoment in Abhängigkeit der Lenkrate erzeugt wird (Lenkmoment-Lenkrate-Kennlinie). Dabei entsprach die passive LoF-Dämpfungscharakteristik derjenigen Charakteristik, die im Rahmen der Expertenstudie im Ford Edge ausgewählt und für die Nutzerstudie bestätigt wurde (Dämpfungscharakteristik 4, grüne Kurve, siehe Abb. 2-2). Das Versuchsfahrzeug und eine qualitative Darstellung der ausgewählten LoF-Dämpfungscharakteristik sind in Abb. 3-1 abgebildet.

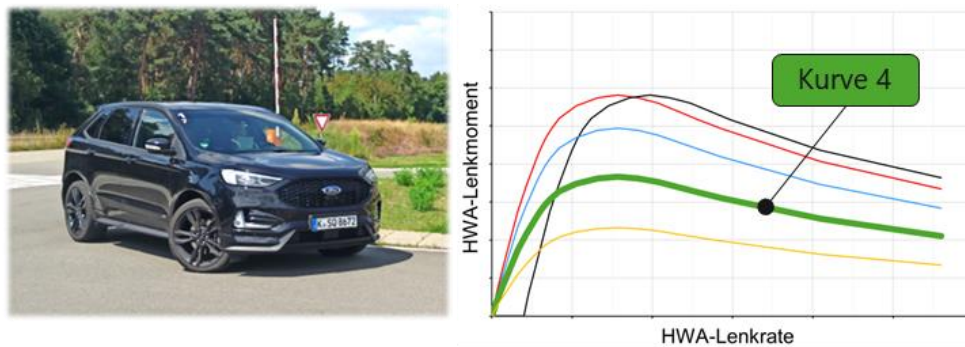


Abb. 3-1: Versuchsfahrzeug Ford Edge und für die Nutzerstudie verwendete LoF-Dämpfungscharakteristik (Kurve 4, grün)

Die relevanten Fahrzeugabmessungen des Versuchsfahrzeugs (Ford Edge) sind zusammenfassend in Tab. 3-1 aufgelistet.

| Fahrzeugabmessungen Ford Edge     |         |
|-----------------------------------|---------|
| Fahrzeuglänge:                    | 4808 mm |
| Radstand:                         | 2848 mm |
| Fahrzeugbreite ohne Außenspiegel: | 1928 mm |
| Fahrzeugbreite mit Außenspiegel:  | 2184 mm |

Tab. 3-1: Fahrzeugabmessungen Versuchsfahrzeug (Ford Edge)

Unter Berücksichtigung der Fahrzeugabmessungen und der für die einzelnen Fahrszenarien (ausgenommen Fahrszenario „Geradeausfahrt“) gewählten Fahrspurbreiten von 3.5 m (siehe Kapitel 3.1.3) beträgt die freie Restbreite beim Durchfahren der einzelnen Fahrszenarien ca. 1.6 m (Fahrzeugbreite ohne Außenspiegel) bzw. 1.3 m (Fahrzeugbreite mit Außenspiegeln).

Für die geplante Variation des Zwischensubjektfaktors „Warnung“ bestand in dem Versuchsfahrzeug die Möglichkeit, eine Fehlermeldung im Moment der LoF-Fehleraufschaltung im zentralen Kombiinstrument anzuzeigen.



Abb. 3-2: Warnung/Fehlermeldung bei LoF-Fehleraufschaltung im Ford Edge

Die im Vorfeld der Nutzerstudie durch den VDA/DIN AK 33-18 festgelegte Warnmeldung ist in Abb. 3-2 dargestellt. Es handelt sich um einen rot umrandeter Warntext „Servolenkung Störung – Bitte Service“. Neben der Darstellung der Warnung im Kombiinstrument erfolgte im Moment der Fehleraufschaltung auch eine kurze akustische Warnung mittels eines fahrzeugspezifischen Warntons.

### 3.1.3 Fahrparcours und Fahrszenarien

Die Nutzerstudie wurde auf der Teststrecke des Instituts für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University in Aachen durchgeführt. Der für die Nutzerstudie aufgebaute Fahrparcours hatte eine Länge von circa 1000 Metern. Abb. 3-3 zeigt den genutzten Gesamtparcours aus der Vogelperspektive.

Eine Runde des Parcours startete im großen Kreisel der Teststrecke mit einem Abbiegen nach links in eine Kurvenfahrt nach links. Diese diente als Anfahrt auf das erste Fahrszenario „Abbiegen nach links“ (Adaptionsszenario 1). In der Folge führte der Parcours entlang der auf der Teststrecke vorhandenen Spurmarkierungen über eine leichte Kurve nach links auf die lange Gerade der Teststrecke. Dort war das zweite Fahrszenario „Geradeausfahrt“ (Adaptionsszenario 2) aufgebaut. Im weiteren Verlauf erfolgte der Spurmarkierung folgend in der Anfahrt auf den kleinen Kreisel ein Spurwechsel von der linken auf die rechte Fahrspur. Direkt im Anschluss an den Spurwechsel folgte ein Einbiegen und Durchfahren eines Kreisverkehrs. Spurwechsel und Kreisverkehr bildeten zusammengefasst das dritte Fahrszenario (Adaptionsszenario 3). Nach der Ausfahrt aus dem Kreisverkehr führte der Parcours über die lange Gerade

mit leichten Verschwenkungen zurück zum großen Kreis. Dort führen die Versuchspersonen den Spurmarkierungen folgend auf eine markierte Kreuzung in der Mitte des großen Kreisels zu, um an der Kreuzung das letzte Fahrscenario „Abbiegen nach rechts“ (Untersuchungsszenario) zu absolvieren. Anschließend wurde das Fahrzeug am Start- und Endpunkt, der auch den Befragungsort für die Versuchspersonen darstellte, angehalten. Im gesamten Fahrparcours war eine Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h vorgegeben. Für das Fahrscenario „Abbiegen nach rechts“ war die Höchstgeschwindigkeit mittels entsprechender Verkehrsschilder auf 30 km/h limitiert. Im Sinne einer Höchstgeschwindigkeit stand den Versuchspersonen die genaue Wahl ihrer Geschwindigkeit jedoch nach eigenem Ermessen frei. Nachfolgend werden die einzelnen Fahrscenarien des Parcours im Detail erläutert.

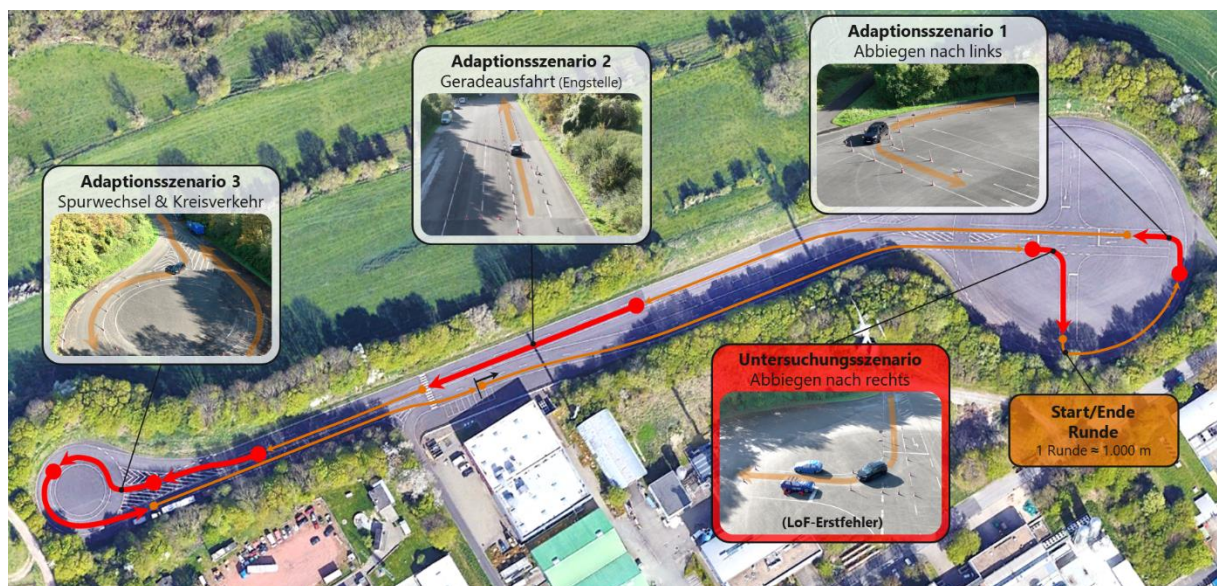


Abb. 3-3: Nutzerstudie – Fahrparcours & Fahrscenarien

Abb. 3-4 zeigt eine Detailansicht des Fahrscenarios „Abbiegen nach rechts“, welches mit Hilfe von Pylonen und Fahrzeugattrappen im markierten Kreuzungsbereich auf dem großen Kreisel der Teststrecke aufgebaut wurde. In einem Abstand von 30 m vor dem Abbiegen nach rechts wurde eine 3.5 m breite Fahrspur durch Pylonen abgesteckt. Der Pylonenabstand in Fahrtrichtung betrug 5 m. Die Fahrgeschwindigkeit für das Szenario wurde durch ein entsprechendes Verkehrsschild bereits vor der Pylonengasse auf 30 km/h begrenzt. Ein weiteres Verkehrsschild in der Pylonengasse wies die Versuchspersonen auf das Abbiegen nach rechts hin. Der durch die markierte Kreuzung vorgegebene Abbiegeradius betrug 8 m, der Abbiegewinkel 90°. Ausgangs des Richtungswechsels wurden im weiteren Verlauf des Abbiegevorgangs zwei Fahrzeugattrappen (aufblasbare Balloon Cars, siehe Beispiel in Abb. 3-4) am Fahrbahnrand sowie auf der Gegenfahrspur platziert. Die beiden Fahrzeugattrappen wurden dabei so platziert, dass sich eine freie Fahrspur mit einer Breite von 3.5 m bildete, die im Zuge des Abbiegevorgangs von den Versuchspersonen einzuhalten war. Ziel des Aufbaus war es dabei, die Abbiegesituation in einer engen Innenstadt-/Wohnstraße nachzubilden. Die Aufschaltung des LoF-Fehlers im Rahmen der Experimentalrunde erfolgte circa zwei Fahrzeuglängen vor dem

Einlenkpunkt für das Abbiegen auf Höhe des Verkehrsschildes „Fahrtrichtung rechts“. Der Beginn des Fahr Szenarios wurde in den Messdaten mithilfe eines Lichtschrankensignals markiert, um ein späteres Zuschneiden der Messdaten zu erleichtern. Der entsprechende Reflektionspunkt für die Lichtschranke war am Anfang der Pylonengasse positioniert. Circa 22 m nach dem Passieren der beiden Fahrzeugattrappen war ein Stoppschild aufgestellt, welches den Start- und Endpunkt des Fahrparcours sowie den Ort für die Befragung der Versuchspersonen markierte.

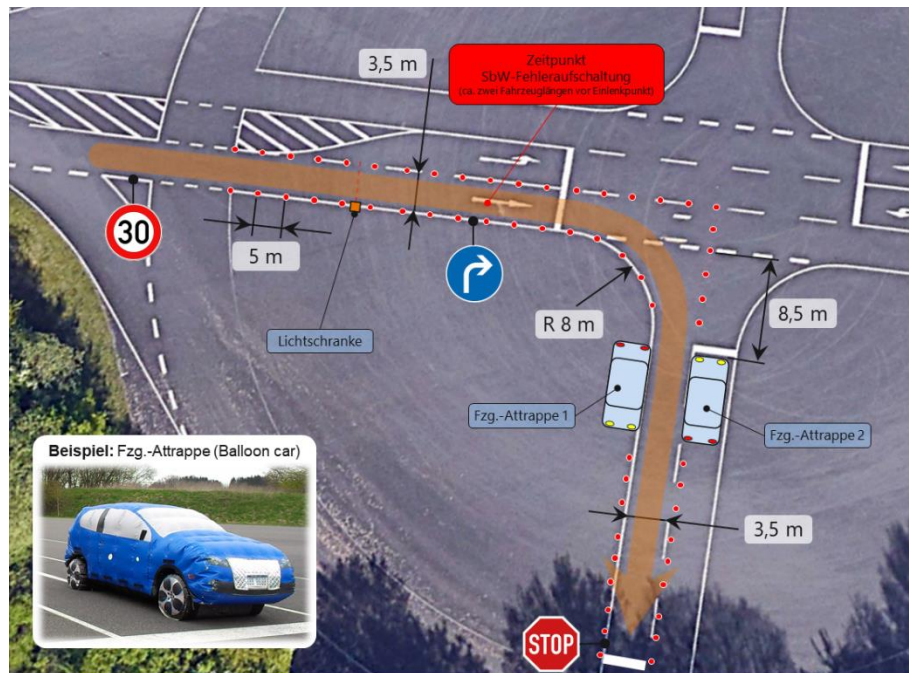


Abb. 3-4: Nutzerstudie – Fahr Szenario „Abbiegen nach rechts“ (LoF-Erstfehleraufschaltung)

In Abb. 3-5 sind exemplarisch die sich bei der Durchfahrt des Fahr Szenarios „Abbiegen nach rechts“ ergebenden Abstände zur Fahrspurbegrenzung (Pylonen) und den Fahrzeugattrappen (Balloon Cars) dargestellt. Die in der Abbildung angegebenen Abstände beziehen sich dabei auf die Breite des Ford Edge ohne Außenspiegel.

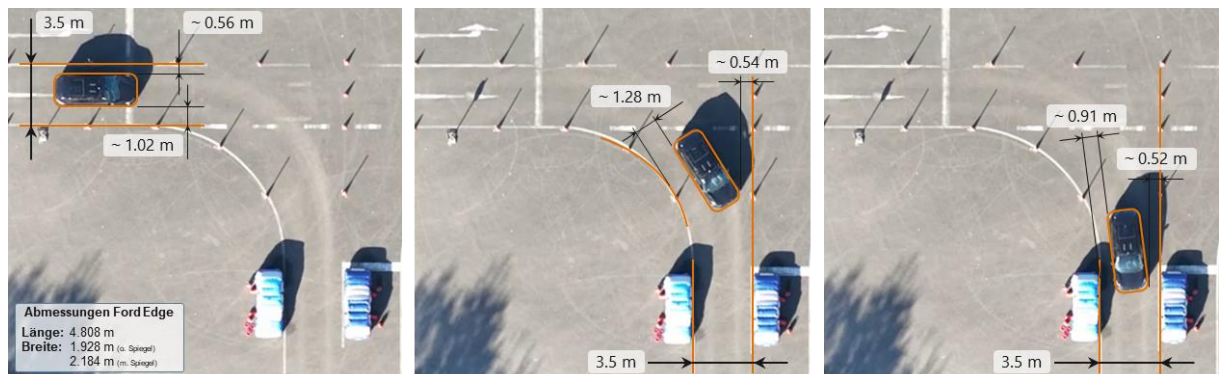


Abb. 3-5: Beispiel – Abstände beim Durchfahren des Fahr Szenarios „Abbiegen nach rechts“

Die Detailansicht des Fahrscenarios „Abbiegen nach links“ ist in Abb. 3-6 dargestellt. Ausgehend aus einer Linkskurve war der vorgegebene Fahrspurverlauf 15 m vor dem Abbiegen mithilfe von Pylonen markiert. Die durch die Pylonen markierte Fahrbahnbreite betrug bei diesem Fahrscenario 3,5 m, der Pylonenabstand in Fahrtrichtung betrug 5 m. Die Fahrtrichtung wurde in diesem Fahrscenario ebenfalls durch ein entsprechendes Verkehrsschild markiert.

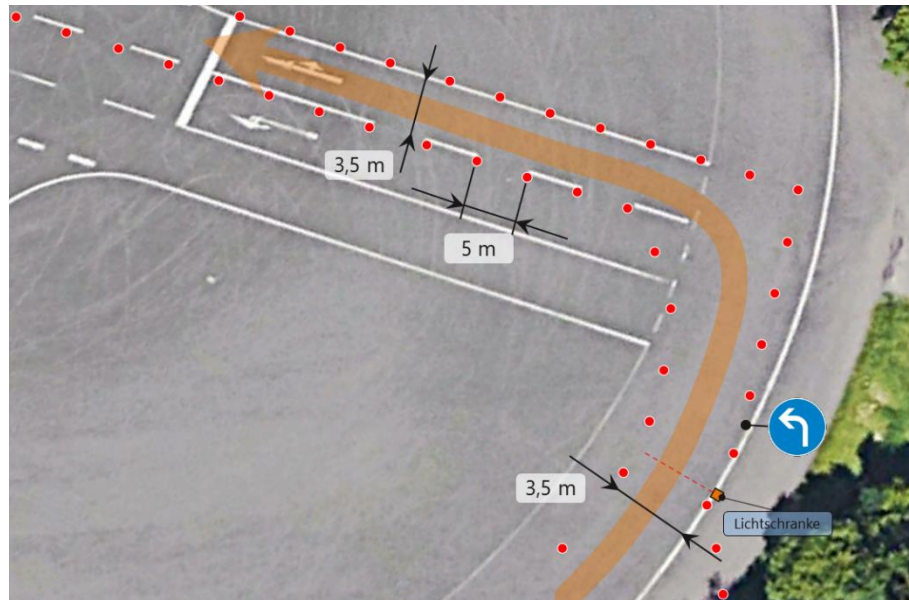


Abb. 3-6: Nutzerstudie – Fahrscenario „Abbiegen nach links“ (LoF-Adaption)

Das auf der Geraden der Teststrecke aufgebaute Fahrscenario „Geradeausfahrt“ ist in Abb. 3-7 dargestellt. Ausgehend von einer Fahrspurbreite von 3,5 m wurde die Fahrspurbreite durch die aufgestellten Pylonen auf 3 m reduziert. Die Einfahrt in den Abschnitt mit der reduzierten Fahrspurbreite erfolgte über einen kurzen Einfahrtstrichter, der durch Pylonen markiert war. Die Pylonengasse der Geradeausfahrt hatte dabei eine Länge von 100 m, der Pylonenabstand in Längsrichtung betrug 5 m.

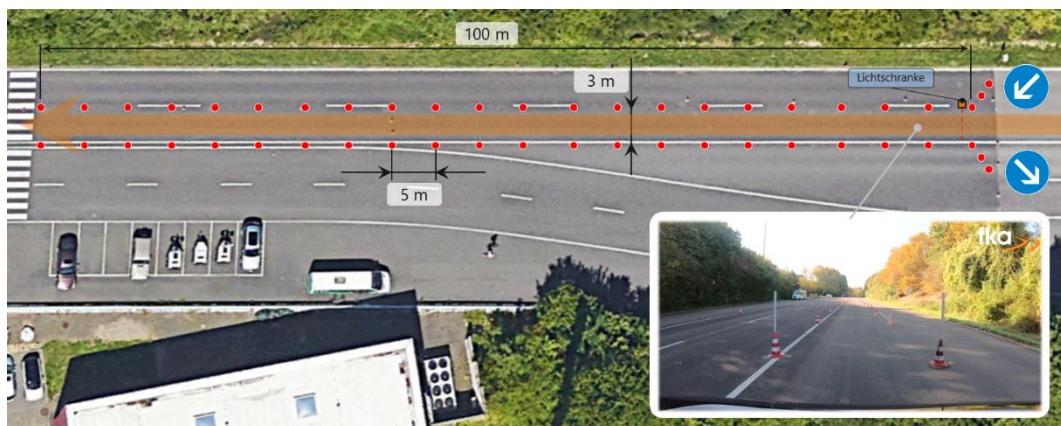


Abb. 3-7: Nutzerstudie – Fahrscenario „Geradeausfahrt“ (LoF-Adaption)

Abb. 3-8 zeigt die Detailansicht des Fahr Szenarios „Spurwechsel & Kreisfahrt“. Die Anfahrt auf dieses Fahr Szenario erfolgte auf der linken Fahrspur der markierten zweispurigen Fahrbahn. Durch Pylonen im Abstand von 5 m markiert erfolgte ein Spurwechsel auf die rechte Fahrspur. Die markierte Spurbreite der beiden Fahrspuren betrug jeweils 3,5 m. Der Spurwechsel erfolgte auf einer Länge von 20 m.

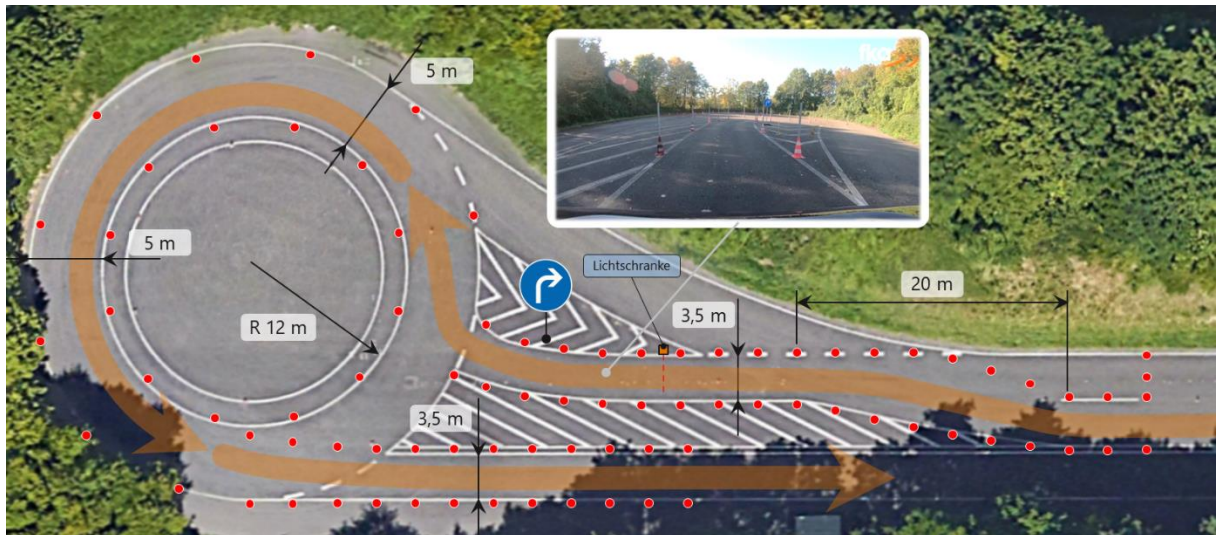


Abb. 3-8: Nutzerstudie – Fahr Szenario „Spurwechsel & Kreisverkehr“ (LoF-Adaption)

Im weiteren Verlauf erfolgte die Annäherung an den Kreisverkehr. Die Einfahrt in den Kreisverkehr erfolgte durch ein Abbiegen nach rechts. Der aufgebaute Kreisverkehr hatte einen inneren Radius von 12 m und eine markierte Breite von 5 m. Der Pylonenabstand entlang des Kreisverkehrs betrug ebenfalls 5 m. Nach circa Zweidrittel des Kreisverkehrs erfolgte die tangentielle Ausfahrt auf eine 3,5 m breite Fahrspur.

### 3.1.4 Abhängige Variablen

Im Rahmen der Nutzerstudie wurde die Beherrschbarkeit des LoFs mit der ausgewählten LoF-Dämpfungscharakteristik mit Hilfe der Spureinhaltung, objektiven und subjektiven Daten bewertet. Die einzelnen abhängigen Variablen werden im Folgenden detailliert dargestellt.

#### 3.1.4.1 Spureinhaltung

Zur Operationalisierung der Spureinhaltung wurde die vorgegebene Fahrspur in den relevanten Fahr Szenarien beidseitig mit Pylonen begrenzt, sodass sich für die Versuchspersonen ein Fahrkorridor mit vorgegebener Breite ergab (siehe Kapitel 3.1.3). Ein Berühren oder Überfahren einer Pylone wurde als Verlassen der vorgegebenen Fahrspur gewertet.

Um den Versuchspersonen die Orientierung im definierten Fahrkorridor zu erleichtern, wurden an relevanten Stellen sichtoptimierte Pylonen eingesetzt. Bei den sichtoptimierten Pylonen wurde die Pylonenhöhe durch einen mit Schaumstoff ummantelten Rundholzstab von 50 cm

auf 140 cm erhöht (siehe Abb. 3-9). Aus dem im Rahmen der Nutzerstudie als Versuchsfahrzeug eingesetzten Ford Edge ergab sich durch die Anpassung eine deutlich erhöhte Wahrnehmbarkeit der entsprechenden Pylonen.

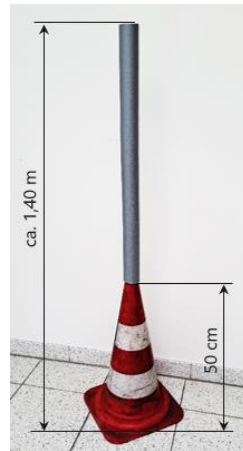


Abb. 3-9: Sichtoptimierte Pylone zur Markierung der Fahrspur

Die Überwachung des Einhaltens der Fahrspur erfolgte über eine Protokollierung seitens der im Fahrzeug mitfahrenden Versuchsleitung sowie einer Auswertung von Videodaten. Für die Videodatenanalyse wurden während der Versuchsfahrten mithilfe eines Kamerasystems Videobilder aus vier Perspektiven aufgenommen. Die Auswertung der aufgezeichneten Videodaten und damit die Überprüfung des Kriteriums der Spureinhaltung erfolgte im Nachgang der Versuche. Abb. 3-10 zeigt exemplarisch die vier zur Verfügung stehenden Perspektiven.



Abb. 3-10: Videodatenerfassung mit vier Kameraperspektiven

(Kamera 1: Innenraum/Fahrer; Kamera 2: Blick nach vorne; Kamera 3: Blick nach hinten – Fahrerseite; Kamera 4: Blick nach hinten – Beifahrerseite)

Zwei der vier Kameras waren zur Überwachung der Spureinhaltung auf beiden Seiten des Fahrzeugs angebracht (Kotflügel links und rechts vor der Vorderachse, Blick nach hinten). Diese Perspektiven ermöglichten einen nach hinten gerichteten Blick auf die vier Räder des Fahrzeugs. Eine dritte Kamera befand sich auf dem Dach des Fahrzeugs und filmte die Fahrt nach vorne. Die vierte Kamera war im Fahrzeuginnenraum angebracht und blickte auf die Fahrenden bzw. das Lenkrad. Aus Datenschutzgründen war die Kamera so ausgerichtet, dass die Versuchspersonen nur von hinten zu sehen waren. Zusätzlich wurden die Gesichter der Versuchspersonen bei Bedarf anonymisiert. Mithilfe des verbauten Kamerasystems wurde die gesamte Fahrt einer Versuchsperson aufgezeichnet. Unter Einbindung der Lichtschrankensignale sowie einer Anbindung an den CAN-Bus des Versuchsfahrzeugs konnten zudem der Zeitpunkt der LoF-Fehlerrückmeldung und die Zeitpunkte der Durchfahrt der einzelnen Fahrscenarien (Einfahrt in das jeweilige Fahrscenario) auf den Videos markiert werden.

### 3.1.4.2 Objektivdaten

Im Rahmen der Nutzerstudie wurden während der Versuchsfahrten der Versuchspersonen – analog zur Expertenstudie (siehe Kapitel 2.1.4.1) – über die Fahrzeugsensorik allgemeine Fahrzustandsgrößen (z.B. Fahrgeschwindigkeit, Querschleunigung) sowie relevante Größen des SbW-Lenkensystems (z.B. HWA-Lenkmoment, HWA-Lenkswinkel) erfasst und aufgezeichnet. Ergänzend zu den Fahrzeugdaten diente das Messsignal eines an der Fahrzeugfront angebrachten Lichtschrankensensors zur Kennzeichnung bestimmter Punkte im Fahrparcours (Beginn der einzelnen Fahrscenarien). Die während der Fahrten der Versuchspersonen aufgezeichneten Objektivmessdaten sind in Tab. 3-2 zusammenfassend aufgelistet.

| Signalgruppe  |                             | Signal                  | Einheit |
|---------------|-----------------------------|-------------------------|---------|
| Fahrer        |                             | Fahrpedal (Position)    | [-]     |
|               |                             | Bremspedal (Betätigung) | [-]     |
| Fahrzeug      |                             | Geschwindigkeit         | [km/h]  |
|               |                             | Längsbeschleunigung     | [m/s²]  |
|               |                             | Querschleunigung        | [m/s²]  |
|               |                             | Gierrate                | [°/s]   |
| HWA           | FBA<br>(Feedback-Aktuator)  | FBA Lenkmoment          | [Nm]    |
|               |                             | FBA Lenkwinkel          | [°]     |
|               |                             | FBA Lenkrate            | [°/s]   |
| RWA           | RWA<br>(Roadwheel-Aktuator) | RWA Lenkkraft/-moment   | [N]     |
|               |                             | RWA Lenkwinkel/-weg     | [°]     |
| SbW-Fehler    |                             | SbW Fehler Indikator    | [-]     |
| Lichtschranke |                             | Lichtschranke           | [-]     |

Tab. 3-2: Übersicht Objektivmessdaten – Ford Edge – Nutzerstudie

Die aufgezeichneten Messdatensätze wurden im Nachgang der Versuchsfahrten in einem Post-Processing-Prozess aufbereitet und ausgewertet. Die dabei angewendeten Post-Processing-Schritte sind in Abb. 3-11 zusammengefasst.

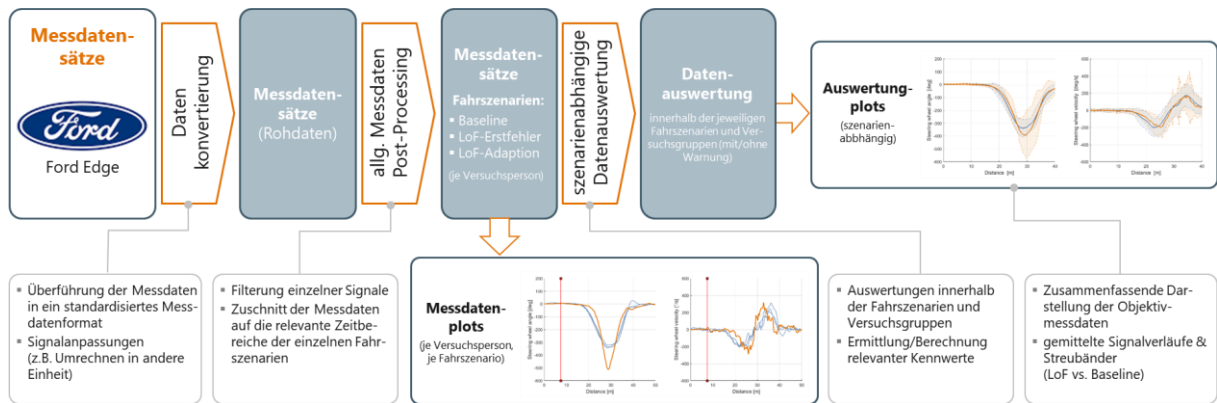


Abb. 3-11: Post-Processing und Auswertung der Objektivmessdaten – Nutzerstudie (schematische Darstellung)

Nach der Konvertierung und allgemeinen Aufbereitung der Messdaten wurden die Zeitabschnitte der einzelnen Fahrscenarien aus dem Gesamtmessdatensatz der jeweiligen Versuchsperson extrahiert, um eine szenarienspezifische Datenauswertung für die Fahrscenarien „Abbiegen nach rechts (mit LoF-Fehleraufschaltung)“, „Abbiegen nach links (LoF-Adaption)“, „Geradeausfahrt (LoF-Adaption)“ und „Spurwechsel & Kreisverkehr (LoF-Adaption)“ zu ermöglichen. In der Objektivdatenauswertung wurden der Spurwechsel und der Kreisverkehr des letzten Adaptionsszenarios getrennt betrachtet und ausgewertet. Für jede Versuchsperson stehen die Messdaten aus insgesamt drei Baselinefahrten (d.h. Fahrten durch die Fahrscenarien mit dem „normalen“ Verhalten des SbW-Lenksystems) und jeweils einer Experimentalfahrt (LoF-Fehleraufschaltung im Fahrscenario „Abbiegen nach rechts“ und LoF-Adaption in den übrigen Fahrscenarien) zur Verfügung. Für jede Versuchsperson kann daher eine individuelle Auswertung des Lenk- und Fahrzeugverhaltens im LoF-Erstfehlerfall bzw. der LoF-Adaption im Vergleich zu den Baselinefahrten durchgeführt werden.

Für den LoF-Erstfehlerfall im Fahrscenario „Abbiegen nach rechts“ wurde zur Bewertung der Veränderungen im Lenkverhalten der jeweiligen Versuchsperson eine objektive Bewertung der Abweichung zwischen dem Lenkverhalten nach Umschalten des LoF-Fehlers im Vergleich zum Lenkverhalten in den Baselinefahrten der Versuchsperson durchgeführt. Hierzu wurde der Lenkvorgang während des Abbiegevorgangs in insgesamt drei Segmente aufgeteilt und die Abweichungen anhand eines objektiven Kriteriums bewertet.

Auf der nutzerindividuellen Datenebene wurden zudem szenarienspezifische Kennwerte (z.B. die minimale Fahrgeschwindigkeit während des Abbiegevorgangs, die Maximalwerte für den Lenkwinkel, die Lenkrate und das Lenkmoment) ermittelt und innerhalb der jeweiligen Versuchsgruppen in entsprechenden Boxplots dargestellt.

Für eine aggregierte Auswertung und Analyse der Objektivmessdaten innerhalb der einzelnen Fahrszenarien und Versuchsgruppen wurde zudem eine Mittelung der der Signalverläufe durchgeführt. Neben der Mittelung der Signalverläufe relevanter Messgrößen über alle Versuchspersonen einer Versuchsgruppe wurden für jedes Fahrszenario darüber hinaus die Streubänder der gemittelten Signalverläufe berechnet. Auch auf der gemittelten Datenebene kann so für jedes Fahrszenario ein Vergleich zwischen dem Lenk- und Fahrzeugverhalten im LoF-Erstfehlerfall bzw. der LoF-Adaption im Vergleich zu den Baselinefahrten durchgeführt und mögliche Abweichungen von Baselineverhalten infolge des LoFs bewertet werden.

Für die einzelnen Fahrszenarien wurden dabei szenarienabhängig die im Folgenden aufgelisteten Auswertungsschritte durchgeführt und Kenngrößen ermittelt:

- **Abbiegen nach rechts (LoF-Erstfehleraufschaltung)**
  - Vergleich gemittelter Signalverläufe und Streubänder (Versuchsgruppen mit/ohne Warnung)
  - Berechnung und Gegenüberstellung relevanter Kennwerte (Versuchsgruppen mit/ohne Warnung)
  - Objektive Bewertung der Abweichungen im Lenkverhalten LoF-Erstfehler vs. Baselinefahrten (Versuchsgruppen mit/ohne Warnung)
- **LoF-Adaption (Abbiegen links, Geradeausfahrt, Spurwechsel, Kreisverkehr)**
  - Vergleich gemittelter Signalverläufe und Streubänder (Versuchsgruppen mit/ohne Warnung & über alle Versuchspersonen nach Aufklärung)
  - Objektive Bewertung der Abweichungen im Lenkverhalten LoF-Erstfehler vs. Baselinefahrten (Versuchsgruppen mit/ohne Warnung & über alle Versuchspersonen nach Aufklärung)

Die Ergebnisse der Auswertungen sowie Erläuterungen zu den einzelnen Auswertungsschritten werden im Detail in Kapitel 3.2.2 vorgestellt.

### 3.1.4.3 Subjektivdaten

Im Zuge der Nutzerstudie wurden eine Vorbefragung, die eigentliche Hauptbefragung zu vier Befragungszeitpunkten (BZP) und eine Nachbefragung durchgeführt.

Im Rahmen der Vorbefragung wurden verschiedene soziodemografische Aspekte erhoben (Alter, Geschlecht, unkorrigierte Seh- und Hörbeeinträchtigungen). Zudem wurden die Fahrgewohnheiten der Versuchspersonen erfragt (Jahr des Führerscheinerwerbs, Angaben zum am häufigsten genutzten Fahrzeug, gefahrene Kilometer pro Jahr). Abschließend gaben die Versuchspersonen an, wie häufig sie verschiedene Fahrerassistenzsysteme für die Längsregelung (Tempomat, ACC) und die Querregelung (Blind-spot Warning, Lane-departure Warning, Lane-keeping Assistent, Lane Centering) nutzen.

Das Befragungskonzept der Hauptbefragung teilte sich auf insgesamt vier BZP (siehe dazu auch Abb. 3-12) auf. Zu den ersten beiden Befragungszeitpunkten wurden die identischen

Items erfragt. Die Befragungen zu den BZP 3 und 4 unterschieden sich jeweils. Der erste und zweite BZP dienten der Einschätzung der allgemeinen Anforderungen des Studiendesigns unabhängig vom LoF. Dazu wurden Items angelehnt an den NASA TLX [HAR06] verwendet, die zunächst jeweils einzeln in Bezug auf die vier Fahrszenarien abgefragt wurden. Die Versuchspersonen sollten jeweils auf einer zwanzigstufigen Skala (1 – sehr gering bis 20 – sehr hoch) angeben, wie hoch sie die mentalen und körperlichen Anforderungen der Fahraufgabe einschätzen und wie erfolgreich sie ihrer Meinung nach das jeweilige Fahrszenario absolviert haben. Neben der Schwierigkeit der einzelnen Fahrszenarien fragte das nachfolgende Item die Schwierigkeit des Fahrparcours insgesamt auf einer siebenstufigen Skala (1 – überhaupt nicht anspruchsvoll bis 7 – sehr anspruchsvoll) ab. Abschließend wurde ebenfalls über ein Einzelitem auf einer siebenstufigen Skala (1 – stimme gar nicht zu bis 7 – stimme voll zu) erfragt, inwiefern die Versuchspersonen der Aussage „Ich vertraue dem Fahrzeug“ zustimmen (angelehnt an [KÖR1]).

Die Befragung zu BZP 3 unterschied sich leicht in Abhängigkeit der Gruppenzugehörigkeit der Versuchspersonen (mit/ohne Warnung). Zu Beginn wurden beide Gruppen jeweils in einem offenen Antwortformat gefragt, was sie im Moment des „Ereignisses“ (gemeint ist hiermit die LoF-Fehlerrückmeldung) gefühlt, gedacht und getan haben. In der Gruppe, die eine Warnung erhalten hat, folgten dann vier weitere offene Fragen zur Warnung. Hier wurde erfragt, ob die Versuchspersonen die Warnung wahrgenommen haben und wenn ja, was sie wahrgenommen haben. Zusätzlich wurden die Versuchspersonen gebeten, in eigenen Worten widerzugeben, was die Warnung ihnen mitgeteilt hat. Anschließend sollten die Versuchspersonen bewerten, ob sie die Warnung in dem Moment hilfreich fanden und wie sie sich im realen Straßenverkehr bei Auftreten einer solchen Warnung verhalten würden. In der Gruppe ohne Warnung wurde ausschließlich ebenfalls in einem offenen Format abgefragt, wie sich die Versuchspersonen in einer solchen Situation im realen Straßenverkehr verhalten würden. Die weitere Befragung verlief für beide Gruppen gleich. Analog zu den BZP 1 und 2 folgten anschließend die Items zur Schwierigkeit des Fahrszenarios „Abbiegen nach rechts“ und des Gesamtparcours sowie zum Vertrauen in das Fahrzeug. Wie auch in der Expertenstudie sollten die Versuchspersonen des Weiteren die Kritikalität des Ereignisses mithilfe der elfstufigen Neukum-Skala (0 – nichts bemerkt, 10 – Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar) bewerten [NEU03]. Abschließend wurde die wahrgenommene Sicherheit der Versuchspersonen in der Situation mithilfe von fünf Items (interne Konsistenz:  $\alpha = .84$ ; abgeleitet von der Subskala „Perceived Safety“ des CTAM von [OSS12]) auf einer siebenstufigen Skala (1 – stimme gar nicht zu bis 7 – stimme voll zu) erfasst.

Zum vierten BZP erfolgte die Befragung zur Adaptionsfahrt für beide Gruppen analog. Hier wurden die Versuchspersonen zunächst in einem offenen Antwortformat gebeten, das Lenkverhalten in der Adaptionsfahrt sowie Unterschiede im Lenkverhalten im Vergleich zu den Baselinefahrten zu beschreiben. Anschließend wurden Sie gebeten, auf einer siebenstufigen Skala (1 – gar nicht schwer bis 7 – sehr schwer) zu bewerten, wie schwer es ihnen gefallen ist, sich an das veränderte Lenkverhalten zu gewöhnen. In der Folge wurden die Versuchspersonen gebeten, die aus den BZP 1 und 2 bekannten Items zur Schwierigkeit und zum Vertrauen zu beantworten. Dabei sollten sie sich nacheinander auf die drei Fahrszenarien der

Adaptionsfahrt („Abbiegen nach links“, „Geradeausfahrt“, „Spurwechsel & Kreisverkehr“) beziehen. Analog zu BZP 3 sollten die Versuchspersonen dann die Kritikalität der Fahrt mit dem neuen Lenkverhalten mithilfe der Neukum-Skala einschätzen [NEU03] und ihre wahrgenommene Sicherheit bewerten (interne Konsistenz:  $\alpha = .84$ ; abgeleitet von [OSS12]).

Im Rahmen der Nachbefragung wurden die Versuchspersonen dazu aufgefordert, ihr antizipiertes Verhalten in Hinblick auf das Erleben eines solchen Fehlers in einer Alltagssituation einzuschätzen. Das erste Item erfragte auf einer vierstufigen Skala (nein, eher nein, eher ja, ja), inwiefern die Versuchspersonen sich selbst zutrauen würden, bei Auftreten des Fehlers die Kontrolle über ihr Fahrzeug zu behalten und es zu einem sicheren Halt zu bringen. Anschließend wurde erfragt, wie sich Versuchspersonen nach Auftreten eines solchen Fehlers am ehesten Verhalten würden. Zur Beantwortung des Items waren vier verschiedene Verhaltensweisen (sofort anhalten, Weiterfahrt zur nächsten sicheren Abstellmöglichkeit und dort anhalten, Weiterfahrt zur nächsten Werkstatt/nach Hause, Fortsetzung der Fahrt bis zum eigentlichen Ziel) vorgegeben. Zusätzlich gab es auch die Möglichkeit, sonstige Verhaltensweisen in einem offenen Textfeld anzugeben. Das dritte Item erfragte die maximale Entfernung in Kilometern, die die Versuchspersonen mit ihrem Fahrzeug mit dem veränderten Lenkverhalten noch zurücklegen würden. Zur Beantwortung des letzten Items sollten die Versuchspersonen auswählen, welche Straßentypen (Urbaner Bereich/Stadt, Landstraße, Autobahn) sie mit ihrem Fahrzeug im Fehlerzustand noch befahren würden (Mehrfachauswahl möglich).

### 3.1.5 Studienablauf

Der Ablauf der Nutzerstudie für die für die teilnehmenden Versuchspersonen ist schematisch in Abb. 3-12 zusammengefasst.

Zu Beginn der Studie wurden die Versuchspersonen am Eingang der Teststrecke durch die Versuchsleitung in Empfang genommen, begrüßt und zum Ort der Vorbefragung gebracht. Dort füllten die Versuchspersonen zunächst die formalen Dokumente zur Information, Geheimhaltung sowie Datenschutz und im Anschluss die Vorbefragung aus. Bevor die Versuchspersonen ins Versuchsfahrzeug einstiegen, wurde ihnen die Coverstory präsentiert. Diese hatte zum Ziel, den wahren Hintergrund der Studie zu verschleiern und so das naive Erleben der Fehlersituation sicherzustellen. Den Versuchspersonen wurde erklärt, dass es in der Studie um automatisiertes Fahren geht. Des Weiteren wurde ihnen mitgeteilt, dass im Rahmen der Studie ihr Fahrverhalten erfasst werden soll, um automatisierte Fahrfunktionen auf das menschliche Fahrverhalten abstimmen zu können und so eine höhere Nutzerakzeptanz zu erreichen. Neben der Coverstory erläuterte die Versuchsleitung auch den generellen Ablauf der Testung. Die weiterführende Einführung fand im Versuchsfahrzeug statt. Hier nahm die Versuchsperson auf dem Fahrersitz Platz. Auf dem Beifahrersitz befand sich der Fahrzeugbetreuer, der für die LoF-Fehleraufschaltung und die Aufzeichnung der objektiven Fahrzeugmessdaten verantwortlich war. Im Kontext der Coverstory wurde der Fahrzeugbetreuer als diejenige Person vorgestellt, die für die Datenaufzeichnung des Fahrverhaltens zuständig ist. Die Versuchsleitung, die für die Instruktion, die Aufnahme der Subjektivdaten und die Protokollierung von Auffälligkeiten während der Versuchsfahrt zuständig war, setzte sich auf die

Rückbank hinter den Beifahrersitz. Von dort aus erklärte die Versuchsleitung den Verlauf des Fahrparcours unter Zuhilfenahme einer Abbildung aus der Vogelperspektive, um den Versuchspersonen einen ersten Eindruck vom Fahrparcours und den darin beinhalteten Fahrscenarien zu vermitteln. Zudem wurden die Versuchspersonen instruiert, die Fahrscenarien möglichst präzise und mittig zu durchfahren. Bezüglich der Geschwindigkeiten wurden die Versuchspersonen darauf hingewiesen, sich an die zulässigen Maximalgeschwindigkeiten zu halten, ihre Geschwindigkeit aber in Abhängigkeit der Fahrscenarien nach eigenem Ermessen zu wählen.

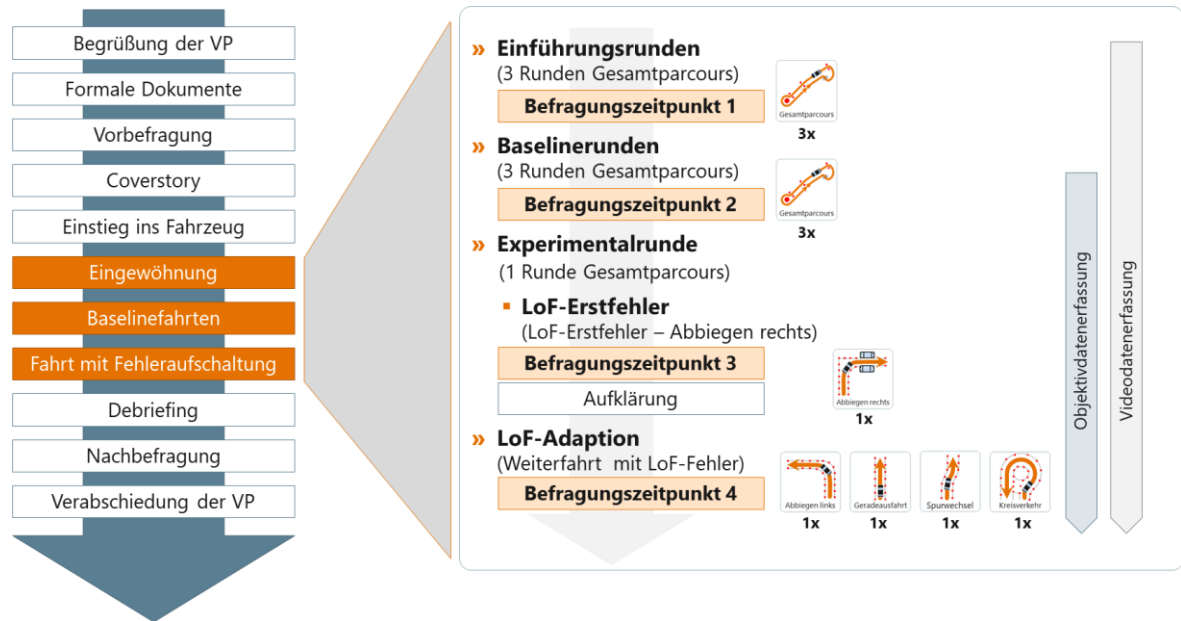


Abb. 3-12: Studienablauf der Nutzerstudie – Übersicht

Nach der Klärung aller Fragen starteten die Versuchspersonen in die Eingewöhnungsrunden und die Videoaufzeichnung wurde gestartet. Zur Eingewöhnung wurden insgesamt drei Runden auf dem Fahrparcours absolviert. Während die Versuchspersonen die erste Runde nutzen konnten, um den Parcoursverlauf, die einzelnen Fahrscenarien und das Fahrzeug kennenzulernen, wurden sie in der zweiten und dritten Runde dazu aufgefordert, die Geschwindigkeitsvorgaben einzuhalten. Am Ende der dritten Eingewöhnungsrunde fand die erste Befragung statt (BZP1). Im Anschluss an die Befragung wurde die Datenaufzeichnung der objektiven Fahrzeugmessdaten gestartet und die Versuchspersonen absolvierten insgesamt drei vollständige Baselinefahrten durch den Parcours. Am Ende der dritten Baselinefahrt führte die Versuchsleitung die zweite Befragung durch (BZP2). Anschließend absolvierten die Versuchspersonen die Experimentalfahrt. In dieser wurde im letzten Fahrscenario, dem „Abbiegen nach rechts“, der LoF-Fehler mit Rückfall auf die passive Dämpfungscharakteristik aufgeschaltet. Nach dem Absolvieren des Fahrscenarios wurden die Versuchspersonen erneut gebeten, am Befragungsort anzuhalt. Dort wurde die dritte Befragung durchgeführt (BZP3). Um eine neutrale Bewertung der Situation zu gewährleisten, wurde im Rahmen der Befragung das Wort „Fehler“ vermieden und der LoF mit dem Wort „Ereignis“ umschrieben. Im Anschluss an die Befragung erhielten die Versuchspersonen, unabhängig von ihrer Gruppenzugehörigkeit

(mit/ohne Warnung) die Information, dass es sich bei dem Ereignis um einen Fehler in der Lenkung handelt. Die Versuchspersonen wurden instruiert, ihre Fahrt fortzusetzen und die verbleibenden drei Fahrscenarien („Abbiegen nach links“, „Geradeausfahrt“, „Spurwechsel & Kreisverkehr“) im Rahmen einer Adaptionfahrt zu absolvieren. Nach dem Durchfahren des Kreisverkehrs wurden die Versuchspersonen gebeten, das Fahrzeug abzubremsen und zum Stehen zu bringen, um die vierte Befragung (BZP4) zur Bewertung der Adaptionfahrt durchzuführen. Sobald diese beendet war, wurden die Video- und die Datenaufzeichnung gestoppt und Versuchsleitung und Versuchsperson verließen das Fahrzeug. Die Versuchspersonen wurden dann über den wahren Hintergrund der Studie aufgeklärt. Mit diesem Wissen wurden sie gebeten, die Nachbefragung auszufüllen. Zum Abschluss wurden die Versuchspersonen verabschiedet und incentiviert.

### 3.1.6 Stichprobe

Insgesamt nahmen an der Studie 56 Versuchspersonen teil (Versuchsgruppe ohne Warnung:  $n = 28$ ; Versuchsgruppe mit Warnung:  $n = 28$ ). Die Stichprobe (46.4% weiblich, 53.6% männlich) wies ein mittleres Alter von  $M = 38.8$  Jahren ( $SD = 16.7$  Jahre, Spanne: 19 – 71 Jahre) und keine nicht korrigierten Seh- oder Hörbeeinträchtigungen auf. Alle Versuchspersonen besaßen einen gültigen Führerschein der Klasse B. Im Mittel waren die Versuchspersonen seit  $M = 19.7$  Jahren im Besitz ihres Führerscheins ( $SD = 16.8$  Jahre, Spanne: 1 – 52 Jahre). Die Versuchspersonen nannten eine jährliche Kilometerleistung von 120 bis 45000 km ( $M = 13412.9$  km,  $SD = 10389.1$  km). Die meisten Versuchspersonen gaben an, am häufigsten in einem Kleinwagen unterwegs zu sein ( $n = 19$ , Beispiel: Opel Corsa, VW Polo). Darauf folgte die Mittelklasse ( $n = 11$ , Beispiel: VW Passat), Geländewagen ( $n = 10$ , Beispiel: Skoda Enyaq), obere Mittelklasse ( $n = 7$ , Beispiel: 5er BMW), Oberklasse ( $n = 5$ , Beispiel: Mercedes S-Klasse) und Kleinstwagen ( $n = 3$ , Beispiel: Smart For Two,  $n = 1$  fehlende Angabe). Des Weiteren waren die meisten Privatfahrzeuge vom Baujahr 2020 bis 2024 ( $n = 15$ ), gefolgt von den Baujahren 2010 bis 2014 ( $n = 13$ ), 2005 bis 2009 und 2015 bis 2019 (jeweils  $n = 11$ ) und 1999 bis 2004 ( $n = 5$ ,  $n = 1$  fehlende Angabe). In Bezug auf die Erfahrung mit verschiedenen ADAS-Systemen (Advanced Driver Assistance Systems) wies die Stichprobe eine geringe Nutzungshäufigkeit auf. Insbesondere bei den Assistenzsystemen in der Querverführung gab der größte Anteil der Stichprobe an, solche Systeme nie oder selten zu nutzen (Lane Centering:  $n = 47$ , Lane Keeping:  $n = 41$ , Lane Departure Warning:  $n = 42$ , Blind-Spot Warning:  $n = 37$ ). Bezogen auf Assistenten in der Längsführung gaben ebenfalls mehr als die Hälfte der Versuchspersonen an, das System nie oder selten zu nutzen ( $n = 48$ ). Lediglich bei der Nutzung des Tempomaten zeigte sich ein gemischteres Bild (nie:  $n = 11$ , selten:  $n = 10$ , gelegentlich:  $n = 9$ , oft:  $n = 16$ , immer:  $n = 9$ ).

## 3.2 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Nutzerstudie detailliert dargestellt. Dazu folgt zunächst die Auswertung des Kriteriums der Spureinhaltung. Anschließend wird die Analyse der Objektivdaten sowie der Subjektivdaten erläutert. Dabei erfolgt jeweils eine getrennte Auswertung bezogen auf die erste Zielsetzung (Bewertung der Kontrollierbarkeit nach LoF-Erstfehleraufschaltung im Fahrszenario Rechtsabbiegen) und auf die zweite Zielsetzung (Exploration der allgemeinen Kontrollierbarkeit des LoFs in der Adaptionfahrt).

### 3.2.1 Spureinhaltung

Zur Überwachung der Spureinhaltung im Rahmen der Baseline- und Experimentalfahrten wurde der Fahrkorridor in den einzelnen Fahrszenarien beidseitig mit Pylonen begrenzt (siehe Kapitel 3.1.3). Das Berühren oder Überfahren einer Pylone im Zuge der Durchfahrt eines Fahrszenarios wurde als Verlassen der vorgegebenen Fahrspur gewertet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Studie hinsichtlich der Einhaltung der vorgegebenen Fahrspur als Indikator für die Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs im LoF-Fehlerzustand erläutert.

#### 3.2.1.1 Zielsetzung 1 – LoF-Erstfehler

Die Kontrollierbarkeit der LoF-Erstfehlersituation wurde im Fahrszenario „Abbiegen nach rechts“ untersucht. Dazu wurde, wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben, der LoF-Fehler unmittelbar vor dem Abbiegevorgang aufgeschaltet. Die Auswertung der Videodaten zeigte, dass alle Versuchspersonen beider Versuchsgruppen (jeweils  $n = 28$ ) die vorgegebene Fahrspur in dieser Situation eingehalten haben und es somit zu keinem Verlassen der definierten Fahrspur gekommen ist. Auch in den insgesamt 168 Baselinefahrten beider Gruppen kam es zu keinem Verlassen der definierten Fahrspur oder einer Berührung der aufgestellten Fahrzeugattrappen (siehe Abb. 3-4) während des Abbiegen nach rechts.

Um weitere Informationen zum Umgang mit der Fehlersituation zu erhalten, wurden neben dem Kriterium der Spureinhaltung auch das Verhalten der Versuchspersonen sowie deren Verhalten innerhalb des Fahrszenarios mithilfe von Videodaten und Versuchsleiterbeobachtungen ausgewertet (Mehrfachnennungen möglich). In der Situation zeigten die meisten Versuchspersonen in der Gruppe „ohne Warnung“ kein auffälliges Verhalten ( $n = 13$ , mit Warnung:  $n = 5$ ). In der Gruppe „mit Warnung“ schaute der Großteil der Versuchspersonen im Moment der Fehleraufschaltung auf das Display ( $n = 19$ , ohne Warnung:  $n = 2$ ). Darüber hinaus zeigten Versuchspersonen Veränderungen in der Mimik oder der Körperhaltung (mit Warnung:  $n = 4$ , ohne Warnung:  $n = 8$ ) oder reagierten mit einem verbalen Ausdruck, einer Frage oder einer Bemerkung (mit Warnung:  $n = 8$ , ohne Warnung:  $n = 7$ ). Hinsichtlich des Fahrverhaltens war in beiden Versuchsgruppen bei einem Teil der Versuchspersonen hektisches, kantiges oder spätes Lenken zu beobachten (mit Warnung:  $n = 12$ , ohne Warnung:  $n = 17$ ). Eine Verringerung der Geschwindigkeit zeigten sechs (mit Warnung) beziehungsweise drei (ohne Warnung) Versuchspersonen, während bei 13 (mit Warnung) beziehungsweise zehn (ohne Warnung) Versuchspersonen kein auffälliges Fahrverhalten von außen beobachtet werden konnte.

### 3.2.1.2 Zielsetzung 2 – LoF-Adaption

Im Rahmen der Adaptionfahrt sollte die Kontrollierbarkeit der Weiterfahrt mit der passiven LoF-Dämpfungscharakteristik explorativ untersucht werden. Dazu wurden in den drei Fahrscenarien „Abbiegen nach links“, „Geradeausfahrt“ und „Spurwechsel & Kreisverkehr“ das Einhalten der Fahrspurbegrenzungen während der durchgeführten Versuchsfahrten mithilfe der Videodatenauswertung überprüft. Während der insgesamt drei Baselinefahrten jeder Versuchsperson ( $n = 168$  Fahrten) durch die drei Fahrscenarien zeigte sich kein Fall eines Verlassens der definierten Fahrspur. Im Rahmen der Adaptionfahrt zeigte sich ebenfalls in den Fahrscenarien „Abbiegen nach links“ und „Geradeausfahrt“ kein Fall eines Verlassens der Fahrspur (jeweils  $n = 56$ ). Im Fahrscenario „Spurwechsel & Kreisverkehr“ verließ hingegen eine von 56 Versuchspersonen beim Einbiegen in den Kreisverkehr die vorgegebene Fahrspur. Zur Einordnung dieses Ergebnisses in den Gesamtkontext der Studie erfolgt eine explizite Auswertung dieses Falls unter Berücksichtigung der weiteren Objektiv- und Subjektivdaten in Kapitel 3.2.5 „Erweiterte Auswertung“.

### 3.2.2 Objektivdaten

Die Auswertung der während der Nutzerstudie aufgezeichneten Objektivdaten erfolgte auf Basis des in Kapitel 3.1.4.2 in Grundzügen beschriebenen Post-Processing- und Auswertungsprozesses. Im Folgenden werden in Kapitel 3.2.2.1 die Ergebnisse der Auswertungen für die LoF-Erstfehleraufschaltung während des Fahrscenarios „Abbiegen nach rechts“ vorgestellt und erläutert. Hierbei wird exemplarisch auch auf die angewendete Vorgehensweise bei der Auswertung eingegangen und die angewendeten Auswertungsmethoden erläutert. Im Anschluss werden in Kapitel 3.2.2.2 die Auswertungsergebnisse der Objektivdaten für die vier Adaptionsszenarien „Abbiegen nach links“, „Geradeausfahrt“, „Spurwechsel“ und „Kreisverkehr“ vorgestellt. Auf der Objektivdatenebene werden dabei – anders als auf der Subjektivdatenebene – die beiden Fahrmanöver „Spurwechsel“ und „Kreisverkehr“ des Fahrscenarios „Spurwechsel & Kreisverkehr“ getrennt betrachtet.

#### 3.2.2.1 Zielsetzung 1 – LoF-Erstfehler

Die für die beiden Versuchsgruppen „LoF mit Warnung“ und „LoF ohne Warnung“ während der Versuchsfahrten aufgezeichneten Objektivmessdaten für die LoF-Erstfehleraufschaltung im Rahmen des Fahrscenarios „Abbiegen nach rechts“ wurden entsprechend der beschriebenen Post-Processing-Schritte (siehe 3.1.4.2) ausgewertet.

Abb. 3-13 und Abb. 3-14 zeigen exemplarische Datenplots für die Objektivdaten auf der individuellen Nutzerebene. Während Abb. 3-13 die Daten einer Versuchsperson aus der Versuchsgruppe „LoF mit Warnung“ zeigt, sind in Abb. 3-14 die Daten einer Versuchsperson aus der Versuchsgruppe „ohne Warnung“ exemplarisch dargestellt. Die Diagramme enthalten jeweils die Messdaten der drei Baselinefahrten (blaue Kurven) sowie die Messdaten des Abbiegevorgangs mit LoF-Fehleraufschaltung (orange Kurve). Der Zeitpunkt der LoF-Fehleraufschaltung vor Beginn des Abbiegevorgangs ist jeweils durch die rote Linie gekennzeichnet.

In den Messdaten der Versuchsperson aus der Versuchsgruppe „mit Warnung“ (siehe Abb. 3-13) ist eine deutliche Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit während des Abbiegevorgangs

nach der LoF-Fehlerrückmeldung zu beobachten. Auch im Lenkverhalten treten größere Abweichungen im Vergleich zum Lenkverhalten in den Baselinefahrten auf. Der Lenkwinkelaufbau für das Einleiten des Abbiegevorgangs erfolgt später und mit leicht höherer Lenkrate. Die vom Fahrer gestellte Lenkwinkelamplitude ist nach der LoF-Fehlerrückmeldung deutlich höher als in den zuvor absolvierten Baselinefahrten.

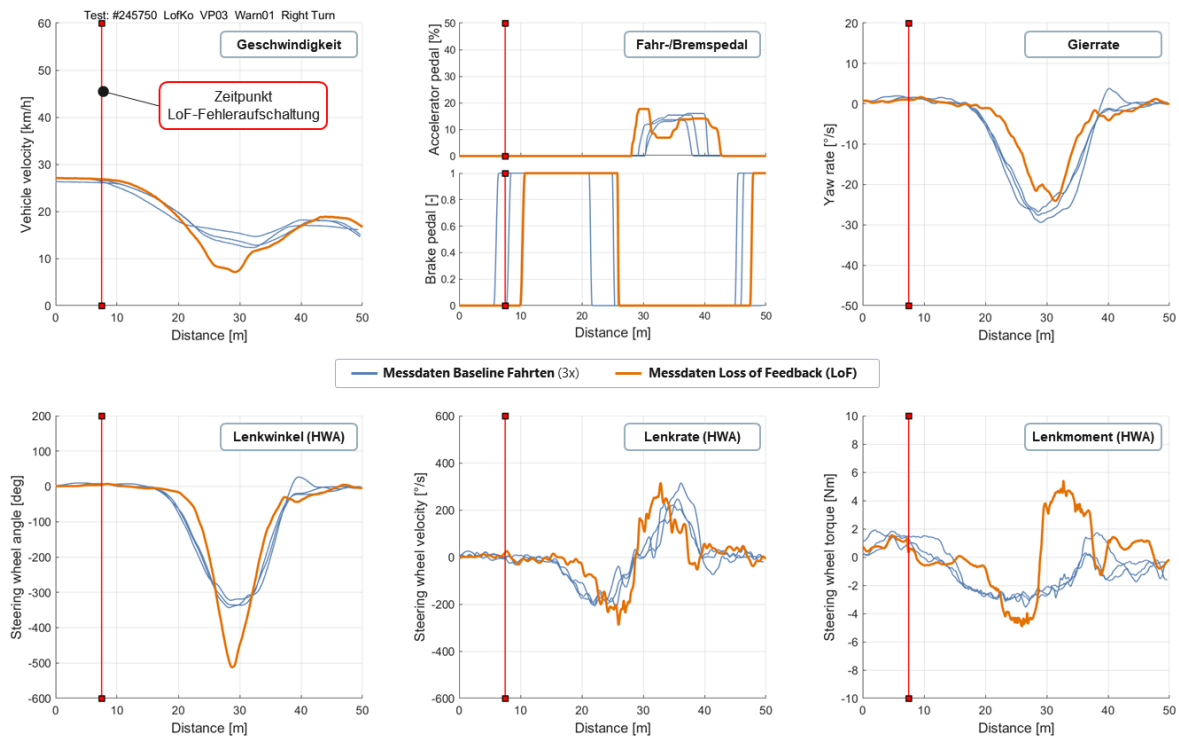


Abb. 3-13: LoF-Erstfehler beim „Abbiegen nach rechts“ mit Warnung – exemplarischer Messdatenplot (VP03)

Der gemessene Verlauf der Gierrate unterscheidet sich nach der LoF-Fehlerrückmeldung bedingt durch das veränderte Lenkverhalten und die abweichende Fahrzeuggeschwindigkeit von den Verläufen der Gierrate in den Baselinefahrten. Das HWA-Lenkmoment am Lenkrad unterscheidet sich in direkter Abhängigkeit von der verwendeten LoF-Dämpfungscharakteristik in der LoF-Fehlerrunde stark von den Verläufen des Lenkmoments in den Baselinefahrten. Es liegt dabei im Verlauf des Abbiegevorgangs ein in der Spitze um etwa 3 Nm größeres Lenkmoment am Lenkrad vor. Zusammengefasst zeigt die Analyse der exemplarischen Messdaten in Abb. 3-13 eine erkennbare Änderung des Fahr- und Lenkverhaltens infolge der Umschaltung des LoF-Erstfehlers bei der Absolvierung des Fahr Szenarios „Abbiegen nach rechts“.

Abb. 3-14 zeigt den Messdatenplot einer anderen Versuchsperson. In diesem Fall handelt es sich um eine Versuchsperson aus der Versuchsgruppe „ohne Warnung“. Bei dieser Versuchsperson sind sowohl in Bezug auf die Geschwindigkeit als auch auf das Lenkverhalten keine großen Unterschiede zwischen den Baseline- und der LoF-Fehlerrunde zu erkennen. Das HWA-Lenkmoment unterscheidet sich nach der Umschaltung des LoF-Fehlers aufgrund der verwendeten LoF-Dämpfungscharakteristik im Verlauf des Abbiegevorgangs allerdings auch hier deutlich von den Verläufen des Lenkmoments in den Baselinefahrten.

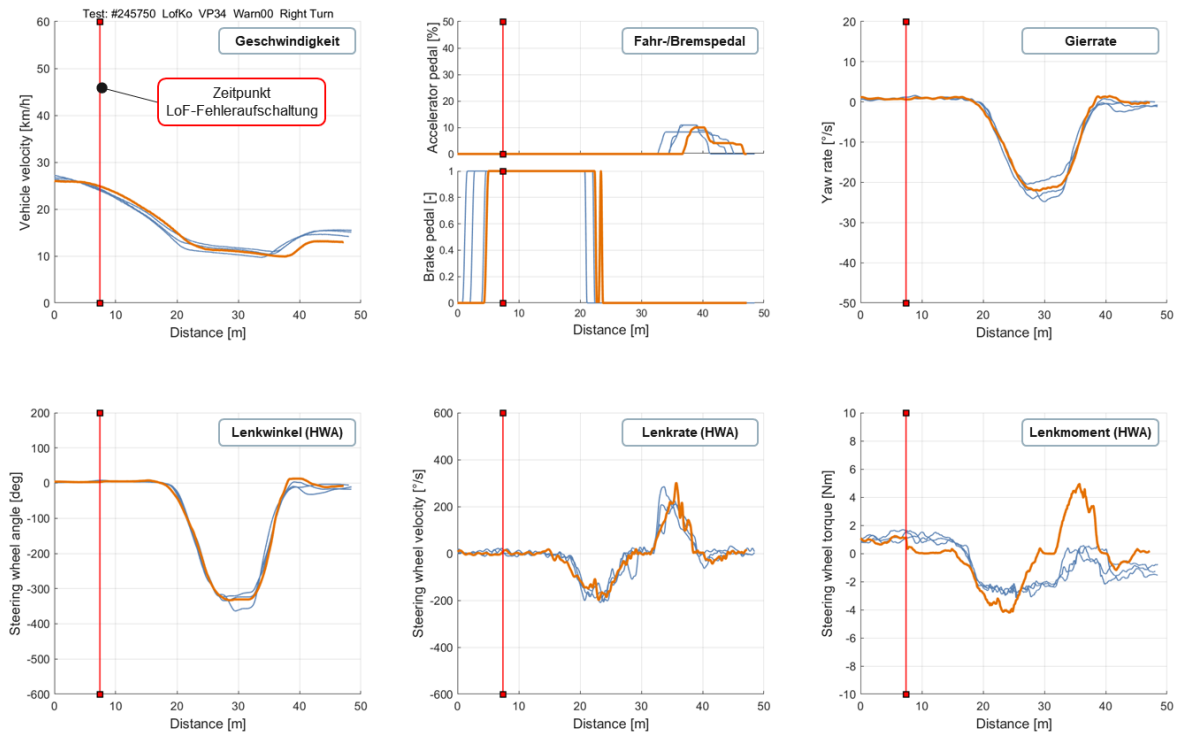


Abb. 3-14: LoF-Erstfehler beim „Abbiegen nach rechts“ ohne Warnung – exemplarischer Messdatenplot (VP34)

Für eine aggregierte Betrachtung der Signalverläufe der gezeigten Messgrößen innerhalb der beiden Versuchsgruppen (mit/ohne Warnung) wurden im Rahmen des Post-Processings die Messdaten aller Versuchspersonen einer Versuchsgruppe gemittelt und in gemittelte Signalverläufe überführt. Um zusätzlich zum gemittelten Signalverlauf die Streubreite der Messdaten darzustellen, wurden außerdem die Streubänder mit der zweifachen Standardabweichung (SD) um den jeweiligen gemittelten Signalverlauf berechnet. Innerhalb dieser Streubänder um die gemittelten Signalverläufe liegen 95% aller Signalwerte der Versuchspersonen der jeweiligen Versuchsgruppe. Die Berechnung des gemittelten Signalverlaufs und des zugehörigen Streubandes mit der zweifachen Standardabweichung wird anhand von Abb. 3-15 erläutert.

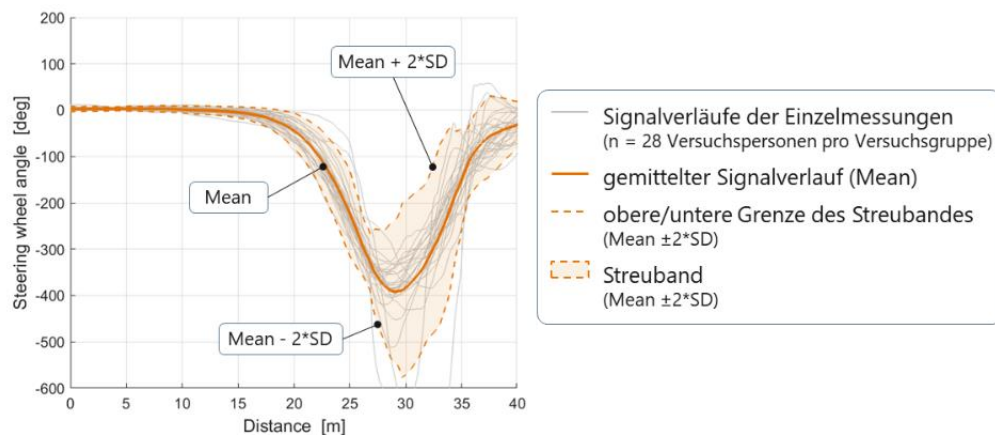


Abb. 3-15: Erläuterung – Mittelung der Signalverläufe und Berechnung eines Streubands für die Messungen einer Versuchsgruppe

Die daraus resultierenden gemittelten Signalverläufe und Streubänder für die relevanten Objektivmessgrößen sind für die Versuchsgruppe „mit Warnung“ in Abb. 3-16 dargestellt. Es ist zu beobachten, dass die Geschwindigkeit beim Durchfahren des Fahr Szenarios nach der LoF-Fehlerrückmeldung im Mittel um circa 4 km/h abfällt. Auch die Streubreite der Geschwindigkeit nimmt in der LoF-Fehlerrunde erkennbar zu. Der Lenkwinkelaufbau für den Abbiegevorgang erfolgt nach der LoF-Fehlerrückmeldung tendenziell etwas später. Im weiteren Verlauf ist die mittlere Lenkwinkelamplitude deutlich größer (um circa  $75^\circ$ ). Auch für den Lenkwinkel tritt in der LoF-Fehlerrunde eine deutlich größere Streuung der Messwerte auf, was auf eine größere Anzahl an Ausreißern mit großen Abweichungen im Lenkverhalten im Vergleich zu den Baselinefahrten schließen lässt. Die gemittelte Lenkrate nach dem LoF-Erstfehler ist im Mittel beim Einlenken nach rechts zunächst etwas geringer (circa um  $25^\circ/\text{s}$ ), im weiteren Verlauf dann aber im Mittel etwas höher. Das Zurücklenken erfolgt im Mittel mit vergleichbaren Lenkraten. Die Streuung der Lenkraten – insbesondere beim Zurücklenken – nimmt allerdings deutlich zu. Der abweichende Verlauf hinsichtlich der Gierrate ergibt sich aus den bereits erläuterten Unterschieden bei der Geschwindigkeit und dem Lenkwinkel. Die Unterschiede im HWA-Lenkmoment ergeben sich aufgrund der für die Nutzerstudie ausgewählten LoF-Dämpfungscharakteristik. Das Lenkmomentniveau liegt dabei – insbesondere beim Zurücklenken – deutlich über den Lenkmomentenwerten der Baselinefahrten.

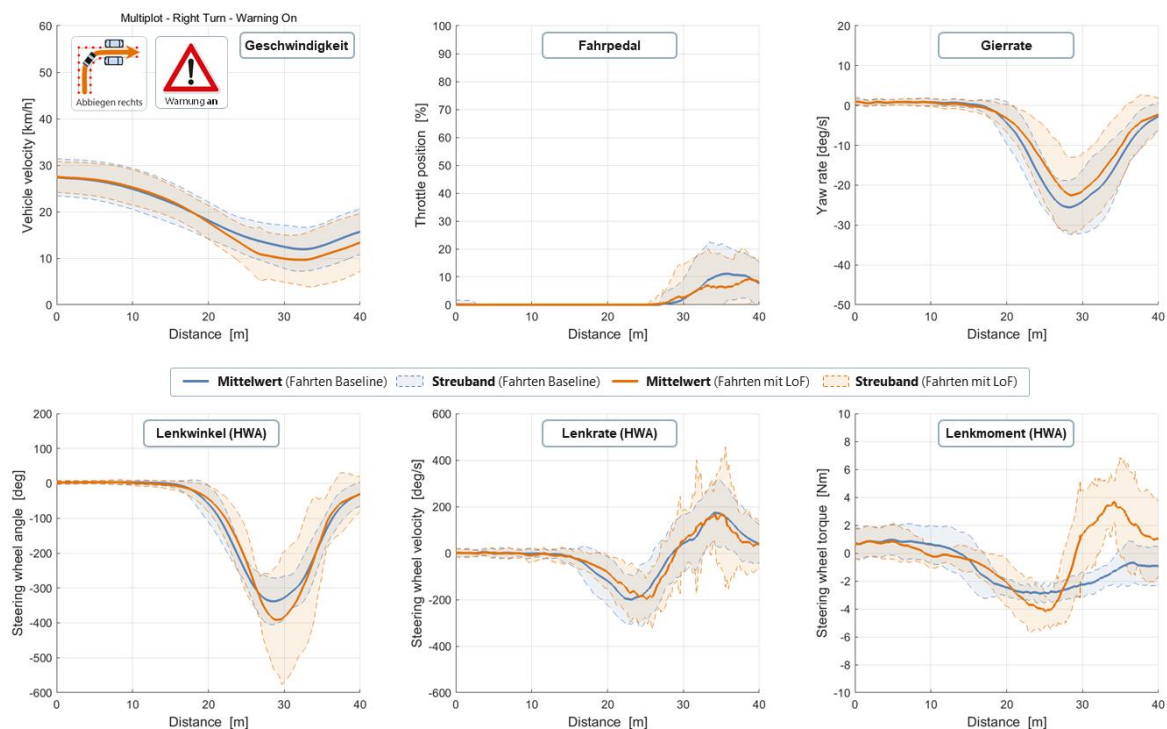


Abb. 3-16: Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Erstfehleraufschaltung beim „Abbiegen nach rechts“ mit Warnung

Die gemittelten Signalverläufe und Streubänder für die Versuchsgruppe „ohne Warnung“ sind in Abb. 3-17 dargestellt. Im Gegensatz zur Versuchsgruppe „mit Warnung“ sind die gemittelten Geschwindigkeitsverläufe und Streubänder bei der Versuchsgruppe „ohne Warnung“ nahezu

gleich. Es ist lediglich ein sehr geringer Abfall der Geschwindigkeit in der LoF-Fehlerrunde am Ende des Abbiegevorgangs zu erkennen. Generell ist anzumerken, dass das Geschwindigkeitsniveau in der Versuchsgruppe „ohne Warnung“ im Mittel um circa 2 km/h höher ist als in der Versuchsgruppe „mit Warnung“. Dieser leichte Unterschied im Geschwindigkeitsniveau kann beispielsweise auch auf äußere Einflüsse (z.B. Wetterbedingungen) zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung zurückzuführen sein. Auch im Lenkverhalten sind in dieser Versuchsgruppe deutlich geringere Abweichungen im Vergleich zum Baselineverhalten zu beobachten. Der Lenkwinkelaufbau für den Abbiegevorgang nach der LoF-Fehlerrückmeldung erfolgt nahezu gleich. Die Lenkwinkelamplitude ist mit circa  $25^\circ$  nur leicht größer. Die Streubreite des Lenkwinkelverlaufs nach der LoF-Fehlerrückmeldung ist deutlich geringer als in der Versuchsgruppe „mit Warnung“ und gegenüber dem Baselineverhalten nur geringfügig größer. Bezüglich der gemittelten Lenkrate zeigt sich eine zur Versuchsgruppe „mit Warnung“ vergleichbare Charakteristik. Die gemittelte Lenkrate nach dem LoF-Erstfehler ist im Mittel beim Einlenken nach rechts zunächst etwas geringer (circa um  $25^\circ/\text{s}$ ) im weiteren Verlauf dann aber im Mittel etwas höher. Das Zurücklenken erfolgt im Mittel mit vergleichbaren Lenkraten. Die Streuung der Lenkraten – insbesondere beim Zurücklenken – nimmt allerdings deutlich zu. Bei der Gierrate bestehen aufgrund der geringen Unterschiede in den Geschwindigkeits- und Lenkwinkelverläufen nur geringe Unterschiede zwischen den Verläufen in den Baseline- und der LoF-Fehlerrunde. Die Lenkmomentenverläufe sind qualitativ und quantitativ mit den Verläufen in der Versuchsgruppe „mit Warnung“ vergleichbar. Ein direkter Vergleich der gemittelten Geschwindigkeits- und Lenkwinkelverläufe und der zugehörigen Streubänder für die Baseline- und LoF-Fehlerrunden für die beiden Versuchsgruppen (mit/ohne Warnung) befindet sich im Anhang (siehe Abb. 6-16).

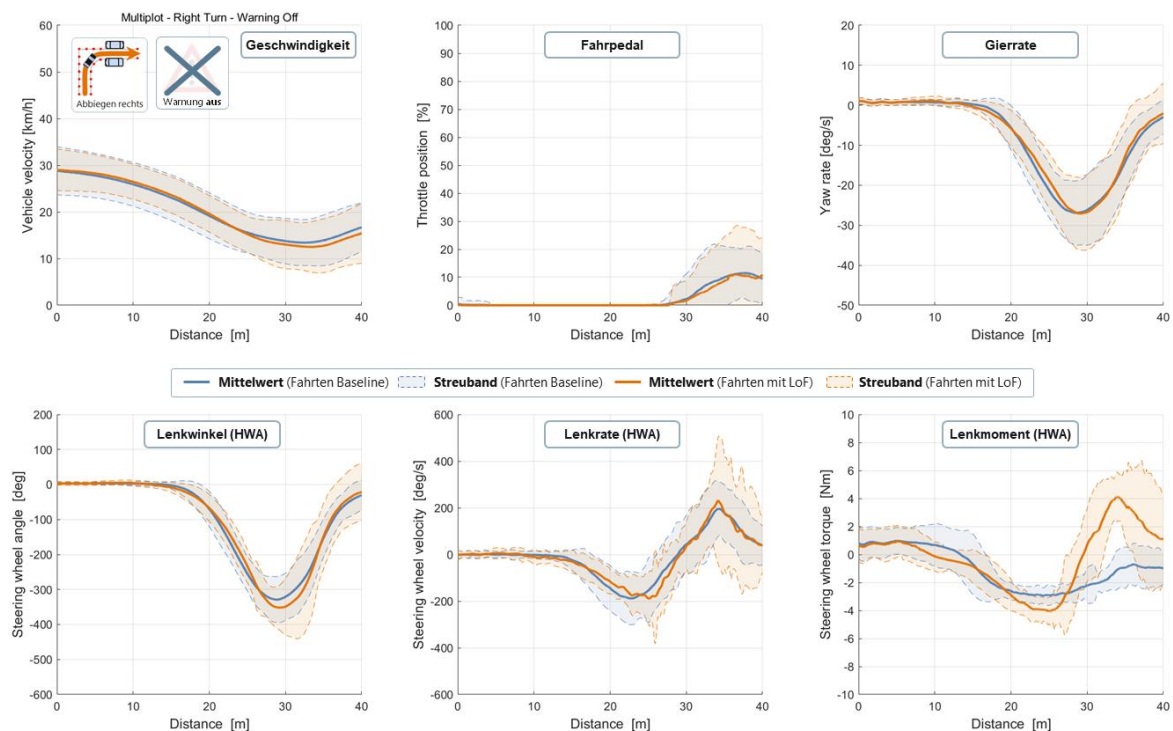


Abb. 3-17: Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Erstfehleraufschaltung beim „Abbiegen nach rechts“ ohne Warnung

Abb. 3-18 zeigt eine Gegenüberstellung von Boxplots relevanter Kennwerte für das Abbiegen nach rechts für die beiden Nutzergruppen. Die zugrundeliegenden Kennwerte wurden auf der individuellen Datenebene aus den Messdaten der einzelnen Versuchspersonen ermittelt. Bezüglich der Geschwindigkeit wurde die minimale Geschwindigkeit während des Abbiegevorgangs ermittelt. Während in der Versuchsgruppe „ohne Warnung“ die minimale Geschwindigkeit während des Abbiegevorgangs in der LoF-Fehlerrunde gegenüber den Baseline-Runden im Mittel nur um rund 1 km/h abnimmt, so beträgt die Geschwindigkeitsabnahme für die Versuchsgruppe „mit Warnung“ circa 3 km/h. Streuung und Verteilung der Geschwindigkeitskennwerte sind für beide Nutzergruppen nahezu gleich. Auch für den maximal auftretenden Lenkwinkel während des Abbiegevorgangs ist Ähnliches zu beobachten. In der Nutzergruppe „ohne Warnung“ ist der maximale Lenkwinkel in der LoF-Fehlerrunde im Mittel um etwa 30° größer. In der Versuchsgruppe „mit Warnung“ beträgt der Unterschied circa 60°. Insbesondere für den Lenkwinkel ist zudem zu beobachten, dass die Anzahl der extremen Ausreißer (Versuchspersonen, die während des Abbiegevorgangs sehr große Lenkwinkel stellen) in den LoF-Fehlerrunden zunehmen. Gleiche Beobachtungen können für die gestellten Lenkraten beim Zurücklenken in die Geradeausstellung angestellt werden. Hier liegen die mittleren Lenkraten in den beiden Versuchsgruppen nach der Aufschaltung des LoF-Fehlers im Mittel um circa 110°/s (Versuchsgruppe „ohne Warnung“) beziehungsweise 90°/s (Versuchsgruppe „mit Warnung“) oberhalb der in den Baselinefahrten ohne LoF-Fehlerrunde gemessenen Werten. Für die ermittelten maximalen Lenkmomente am HWA ergibt sich für die beiden Versuchsgruppen ein vergleichbares Bild. Die maximalen Lenkmomente liegen nach der LoF-Fehlerrunde im Mittel um rund 2 Nm über dem mittleren Wert aus den Baseline-Runden, wobei die Streuung der Werte nach Aufschaltung des LoF-Fehlers zunehmen.

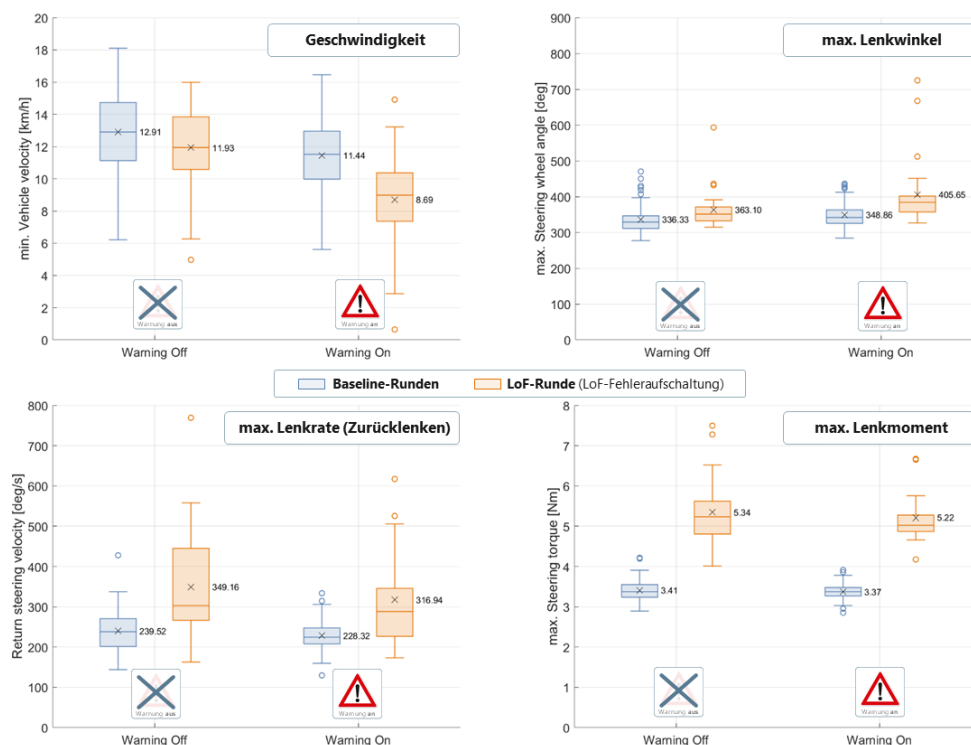


Abb. 3-18: LoF-Erstfehleraufschaltung beim „Abbiegen nach rechts“ mit/ohne Warnung – Boxplots für ermittelte Kennwerte innerhalb der Versuchsgruppen

Für einen genaueren Vergleich der individuellen Nutzerreaktionen auf das LoF in Bezug auf das Lenkverhalten wurden die Lenkwinkelverläufe der einzelnen Versuchspersonen einer erweiterten Auswertung unterzogen. Ziel hierbei war es, die individuellen Unterschiede der Versuchspersonen hinsichtlich ihres Lenkverhaltens in den Baselineunden ohne LoF-Fehlerrückmeldung und dem Lenkverhalten während des Abbiegevorgangs nach der Aufschaltung des LoF-Fehlers objektiv zu bewerten. Hierzu wurde der Abbiegevorgang nach rechts auf Basis des Lenkwinkels am Lenkrad in drei Abschnitte segmentiert (siehe Abb. 3-19). Den ersten Abschnitt bildet das Einlenken aus der Geradeausfahrt bis circa 50% des maximal durch die jeweilige Versuchsperson gestellten Lenkwinkels. Der zweite Abschnitt ist der Bereich um den maximalen Lenkwinkel, den dritten Abschnitt bildet das Zurücklenken. Innerhalb der drei Abschnitte wurde über eine objektive Bewertungsfunktion die Abweichung des LoF-Lenkverhaltens in Relation zur Abweichung der maximalen Abweichungen innerhalb der Baselineunden bewertet. Grundlage für das Bewertungskriterium bildeten ermittelte Root Mean Square(RMS) Abweichungen. Hierzu wurde für die einzelnen Abschnitte auf der individuellen Datenebene das Verhältnis der RMS-Abweichung des Lenkwinkelverlaufs in der LoF-Fehlerrunde und der maximalen RMS-Abweichung innerhalb der Baselinefahrten berechnet und bewertet. Bei einem Verhältnis  $\leq 1$  besteht „kein Unterschied“ im Lenkverhalten. Bei einem Verhältnis zwischen 1 und 2 liegt ein „geringer Unterschied“ vor, während ein Verhältnis  $\geq 2$  einen „großen Unterschied“ zwischen dem Lenkverhalten in der LoF-Fehlerrunde und dem Lenkverhalten in den Baselineunden kennzeichnet. Beispiele für die objektive Bewertung der Abweichungen im Lenkverhalten sind im Anhang in Abb. 6-17 dargestellt.

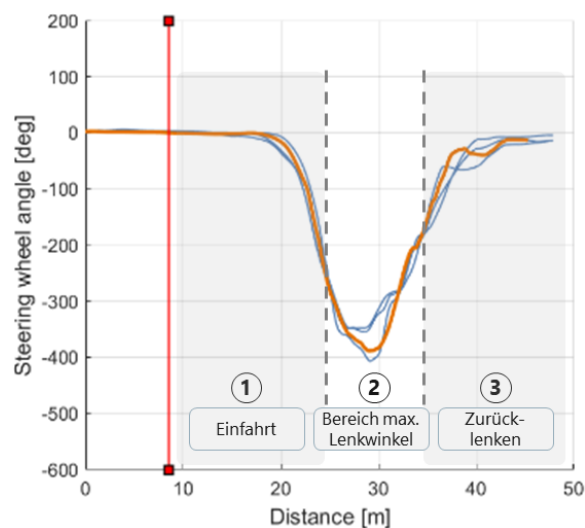


Abb. 3-19: Nutzerstudie – Vergleich der individuellen Nutzerreaktion (LoF-Lenkverhalten vs. Baseline) – Segmentierung des Abbiegevorgangs in drei Abschnitte

Die Ergebnisse der objektiven Bewertung des Lenkverhaltens „LoF-Erstfehlerfall vs. Baseline“ sind in Tab. 3-3 zusammengefasst. Für die Abschnitte „Einfahrt“ und „Zurücklenken“ (Ausfahrt) liegen annähernd ähnliche Häufigkeitsverteilungen hinsichtlich der Unterschiede zwischen dem individuellen Baseline-Lenkverhalten und dem Lenkverhalten in der LoF-Fehlerrunde vor.

In diesen Abschnitten treten bei etwa jeweils einem Drittel der Versuchspersonen Abweichungen in den unterschiedlichen Kategorien „kein Unterschied“, „geringer Unterschied“ und „großer Unterschied“ auf. Die Verteilung ist in den beiden Versuchsgruppen (mit/ohne Warnung) annähernd gleich. Im mittleren Abschnitt „Bereich des maximalen Lenkwinkels“ (Scheitelpunkt des Abbiegevorgangs) zeigt sich in der Versuchsgruppe „mit Warnung“ eine Verschiebung der Häufigkeitsverteilung hin zu größeren Unterschieden im Lenkverhalten. In der Versuchsgruppe „ohne Warnung“ zeigt sich keine Veränderung der gleichmäßigen Verteilung (jeweils circa ein Drittel der Versuchspersonen innerhalb der drei Kategorien).

| Unterschied/Abweichung<br>Lenkverhalten<br>(Lenkwinkelverlauf) LoF vs.<br>Baseline | Häufigkeit     |                 |                                            |                 |                            |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|--------------------------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
|                                                                                    | Einfahrt       |                 | Scheitelpunkt<br>(Bereich max. Lenkwinkel) |                 | Ausfahrt<br>(Zurücklenken) |                 |
|                                                                                    | mit<br>Warnung | ohne<br>Warnung | mit<br>Warnung                             | ohne<br>Warnung | mit<br>Warnung             | ohne<br>Warnung |
| <b>kein Unterschied</b>                                                            | 9              | 10              | 4                                          | 9               | 7                          | 7               |
| <b>geringer Unterschied</b>                                                        | 10             | 12              | 12                                         | 9               | 12                         | 10              |
| <b>großer Unterschied</b>                                                          | 9              | 6               | 12                                         | 10              | 9                          | 11              |
| Anzahl Datensätze/Nutzer                                                           | 28             | 28              | 28                                         | 28              | 28                         | 28              |

Tab. 3-3: Nutzerstudie - Vergleich der individuellen Nutzerreaktion (LoF-Lenkverhalten vs. Baseline) – objektive Bewertung der Unterschiede im Lenkverhalten

Eine abschließende Zusammenfassung der Erkenntnisse der Objektivdatenauswertung auf Basis der vorgestellten Auswertungen für die LoF-Erstfehleraufschaltung in Verbindung mit dem Fahrscenario „Abbiegen nach rechts“ erfolgt in der zusammenfassenden Diskussion der Ergebnisse der Nutzerstudie (siehe Kapitel 3.3.1)

### 3.2.2.2 Zielsetzung 2 – LoF-Adaption

Die Auswertung der erfassten Objektivmessdaten für die Bewertung der LoF-Adaption erfolgt analog zu der Auswertung der Messdaten für den LoF-Erstfehler im Fahrscenario „Abbiegen nach rechts“ anhand der gemittelten Signalverläufe und zugehörigen Streubänder mit der zweifachen Standardabweichung (SD) um den jeweiligen gemittelten Signalverlauf (vgl. Abb. 3-15). Zusätzlich wurden auf der individuellen Datenebene für jedes Fahrscenario relevante Kennwerte ermittelt und in entsprechenden Boxplots dargestellt.

Aufgrund der Aufklärung aller Versuchspersonen über den LoF-Fehler im Anschluss an die Befragung nach Absolvieren des Fahrscenarios „Abbiegen nach rechts“ mit LoF-Fehleraufschaltung werden im Folgendem für die LoF-Adaption die Ergebnisse für beide Versuchsgruppen zusammengefasst. Eine ergänzende Darstellung der Ergebnisse getrennt für die beiden Versuchsgruppen (mit/ohne Warnung) befindet sich im Anhang dieses Berichts (siehe Abb. 6-18 bis Abb. 6-29).

Abb. 3-20 zeigt die gemittelten Messdaten für das Fahrscenario „Abbiegen nach links“ in der LoF-Adaption. Es ist zu erkennen, dass sowohl in der Anfahrt auf das Fahrscenario als auch während des Abbiegevorgangs die mittlere Fahrgeschwindigkeit in der LoF-Adaptionsrunde um circa 5 km/h unterhalb des Geschwindigkeitsniveaus in den Baselineunden liegt. Die Streubreite der Geschwindigkeit ist dabei für die Adaptionsrunde und die Baselineunden vergleichbar. Bezüglich des Lenkverhaltes in Form des HWA-Lenkwinkelverlaufs und der zugehörigen Lenkrate sind in der LoF-Adaption keine großen Abweichungen vom Baselineverhalten zu erkennen. Lediglich die Streuung der Verläufe der Lenkrate beim Zurücklenken nimmt in der LoF-Adaption leicht zu. Die zu erkennenden Unterschiede bezüglich der gemittelten Gierratenverläufe lassen sich auf die verringerte Fahrgeschwindigkeit bei gleichem Lenkwinkelverlauf in der Adaption zurückführen. Deutlich zu erkennen sind die Unterschiede beim Lenkmoment, die sich aufgrund der gewählten LoF-Dämpfungscharakteristik ergeben. Insgesamt zeigt sich für das Fahrscenario „Abbiegen nach links“ aber eine gute Adaption der Versuchspersonen an das LoF.

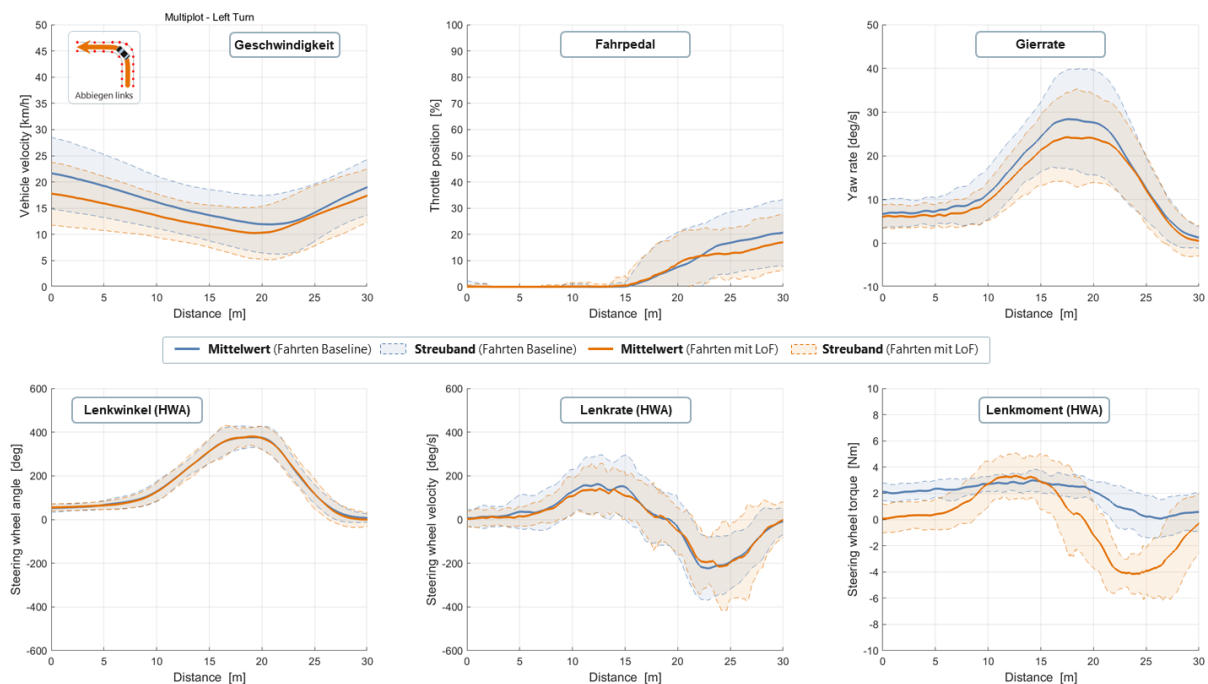


Abb. 3-20: Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption beim „Abbiegen nach links“ ( $n = 56$  – Zusammenfassung der Versuchsgruppen nach Aufklärung)

Ergänzend zu der Auswertung der gemittelten Signalverläufe sind die auf der individuellen Datenebene ermittelten Kennwerte für das Adaptionsszenario „Abbiegen nach links“ in Form von Boxplots in Abb. 3-21 dargestellt. Auch auf der Ebene der ermittelten Kennwerte zeigen sich mit Ausnahme für den Kennwert für das maximale Lenkmoment keine großen Unterschiede zwischen den Baselineunden und der LoF-Adaptionsfahrt im Fahrscenario „Abbiegen nach links“.

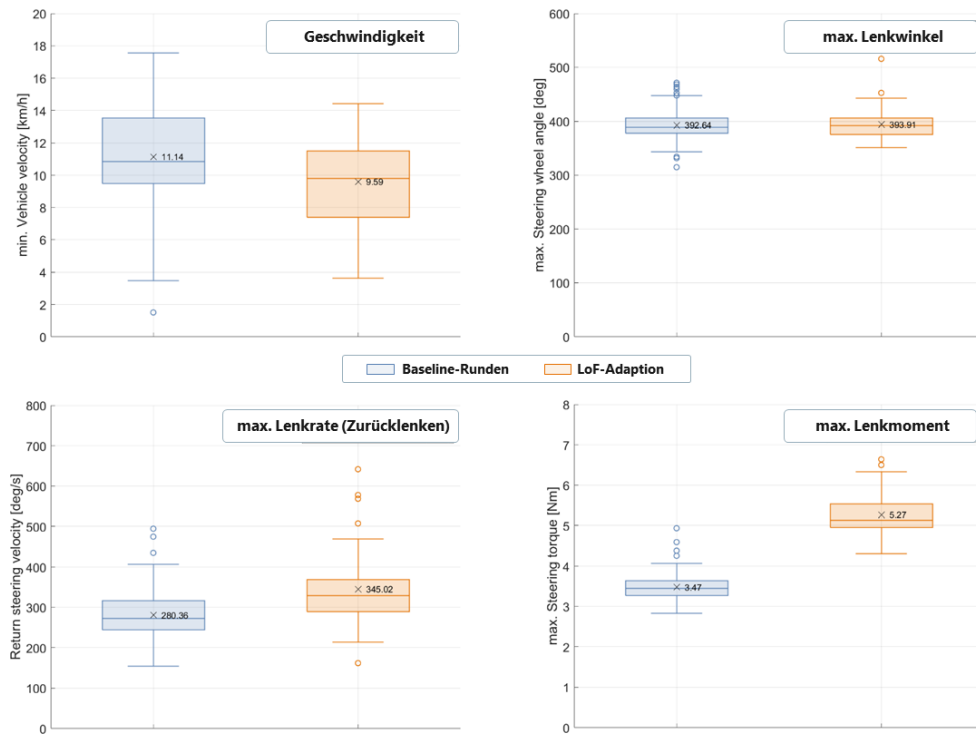


Abb. 3-21: LoF-Adaption „Abbiegen nach links“ – Boxplots für ermittelte Kennwerte ( $n = 56$  – Zusammenfassung der Versuchsgruppen nach Aufklärung)

Für das LoF-Adaptionsszenario „Geradeausfahrt“ sind die gemittelten Signalverläufe und Streubänder in Abb. 3-22 dargestellt.

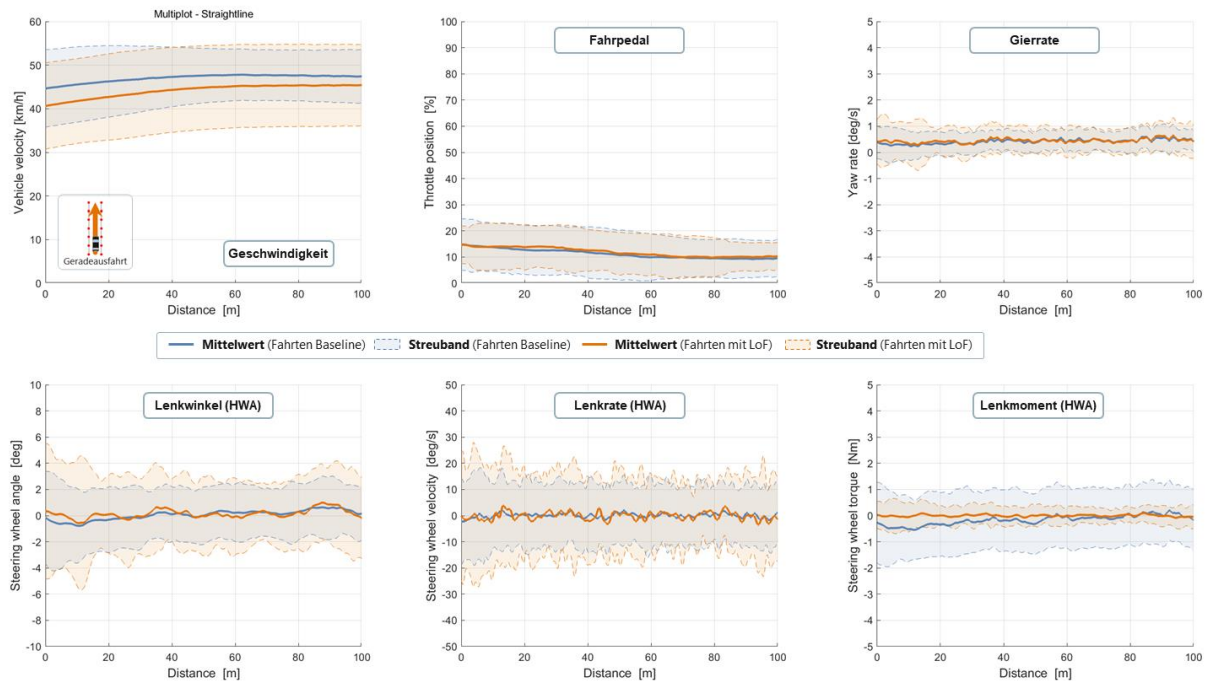


Abb. 3-22: Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption bei der „Geradeausfahrt“ ( $n = 56$  – Zusammenfassung der Versuchsgruppen nach Aufklärung)

Auch für die Geradeausfahrt ist in der Adaption eine Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit um circa 4 km/h im Vergleich zu den Baselinefahrten zu erkennen. Bezüglich der Lenkungsgrößen ist vor allem eine Zunahme der Streuung der Messgrößen zu erkennen. Dies ist vor allem auf die aufgrund der gewählten LoF-Dämpfungscharakteristik verringerten Mittenzentrierung der Lenkung zurückzuführen, die um die Nulllage zu mehr Lenkkorrekturen durch die Versuchspersonen führt. Dies ist auch anhand des ermittelten Kennwerts „Frequenz der Lenkkorrekturen“ in Abb. 3-23 zu erkennen. Grundsätzlich zeigt sich aber auch bei der Geradeausfahrt eine gute Adaption der Versuchspersonen an die LoF-Lenkcharakteristik.

In Abb. 3-23 sind ergänzend die auf der individuellen Datenebene ermittelten Kennwerte für das Adaptionsszenario „Geradeausfahrt“ in Form von Boxplots dargestellt. Bei diesem Fahr-szenario werden neben der Geschwindigkeit und dem maximalen Lenkmoment auch der RMS-Wert der Lenkrate sowie die Frequenz der Lenkkorrekturen [MAC80], [MAR06] als Kennwerte für die Lenkbewegungen um die Nulllage herangezogen. Während der RMS-Wert die Abweichungen der tatsächlichen Lenkrate von der ideellen Geradeausfahrt (keine Lenkrate) bewertet, so bewertet die Lenkfrequenz die Anzahl der Lenkkorrekturen in der Geradeausfahrt. Hierzu wird die Anzahl der Lenkwinkelumkehrungen pro Zeiteinheit ermittelt. Zu diesem Zweck werden zunächst die Zeitpunkte bestimmt, an denen die Lenkrate Null wird oder das Vorzeichen wechselt (also Wende- oder Sattelpunkte des Lenkradwinkels). Liegt die Lenkwinkeldifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten über einem definierten Schwellenwert (hier:  $1^\circ$ ), wird dies als Lenkumkehr gezählt. Die Lenkfrequenz errechnet sich dann aus der Anzahl der Umkehrereignisse geteilt durch die Länge des Messzeitraums.

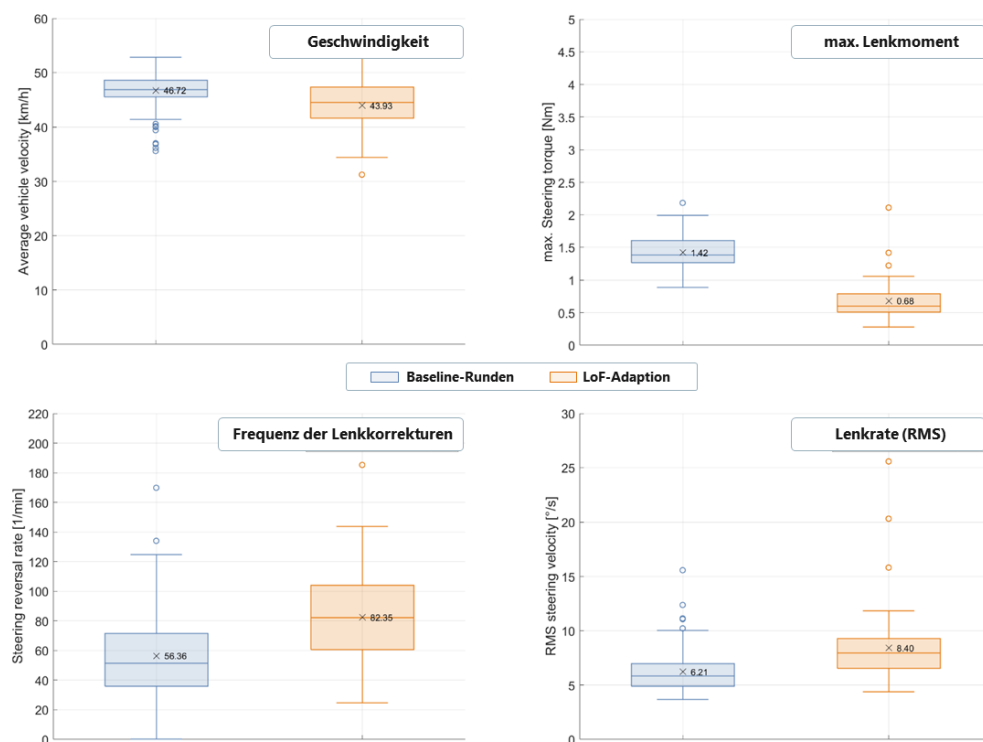


Abb. 3-23: LoF-Adaption „Geradeausfahrt“ – Boxplots für ermittelte Kennwerte ( $n = 56$  – Zusammenfassung der Versuchsgruppen nach Aufklärung)

Beim „Spurwechsel“ zeigen die Versuchspersonen eine gute Adaption an die LoF-Lenkcharakteristik (siehe Abb. 3-24). Auch für dieses Fahrscenario ist eine grundsätzliche Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit um circa 2 km/h in der Adaptionfahrt zu erkennen. Hinsichtlich des Lenkverhaltens sind keine großen Unterschiede zwischen den Baselinefahrten und der LoF-Adaption zu erkennen. Die erkennbaren Unterschiede bei den Lenkmomentenverläufen ergeben sich – wie schon in den anderen Fahrscenarien – aus der für die Nutzerstudie ausgewählten LoF-Dämpfungscharakteristik. Bezüglich der Lenkmomentenverläufe ist anzumerken, dass für den Spurwechsel das Lenkmomentenniveau in der LoF-Adaption unterhalb der Lenkmomente in den Baselinefahrten ohne LoF liegt. Die auf der individuellen Datenebene ermittelten Kennwerte für das Adaptionsszenario „Spurwechsel“ in Form von Boxplots sind in Abb. 3-25 dargestellt.

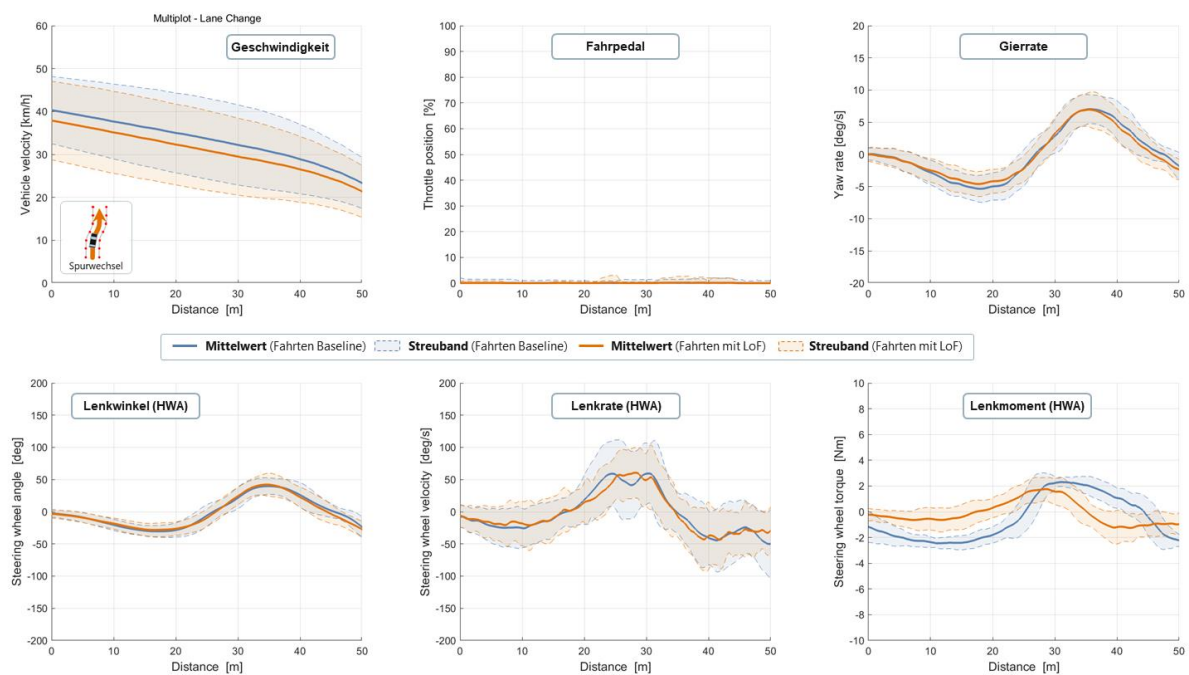


Abb. 3-24: Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption beim „Spurwechsel“ ( $n = 56$  – Zusammenfassung der Versuchsgruppen nach Aufklärung)

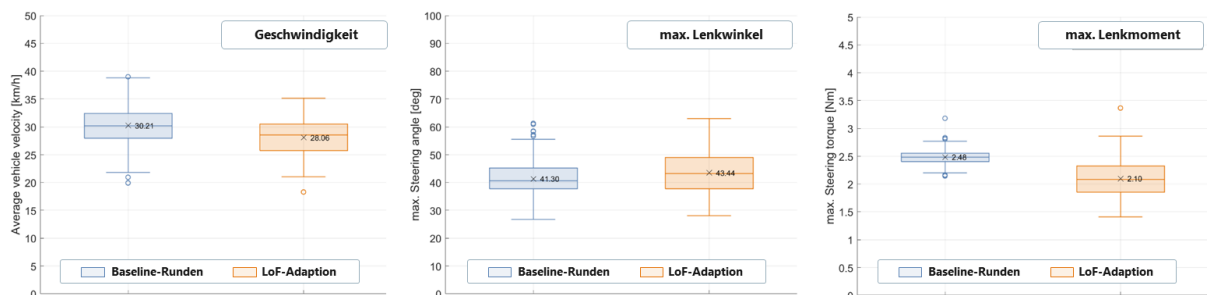


Abb. 3-25: LoF-Adaption „Spurwechsel“ – Boxplots für ermittelte Kennwerte ( $n = 56$  – Zusammenfassung der Versuchsgruppen nach Aufklärung)

Die Objektivmessdaten des abschließenden Adaptionsszenarios „Kreisverkehr“ sind in Abb. 3-26 dargestellt. Auch für dieses Szenario ist in der Adaption eine geringere Geschwindigkeit bei der Durchfahrt des Kreisverkehrs im Vergleich zu den vorangegangenen Baselinefahrten zu beobachten. Die Abnahme der gemittelten Geschwindigkeit beträgt hierbei circa 2 km/h. Auf Basis eines Vergleichs der gemittelten Verläufe und Streubänder der Lenkwinkel und der Lenkraten für die Baseline- und Adaptionenfahrten sind keine Unterschiede im Lenkverhalten der Versuchspersonen zu erkennen. Der Verlauf des Lenkmoments am HWA unterscheidet sich auch in diesem Adaptionsszenario aufgrund der LoF-Dämpfungscharakteristik in der Adaption deutlich vom gemittelten Lenkmomentenverlauf während der Baselinefahrten. Während die Maximalwerte für das Lenkmoment für das Abbiegen in den Kreisverkehr, das Umlenken im Kreisverkehr sowie das Verlassen des Kreisverkehrs während der LoF-Adaptionenfahrt deutlich über den Werten der Baselinefahrten liegen, so ist das Lenkmoment während der Fahrt im Kreisverkehr aufgrund des stationären Lenkzustandes in der LoF-Adaption deutlich geringer als während der Baselinefahrten. In Summe zeigen die objektiven Fahrzeugmessdaten aber auch für dieses Fahrscenario eine gute Adaption der Versuchspersonen an den LoF-Zustand.

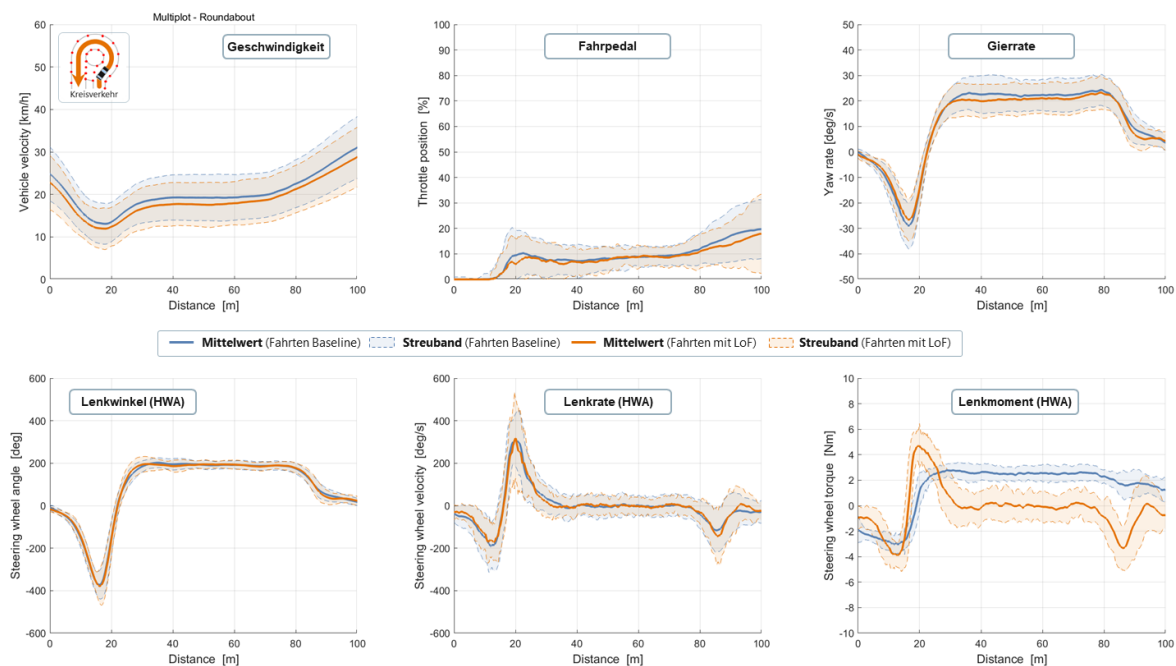


Abb. 3-26: Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption im „Kreisverkehr“  
( $n = 56$  – Zusammenfassung der Versuchsgruppen nach Aufklärung)

Auch für das Adaptionsszenario „Kreisfahrt“ sind die auf individueller Datenebene ermittelten Kennwerte während der Baseline- und der LoF-Adaptionsrunden in Form von Boxplots in Abb. 3-27 dargestellt. Neben der minimalen Geschwindigkeit bei der Durchfahrt des Kreisverkehrs und dem maximal auftretenden Lenkmoment am HWA wurden auch die Lenkraten für das Einbiegen in den Kreisverkehr (Abbiegen nach rechts) sowie das Umlenken im Kreisverkehr (Lenken nach links) ermittelt. Während für die Einfahrt in den Kreisverkehr in der Adaption und

den Baselinefahrten im Mittel vergleichbare Lenkraten auftreten, so ist die Lenkrate am HWA beim Umlenken in der LoF-Adaption etwas höher als in den zugehörigen Baselinefahrten.

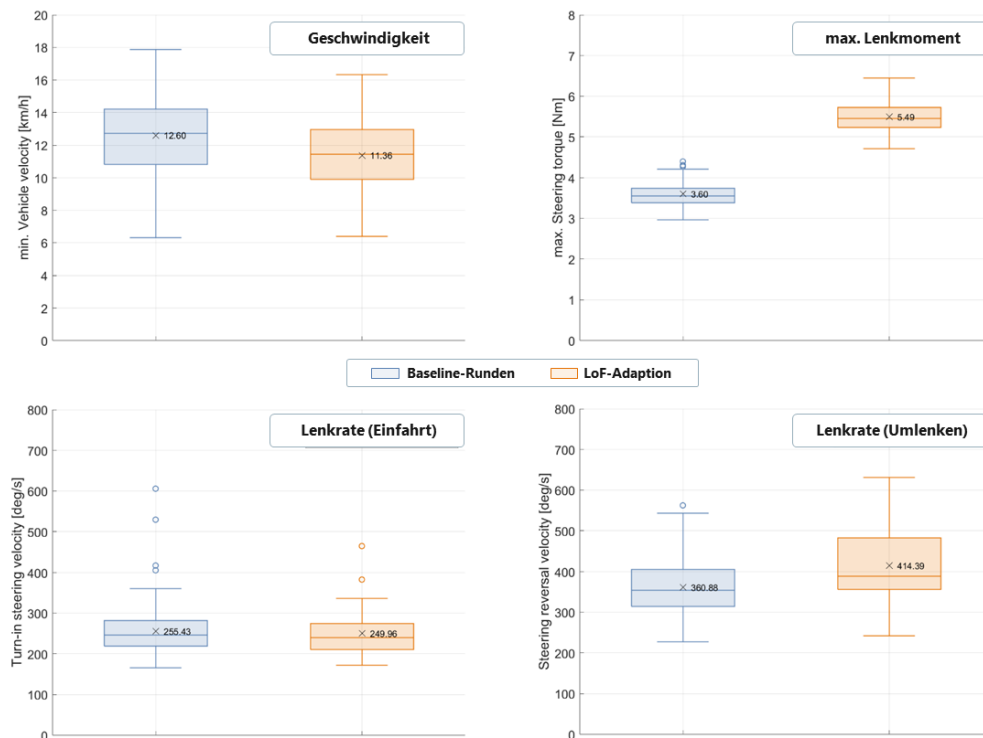


Abb. 3-27: LoF-Adaption „Spurwechsel“ – Boxplots für ermittelte Kennwerte  
( $n = 56$  – Zusammenfassung der Versuchsgruppen nach Aufklärung)

Eine abschließende Zusammenfassung der Erkenntnisse der Objektivdatenauswertung auf Basis der vorgestellten Auswertungen für die LoF-Adaption in den einzelnen Adaptionsszenarien erfolgt in der zusammenfassenden Diskussion der Ergebnisse der Nutzerstudie (siehe Kapitel 3.3.2).

### 3.2.3 Subjektivdaten

Neben den Daten, die sich spezifisch auf die Bewertung des LoF-Erstfehlers und der LoF-Adaptionsfahrt beziehen, wurden ebenfalls Daten erhoben, die eine Einschätzung der Anforderungen des Studiendesigns unabhängig vom LoF-Ereignis erlauben. Darüber hinaus bewerteten die Versuchspersonen im Rahmen der Nachbefragung den Umgang mit dem LoF in einer Alltagssituation. Die entsprechenden Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

### 3.2.3.1 Fehlerunabhängige Daten

Um die Anforderungen des Studiendesigns aus Sicht der Versuchspersonen und die Lernkurve im Fahrparcours über die Fahrten hinweg beurteilen zu können, wurden zu den verschiedenen BZP wiederholt Daten zum Vertrauen ins Fahrzeug, zur allgemeinen Schwierigkeit des Fahrparcours und zur Schwierigkeit der einzelnen Fahrszenarien erhoben.

Das Vertrauen ins Fahrzeug wurden zu allen vier BZP erhoben. Dazu sollten die Versuchspersonen auf einer siebenstufigen Skala angeben, inwiefern sie der Aussage „Ich vertraue dem Fahrzeug“ zustimmen. Abb. 3-28 illustriert die Mittelwerte nach der Eingewöhnung (BZP1), nach den Baselinefahrten (BZP2), nach der Fehleraufschaltung (BZP3) und nach der Adaptionfahrt (BZP4) für beide Gruppen getrennt. Deskriptiv zeigte sich, dass das Vertrauen ins Fahrzeug in beiden Versuchsgruppen (mit/ohne Warnung) zu den BZP 1 und 2 in einem hohen Bereich liegt. Nach der Fehleraufschaltung (BZP3) sinkt das Vertrauen in beiden Gruppen in einen mittleren Bereich ab. Eine Mixed ANOVA ergab keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Warnung (mit/ohne Warnung) und BZP ( $F(2,02,108.97) = 1.3$ ,  $p = .277$ ). Zudem zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt zwischen den beiden Gruppen „mit Warnung“ und „ohne Warnung“ ( $F(1,54) = 0.001$ ,  $p = .974$ ). Bezogen auf den Haupteffekt BZP zeigte sich ein signifikanter Unterschied mit  $F(2,02,108.97) = 51.64$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .49$ . Bonferroni-korrigierte Post-hoc Tests ergaben, dass das Vertrauen zu den BZP 1 und 2 jeweils signifikant höher war als zu den BZP 3 und 4 (jeweils  $p < .001$ ).

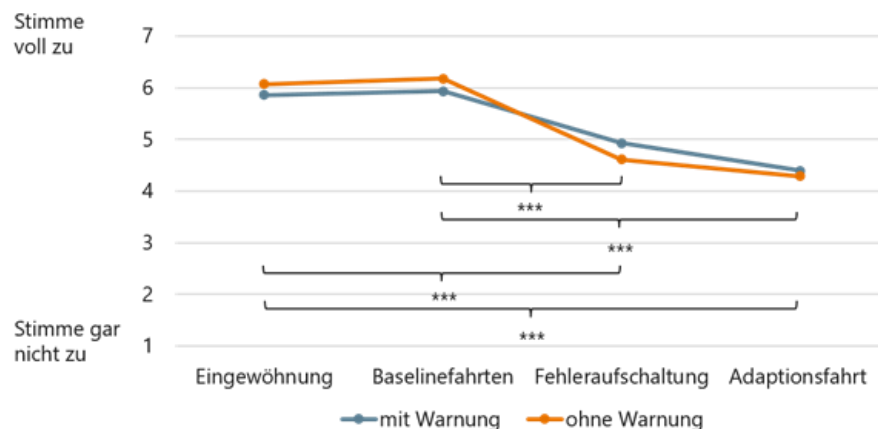


Abb. 3-28: Nutzerstudie – Vertrauen in das Fahrzeug zu den vier BZP

Die subjektiv wahrgenommene Schwierigkeit des Gesamtparcours wurde ebenfalls zu allen vier BZP mithilfe des Items „Wie anspruchsvoll empfinden Sie den Parcours insgesamt?“ erfasst. In Abb. 3-29 sind die jeweiligen Mittelwerte für beide Gruppen dargestellt. Zu den BZP 1 und 2 lagen die Mittelwerte deskriptiv in einem eher niedrigen Bereich, während sie nach der Fehleraufschaltung (BZP3) in einen mittleren bis eher hohen Bereich (BZP4) ansteigen. Eine Mixed ANOVA zeigte keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Warnung (mit/ohne Warnung) und BZP ( $F(3,162) = 0.57$ ,  $p = .634$ ). Es zeigte sich des Weiteren kein signifikanter Haupteffekt des Faktors Warnung ( $F(1,54) = 1.2$ ,  $p = .278$ ). Bezogen auf den Faktor BZP

zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt mit  $F(3,162) = 50.72$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .484$ . Post-hoc durchgeführte Bonferroni-korrigierte Tests ergaben, dass die Schwierigkeit zu den BZP 1 und 2 jeweils signifikant niedriger eingeschätzt wurde als zu den BZP 3 und 4 (jeweils  $p < .001$ ). Ebenfalls wurde der Parcours nach der Adaptionfahrt (BZP4) als signifikant ( $p < .01$ ) schwieriger wahrgenommen als direkt nach der Fehleraufschaltung (BZP3).

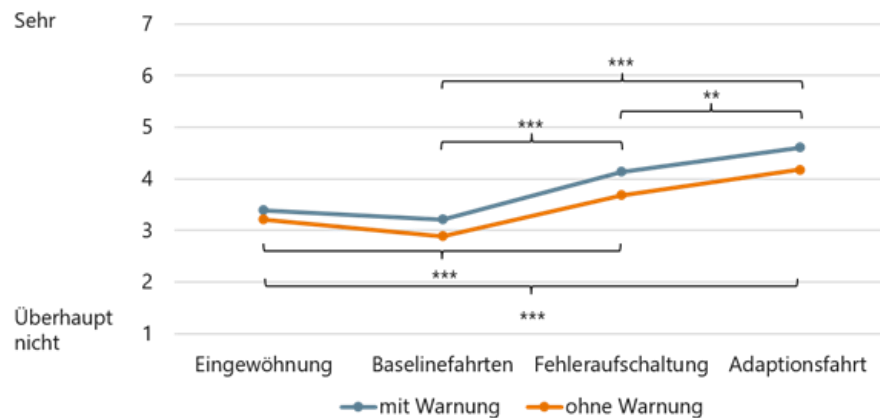


Abb. 3-29: Nutzerstudie – Schwierigkeit des Parcours zu den vier BZP

Zusätzlich zur Schwierigkeit des Gesamtparcours wurden auch Daten zu den Anforderungen der einzelnen Fahrszenarien erhoben. Zu den unterschiedlichen BZP sollten die Versuchspersonen jeweils einschätzen, wie hoch die mentalen und körperlichen Anforderungen sind, die das jeweilige Fahrszenario an sie stellt, und wie gut sie ihrer Meinung nach die Fahraufgabe innerhalb des Fahrszenarios erfüllt haben. Die Ergebnisse werden nachfolgend für jedes Fahrszenario einzeln dargestellt.

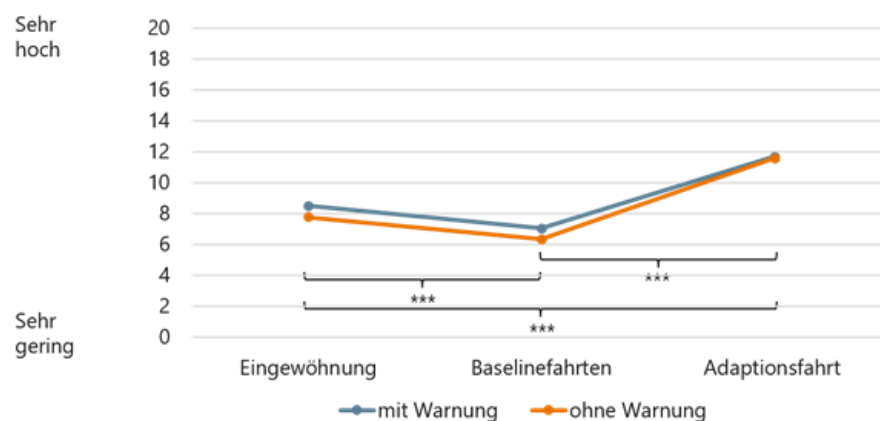


Abb. 3-30: Nutzerstudie – Mentale Anforderungen beim „Abbiegen nach links“

Die Anforderungen des Fahrszenarios „Abbiegen nach links“ wurde nach den Eingewöhnungsfahrten (BZP1), nach den Baselinefahrten (BZP2) und nach der Adaptionfahrt (BZP4) erhoben. Abb. 3-30 illustriert die deskriptive Auswertung der Mittelwerte beider Gruppen bezüglich

der mentalen Anforderungen zu den drei BZP. Deskriptiv gaben beide Gruppen nach den Eingewöhnungsrunden (BZP1) Mittelwerte im mittleren bis eher niedrigen Niveau an, die zum zweiten BZP niedriger ausfallen, nach der Adaptionfahrt (BZP4) aber wieder auf ein mittleres bis eher höheres Niveau ansteigen. Eine Mixed ANOVA zeigte keine signifikante Interaktion ( $F(1.52,82.28) = 0.367, p = .636$ ) zwischen den Faktoren Warnung und BZP sowie keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Warnung ( $F(1,54) = 0.273, p = .603$ ). Es zeigte sich jedoch ein signifikanter Haupteffekt des Faktors BZP mit  $F(1.52,82.28) = 72.73, p < .001, \eta^2_p = .57$ . Bonferroni-korrigierte post-hoc Tests ergaben signifikante Unterschiede zwischen allen BZP ( $p < .001$ ).

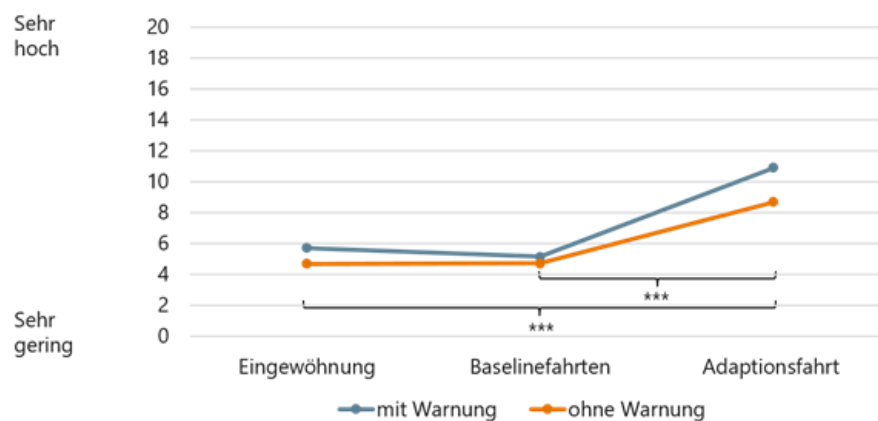


Abb. 3-31: Nutzerstudie – Körperliche Anforderungen beim „Abbiegen nach links“

Neben den mentalen Anforderungen wurden auch die körperlichen Anforderungen des Fahr-szenarios erfragt. Abb. 3-31 zeigt die Mittelwerte beider Gruppen zu den unterschiedlichen BZP. Deskriptiv zeigt sich ein vergleichbares Bild zum Verlauf der mentalen Anforderungen. Nach den Eingewöhnungs- (BZP1) sowie den Baselinefahrten (BZP2) gaben die Versuchspersonen im Mittel Werte im niedrigen Bereich an, die nach der Adaptionfahrt (BZP4) ansteigen. Eine Mixed ANOVA ergab keine signifikante Interaktion zwischen den beiden Faktoren Warnung und BZP ( $F(1.42,76.64) = 2.34, p = .119$ ) sowie keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Warnung ( $F(1,54) = 1.97, p = .166$ ). Bezüglich des Faktors BZP zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt mit  $F(1.42,76.64) = 84.74, p < .001, \eta^2_p = .61$ . Bonferroni-korrigierte post-hoc Tests ergaben einen signifikanten Unterschied zwischen BZP1 und BZP3 ( $p < .001$ ) und BZP2 und BZP3 ( $p < .001$ ).

Abb. 3-32 illustriert die deskriptiven Ergebnisse in Bezug auf die subjektive Einschätzung der Leistung im Fahr-szenario „Abbiegen nach links“. Im Mittel schätzten die Versuchspersonen ihre Leistung im Fahr-szenario zu den BZP 1 (Eingewöhnung) und 2 (Baselinefahrten) eher im höheren Bereich ein. Zum BZP4 nach den Adaptionfahrten sank diese Bewertung etwas ab. Eine Mixed ANOVA zeigte keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Warnung und BZP ( $F(1.38,74.39) = 0.14, p = .955$ ) sowie keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Warnung ( $F(1,54) = 0.15, p = .90$ ). Der Haupteffekt des Faktors BZP erwies sich dagegen als signifikant mit  $F(1.38,74.39) = 19.27, p < .001, \eta^2_p = .26$ . Post-hoc durchgeführte Bonferroni-korrigierte Tests ergaben zudem signifikante Unterschiede zwischen BZP1 und BZP2 sowie BZP1 und BZP3 (jeweils  $p < .01$ ) und BZP2 und BZP4 ( $p < .001$ ).

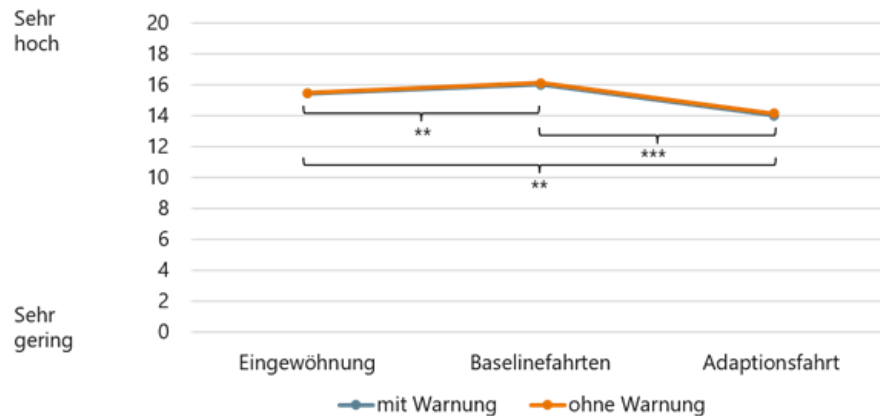


Abb. 3-32: Nutzerstudie – Subjektive Leistung beim „Abbiegen nach links“

Die Anforderungen des Fahr Szenarios „Geradeausfahrt“ wurden ebenfalls nach der Eingewöhnung (BZP1), nach den Baselinefahrten (BZP2) und nach der Adaptionsefahrt (BZP4) erhoben. Die deskriptiven Ergebnisse in Bezug auf die mentalen Anforderungen sind in Abb. 3-33 dargestellt.

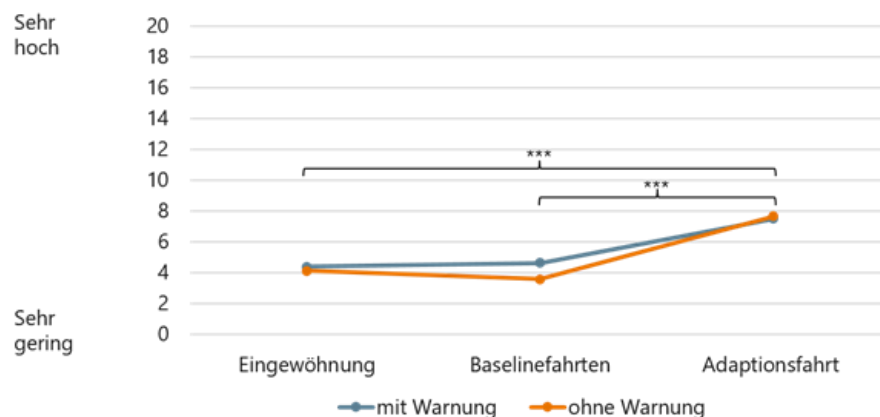


Abb. 3-33: Nutzerstudie – Mentale Anforderungen bei der „Geradeausfahrt“

Zu den BZP 1 und 2 wurden die mentalen Anforderungen im niedrigen Bereich eingeschätzt, während sie im Rahmen der Adaptionsefahrt (BZP4) anstiegen. Eine Mixed ANOVA zeigte keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Warnung und BZP ( $F(1.61, 86.69) = 0.98$ ,  $p = .365$ ) sowie keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Warnung ( $F(1, 54) = 0.2$ ,  $p = .657$ ). Der Haupteffekt des Faktors BZP wurde signifikant mit  $F(1.61, 86.69) = 42.39$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .44$ . Bonferroni-korrigierte Post-hoc Tests ergaben signifikante Unterschiede zwischen BZP1 und BZP4 sowie BZP2 und BZP4 (jeweils  $p < .001$ ).

Die körperlichen Anforderungen des Fahr Szenarios „Geradeausfahrt“ zeigten einen vergleichbaren Verlauf über die BZP hinweg (siehe Abb. 3-34).

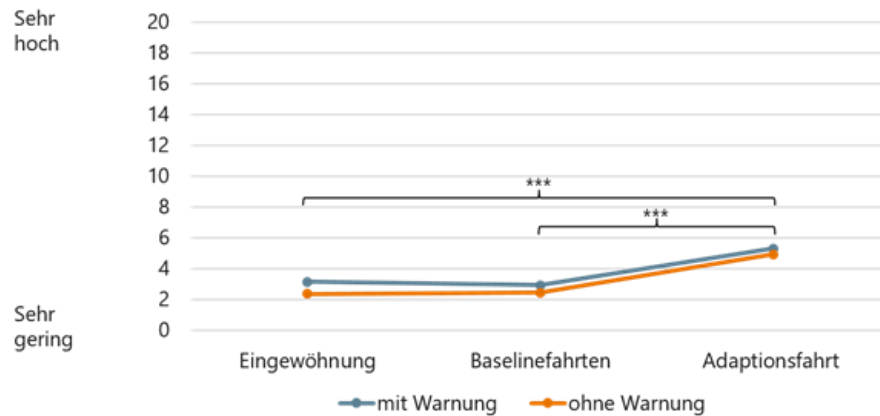


Abb. 3-34: Nutzerstudie – Körperliche Anforderungen bei der „Geradeausfahrt“

Die Anforderungen wurden zu BZP 1 (Eingewöhnung) und 2 (Baselinefahrten) im niedrigen Bereich eingeschätzt, während sie zum BZP4 (Adaptionsefahrt) im Mittel höher empfunden wurden. Eine Mixed ANOVA ergab keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Warnung und BZP ( $F(1,32,71.41) = 0.24, p = .693$ ) und keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Warnung ( $F(1,54) = 0.82, p = .37$ ). Bezogen auf den Faktor BZP ergab sich ein signifikanter Haupteffekt mit  $F(1,32,71.41) = 38.41, p < .001, \eta^2_p = .42$ . Bonferroni-korrigierte Post-hoc Tests ergaben signifikante Unterschiede zwischen BZP1 und BZP4 sowie zwischen BZP2 und BZP4 (jeweils  $p < .001$ ).

In Bezug auf die subjektive Bewertung der eigenen Leistung im Fahrscenario „Geradeausfahrt“ zeigten sich in beiden Gruppen Mittelwerte im hohen Bereich zu allen drei BZP (siehe Abb. 3-35). Eine Mixed ANOVA ergab keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Warnung und BZP ( $F(2,108) = 1.12, p = .331$ ) sowie keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Warnung ( $F(1,54) = 0.94, p = .336$ ). Der Haupteffekt des Faktors BZP wurde signifikant mit  $F(2,108) = 9.96, p < .001, \eta^2_p = .16$ . Bonferroni-korrigierte Post-hoc Tests zeigten signifikante Unterschiede zwischen BZP1 und BZP4 ( $p < .05$ ) und BZP2 und BZP4 ( $p < .001$ ) auf.

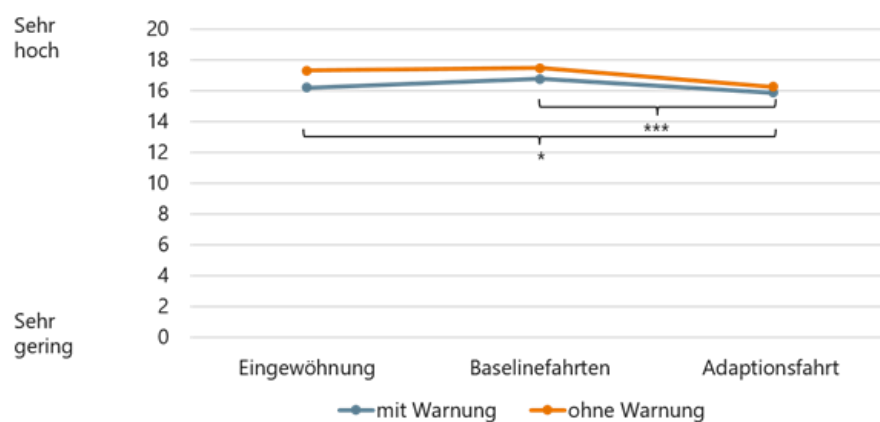


Abb. 3-35: Nutzerstudie – Subjektive Leistung bei der „Geradeausfahrt“

Die Anforderungen des Fahrszenarios „Spurwechsel & Kreisverkehr“ wurden nach der Eingewöhnung (BZP1), nach den Baselinefahrten (BZP2) und nach der Adaptionfahrt (BZP4) erhoben. Abb. 3-36 illustriert die Ergebnisse der deskriptiven Auswertung der mentalen Anforderungen. Der Kreisverkehr wurde hinsichtlich der mentalen Anforderungen im mittleren Bereich eingeschätzt. Nach den Baselinefahrten (BZP2) gaben die Versuchspersonen ein leicht niedrigeres Ausmaß an, während die mentalen Anforderungen in der Adaptionfahrt (BZP4) höher ausfielen. Eine Mixed ANOVA ergab keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Warnung und BZP ( $F(2,108) = 0.38, p = .684$ ) sowie keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Warnung ( $F(1,54) = 0.79, p = .78$ ). Für den Haupteffekt des Faktors BZP zeigte sich ein signifikantes Ergebnis ( $F(2, 108) = 36.18, p < .001, \eta^2_p = .401$ ). Bonferroni-korrigierte Post-hoc Tests ergaben einen signifikanten Unterschied zwischen BZP1 und BZP2 ( $p < .01$ ) sowie signifikante Unterschiede zwischen BZP1 und BZP4 sowie BZP2 und BZP4 (jeweils  $p < .001$ ).

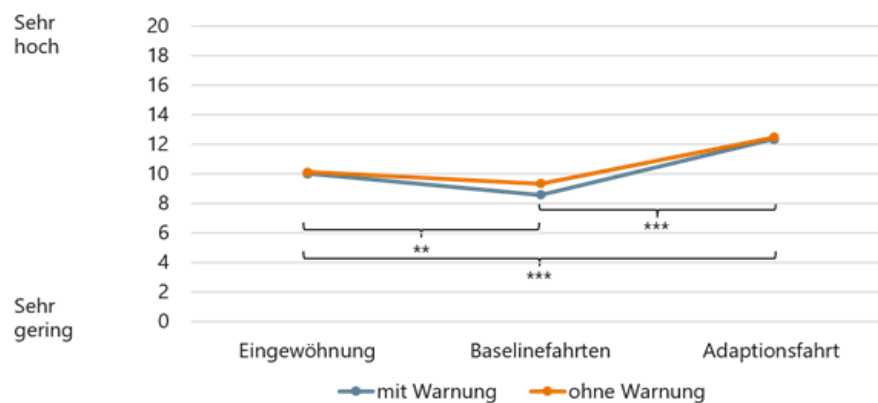


Abb. 3-36: Nutzerstudie – Mentale Anforderungen („Spurwechsel & Kreisverkehr“)

Hinsichtlich der körperlichen Anforderungen im Fahrszenario „Spurwechsel & Kreisverkehr“ gaben die Versuchspersonen im Mittel Einschätzungen im mittleren bis erhöhten Bereich an. Verglichen zum BZP1 (Eingewöhnung) fielen die Bewertungen deskriptiv zum BZP2 (Baselinefahrten) geringer und zum BZP4 (Adaptionfahrt) höher aus (siehe Abb. 3-37). Eine Mixed ANOVA ergab eine signifikante Interaktion der Faktoren Warnung und BZP mit  $F(2,108) = 4.34, p < .05, \eta^2_p = .074$ . Aus diesem Grund wurde statt der Haupteffekte die einfachen Haupteffekte beider Faktoren betrachtet. Für den Faktor Warnung zeigten sich mittels Welch-Test keine signifikanten Unterschiede. Für den Faktor BZP zeigte sich sowohl für die Gruppe „mit Warnung“ ( $F(2,54) = 36.98, p < .001, \eta^2_p = .58$ ) als auch für die Gruppe „ohne Warnung“ ( $F(2,54) = 13.54, p < .001, \eta^2_p = .33$ ) signifikante einfache Haupteffekte. In der Gruppe „mit Warnung“ ergaben Bonferroni-korrigierte Post-hoc Tests signifikante Unterschiede zwischen BZP1 und BZP4 sowie zwischen BZP2 und BZP4 (jeweils  $p < .001$ ). In der Gruppe „ohne Warnung“ zeigten sich Unterschiede zwischen BZP1 und BZP2, BZP1 und BZP4 (jeweils  $p < .05$ ) sowie BZP2 und BZP4 ( $p < .001$ ).

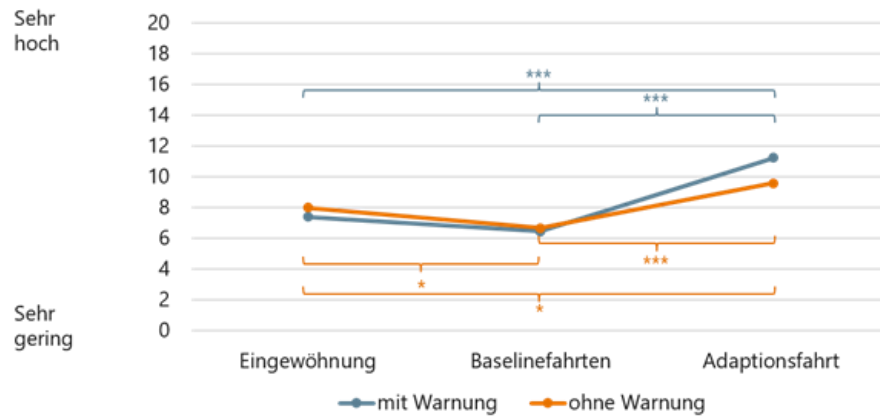


Abb. 3-37: Nutzerstudie – Körperliche Anforderungen („Spurwechsel & Kreisverkehr“)

Bezogen auf die subjektive Beurteilung der Leistung im Fahrszenario „Spurwechsel & Kreisverkehr“ zeigten sich Mittelwerte im höheren Bereich zu allen drei BZP (siehe Abb. 3-38). Eine Mixed ANOVA ergab eine signifikante Interaktion der beiden Faktoren Warnung und BZP mit  $F(1.77, 95.57) = 3.25$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2_p = .057$ . Bei der Betrachtung der einfachen Haupteffekte zeigte sich kein signifikanter einfacher Haupteffekt des Faktors Warnung für alle drei BZP. Hinsichtlich des Faktors BZP ergab sich kein signifikanter Haupteffekt für die Gruppe „ohne Warnung“ ( $F(2, 54) = 2.79$ ,  $p = .07$ ). In der Gruppe „mit Warnung“ zeigte sich ein signifikanter einfacher Haupteffekt mit  $F(2, 54) = 9$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .25$ . Bonferroni-korrigierte Post-hoc Tests ergaben einen signifikanten Unterschied zwischen BZP1 und BZP2 sowie zwischen BZP2 und BZP4 (jeweils  $p < .01$ ).

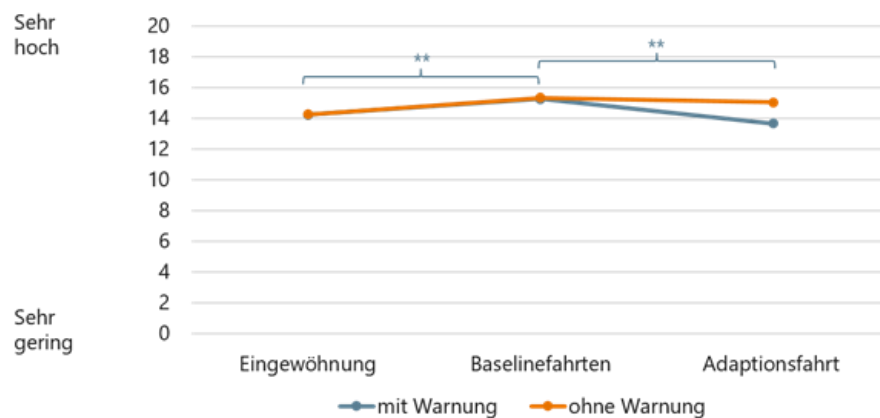


Abb. 3-38: Nutzerstudie – Subjektive Leistung (Spurwechsel & Kreisverkehr)

Die Anforderungen, die das Fahrszenario „Abbiegen nach rechts“ an die Versuchspersonen gestellt hat, wurden nach der Eingewöhnung (BZP1), nach den Baselinefahrten (BZP2) sowie direkt nach der Erstfehleraufschaltung unmittelbar vor Durchfahrt des Manövers (BZP3) erhoben. Bezogen auf die mentalen Anforderungen gaben die Versuchspersonen nach den Eingewöhnungsfahrten (BZP1) im Durchschnitt eine mittlere Ausprägung an. Deskriptiv sank Aus-

maß der mentalen Anforderungen nach den Baselinefahrten (BZP2), während sich die Anforderungen nach dem LoF-Erstfehler (BZP3) auf ein eher höheres Ausmaß steigerten (siehe Abb. 3-39). Eine Mixed ANOVA ergab keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Warnung und BZP ( $F(2,108) = 0.96, p = .386$ ) und keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Warnung ( $F(1,54) = 0.23, p = .633$ ). Für den Faktor BZP ergab sich ein signifikanter Haupteffekt mit  $F(2,108) = 88.33, p < .001, \eta^2_p = .621$ . Bonferroni-korrigierte Post-hoc Tests zeigten signifikante Unterschiede zwischen allen drei BZP auf (jeweils  $p < .001$ ).

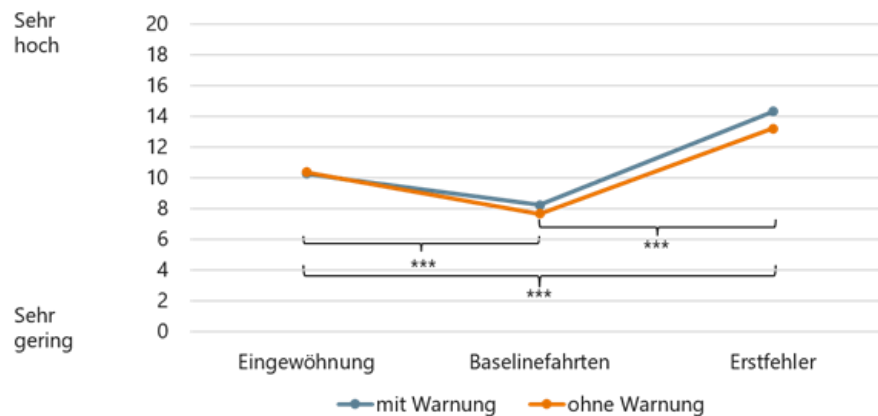


Abb. 3-39: Nutzerstudie – Mentale Anforderungen beim „Abbiegen nach rechts“

Die zum Absolvieren des Fahr Szenarios „Abbiegen nach rechts“ benötigte körperliche Aktivität wurde zu den ersten beiden BZP (Eingewöhnung & Baselinefahrten) im eher niedrigen Bereich bewertet. Nach Erstfehleraufschaltung (BZP3) stieg die Bewertung deskriptiv in den mittleren Bereich der Skala (siehe Abb. 3-40).

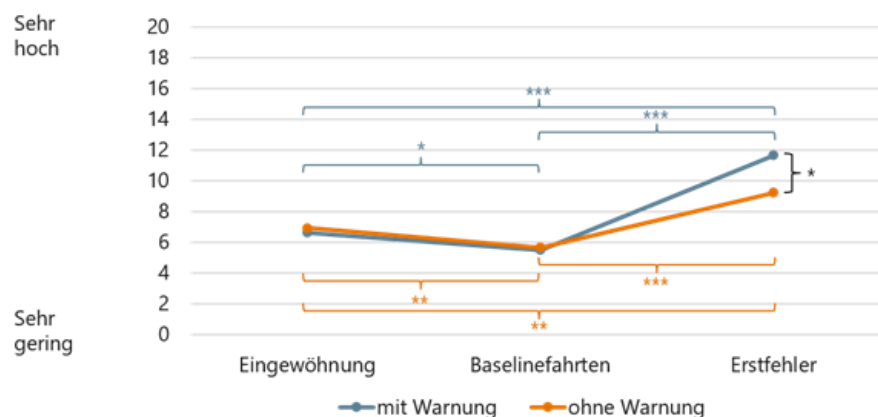


Abb. 3-40: Nutzerstudie – Körperliche Anforderungen beim „Abbiegen nach rechts“

Eine Mixed ANOVA zeigte eine signifikante Interaktion zwischen den beiden Faktoren Warnung und BZP mit  $F(1.68,90.92) = 10.06, p < .001, \eta^2_p = .16$ . Die daraufhin betrachteten einfachen Haupteffekte ergaben mittels Welch-Test einen signifikanten einfachen Haupteffekt des Faktors Warnung zum BZP3 (Erstfehleraufschaltung,  $p < .05$ ). Zu den anderen BZP zeigte

sich jeweils kein signifikanter einfacher Haupteffekt des Faktors Warnung. Hinsichtlich der einfachen Haupteffekte des Faktors BZP ergab sich sowohl für die Gruppe „mit Warnung“ ( $F(2,54) = 83.68$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .76$ ) als auch für die Gruppe „ohne Warnung“ ( $F(1.6,43.11) = 30.52$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .53$ ) ein signifikanter einfacher Haupteffekt. Für die Gruppe mit Warnung zeigten Bonferroni-korrigierte Post-hoc Tests signifikante Unterschiede zwischen BZP1 und BZP2 ( $p < .05$ ), zwischen BZP1 und BZP3 sowie BZP2 und BZP3 (jeweils  $p < .001$ ). Für die Gruppe „ohne Warnung“ zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen BZP1 und BZP2, zwischen BZP1 und BZP3 (jeweils  $p < .01$ ) sowie zwischen BZP2 und BZP3 ( $p < .001$ ).

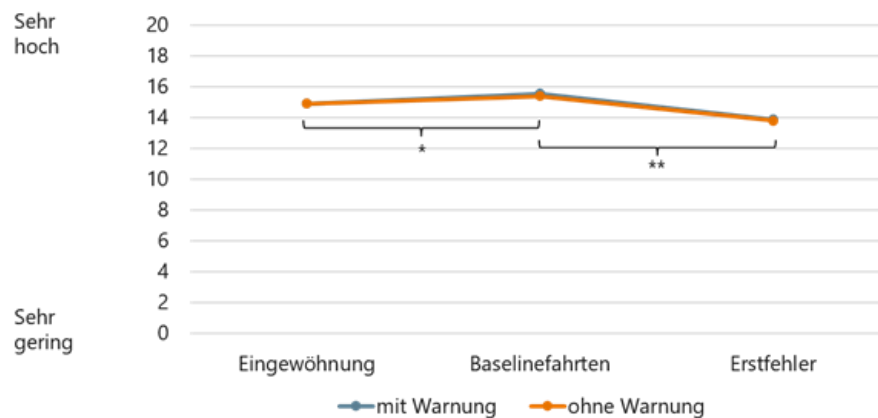


Abb. 3-41: Nutzerstudie – Subjektive Leistung im Fahrscenario „Abbiegen nach rechts“

Hinsichtlich der subjektiv eingeschätzten Leistung im Fahrscenario „Abbiegen nach rechts“ (siehe Abb. 3-41) gaben die Versuchspersonen im Mittel Werte im oberen Bereich der Skala an. Deskriptiv sinkt diese Einschätzung leicht nach Durchfahrt des Manövers mit Erstfehleraufschaltung (BZP3). Eine Mixed ANOVA zeigte weder eine signifikante Interaktion der beiden Faktoren Warnung und BZP ( $F(1.36,73.49) = 0.02$ ,  $p = .938$ ) noch einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Warnung ( $F(1,54) = 0.14$ ,  $p = .905$ ). Für den Haupteffekt des Faktors BZP zeigte sich jedoch ein signifikantes Ergebnis mit  $F(1.36,73.49) = 9.21$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2_p = .146$ . Bonferroni-korrigierte Post-hoc Tests ergaben signifikante Unterschiede zwischen BZP1 und BZP2 ( $p < .05$ ) und BZP2 und BZP3 ( $p < .01$ ).

### 3.2.3.2 Zielsetzung 1 – LoF-Erstfehler

Im Rahmen der Befragung zum Erstfehler äußerten die Versuchspersonen der Gruppe „mit Warnung“, im Moment der Fehleraufschaltung „überrascht / erschrocken“ ( $n = 7$ ) oder „verwundert / verwirrt / irritiert“ ( $n = 6$ ) gewesen zu sein. Weitere Versuchspersonen gaben Kommentare an, die den Kategorien „unwohl / ängstlich / unsicher“ ( $n = 5$ ), „genervt / unangenehm“ ( $n = 3$ ) oder „gestresst“ ( $n = 2$ ) zuzuordnen sind. Keine Äußerungen wurden von fünf Versuchspersonen abgegeben. In der Gruppe „ohne Warnung“, gaben ebenfalls die meisten Versuchspersonen an, „verwundert / verwirrt / irritiert“ ( $n = 9$ ) oder „überrascht / erschrocken“ ( $n = 7$ ).

gewesen zu sein. Äußerungen der Kategorie „unwohl / ängstlich / unsicher“ gaben vier Versuchspersonen und der Kategorie „genervt / unangenehm“ gab eine Versuchsperson an. Keine Äußerungen wurden von sieben Versuchspersonen abgegeben.

Neben der emotionalen Reaktion wurde im Anschluss auch die kognitive Reaktion erfragt. In beiden Gruppen gaben jeweils die meisten Personen an, gedacht zu haben, dass etwas mit dem Auto beziehungsweise der Lenkung nicht stimmt (mit Warnung:  $n = 9$ , ohne Warnung:  $n = 7$ ). Weitere Gedanken wurden den Kategorien „Was ist das? / Was ist da los?“ (mit Warnung:  $n = 6$ , ohne Warnung:  $n = 5$ ), „Was muss / soll ich machen?“ (mit Warnung:  $n = 4$ , ohne Warnung:  $n = 3$ ), „Ich muss meine Fahrweise anpassen.“ (mit Warnung:  $n = 3$ , ohne Warnung:  $n = 4$ ), „Gedanken zum Experiment“ (mit Warnung:  $n = 1$ , ohne Warnung:  $n = 5$ ) und „War ich das?“ (mit Warnung:  $n = 1$ , ohne Warnung:  $n = 1$ ) zugeordnet. Des Weiteren berichteten Versuchspersonen von Anstrengung (mit Warnung:  $n = 2$ , ohne Warnung:  $n = 3$ ) oder gaben keine Angaben zu ihren Gedanken an (mit Warnung:  $n = 5$ , ohne Warnung:  $n = 7$ ).

Bezüglich der behavioralen Reaktion auf den Erstfehler gaben in beiden Gruppen die meisten Versuchspersonen an, gegengelenkt beziehungsweise mehr gelenkt zu haben (mit Warnung:  $n = 13$ , ohne Warnung:  $n = 20$ ). Weitere berichtete Reaktionen umfassten eine Geschwindigkeitsreduktion (mit Warnung:  $n = 5$ , ohne Warnung:  $n = 3$ ), ein stärkeres Festhalten des Lenkrads (mit Warnung:  $n = 3$ , ohne Warnung:  $n = 4$ ) und ein höherer Kraftaufwand (mit Warnung:  $n = 3$ , ohne Warnung:  $n = 1$ ). In der Gruppe „mit Warnung“ berichteten vier Versuchspersonen von einer Nachfrage an die Versuchsleitung und drei Versuchspersonen von dem Lesen der Warnmeldung. Keine Äußerungen zu einer behavioralen Reaktion wurden von drei (mit Warnung) beziehungsweise vier (ohne Warnung) Versuchspersonen gemacht.

Ausschließlich die Gruppe, die eine Warnung bei Fehleraufschaltung erhalten hat ( $n = 28$ ), wurde spezifisch zur Warnung befragt. Hier gab der Großteil der Versuchspersonen an, die Warnung bemerkt zu haben ( $n = 26$ , 92.9%), während zwei Personen berichteten, keine Warnung bemerkt zu haben (7.1%). Unter den Personen, die etwas bemerkt haben, beschrieben 22 Personen den akustischen Warnton und 19 Personen die rote Färbung des Displays (Mehrfachnennungen waren möglich). Insgesamt gaben 11 Personen (39.3%) an, dass sie die Warnung in der Situation als hilfreich empfunden haben. Die restlichen 17 Versuchspersonen (60.7%) empfanden die Warnung nicht als hilfreich und begründeten dies damit, dass die Warnung in dieser Situation nicht zu verarbeiten gewesen sei ( $n = 4$ ), die Warnung eher irritiert beziehungsweise abgelenkt habe ( $n = 2$ ), die Warnung unbekannt sei ( $n = 1$ ) oder ein Anhalten in der Situation nicht sinnvoll gewesen sei ( $n = 1$ ).

Beide Gruppen wurden darüber hinaus gefragt, wie sie sich im Falle einer solchen Warnung (Gruppe „mit Warnung“) beziehungsweise im Falle eines solchen Ereignisses (Gruppe „ohne Warnung“) im realen Straßenverkehr verhalten würden. In der Gruppe „mit Warnung“ gab der Großteil der Stichprobe an, dass sie an den Straßenrand fahren und anhalten würden ( $n = 20$ ). Als weitere mögliche Verhaltensweisen wurde genannt, die Geschwindigkeit zu reduzieren ( $n = 3$ ), jemanden / eine Werkstatt anzurufen ( $n = 2$ ), vorsichtiger weiterzufahren ( $n = 2$ ), gegenzusteuern ( $n = 1$ ) oder sich zu verhalten wie zuvor ( $n = 1$ ). In der Gruppe ohne Warnung

nannten die meisten Versuchspersonen, in einer solchen Situation wahrscheinlich rechts ranzufahren und anzuhalten oder die Geschwindigkeit zu reduzieren (jeweils  $n = 9$ ). Darüber hinaus wurde genannt, sich wie zuvor zu verhalten ( $n = 5$ ), gegenzusteuern ( $n = 5$ ), jemanden / eine Werkstatt anzurufen ( $n = 2$ ) oder vorsichtiger weiterzufahren ( $n = 2$ ). Zwei Versuchspersonen äußerten sich nicht über ihr antizipiertes Verhalten.

Bezüglich der wahrgenommenen Sicherheit im Fahrscenario mit LoF-Fehlerrückmeldung lag der Mittelwert beider Gruppen im mittleren Bereich bis eher unsicheren Bereich (mit Warnung:  $M = 5.1$ ,  $SD = 1.1$ ; ohne Warnung:  $M = 4.4$ ,  $SD = 1.3$ ). Darüber hinaus zeigte sich ein signifikanter Gruppenunterschied. Die Versuchspersonen mit Warnung waren signifikant unsicherer als die Versuchspersonen ohne Warnung mit  $t(54) = -2.001$ ,  $p < .05$ ,  $d = -0.535$  (siehe Abb. 3-42).

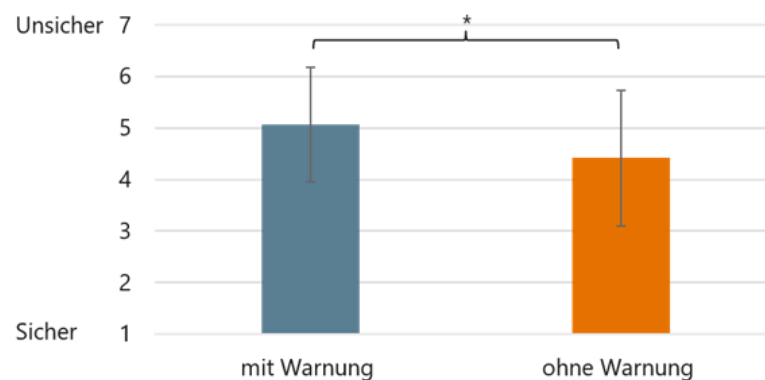


Abb. 3-42: Nutzerstudie – Wahrgenommene Sicherheit im Fahrscenario „Abbiegen nach rechts“ mit LoF-Fehlerrückmeldung

Im Rahmen der Kritikalitätsbewertung schätzten beide Gruppen im Mittel die Situation im Bereich „unangenehm“ ein (mit Warnung:  $M = 5.1$ ,  $SD = 1.6$ ; ohne Warnung:  $M = 4.3$ ,  $SD = 1.6$ ). Es zeigte sich ein signifikanter Gruppenunterschied, wobei die Versuchspersonen in der Gruppe „mit Warnung“ die Situation kritischer einschätzten als die Versuchspersonen der Gruppe „ohne Warnung“ mit  $t(54) = -2.085$ ,  $p < .05$ ,  $d = -0.557$  (siehe Abb. 3-43).

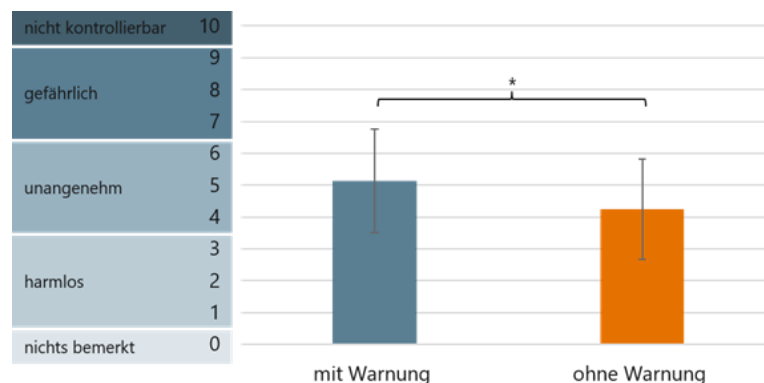


Abb. 3-43: Nutzerstudie – Kritikalität im Fahrscenario „Abbiegen nach rechts“ mit LoF-Fehlerrückmeldung

### 3.2.3.3 Zielsetzung 2 – LoF-Adaption

In der Befragung zur LoF-Adaptionsfahrt wurde zunächst nach den Unterschieden im Lenkverhalten zu den Baselinefahrten gefragt. In beiden Gruppen merkten die meisten Versuchspersonen (mit Warnung:  $n = 16$ , ohne Warnung:  $n = 14$ ) an, dass das Lenken schwerer war als in den vorherigen Runden. Des Weiteren wurde das Lenken als „unberechenbar / schwammig“ (mit Warnung:  $n = 8$ , ohne Warnung:  $n = 5$ ), „anstrengender“ (mit Warnung:  $n = 6$ , ohne Warnung:  $n = 2$ ) oder „unnatürlich / ungewohnt / unangenehm“ (mit Warnung:  $n = 5$ , ohne Warnung:  $n = 6$ ) bezeichnet oder mit einer fehlenden Servolenkung verglichen (mit Warnung:  $n = 1$ , ohne Warnung:  $n = 4$ ; sonstige Nennungen mit Warnung:  $n = 3$ , sonstige Nennungen ohne Warnung:  $n = 4$ ).

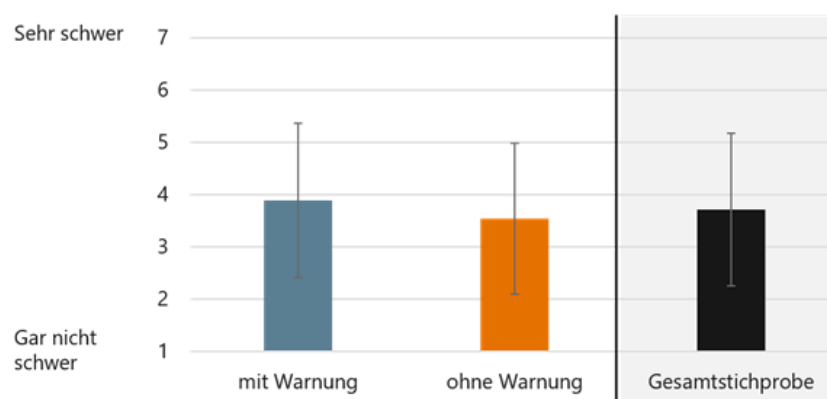


Abb. 3-44: Nutzerstudie – Schwierigkeit der Adaption an das neue Lenkverhalten

Gefragt nach der Schwierigkeit, sich an das veränderte Lenkverhalten zu gewöhnen, lag der Mittelwert der Gruppe „mit Warnung“ mit  $M = 3.9$  ( $SD = 1.47$ ) und in der Gruppe „ohne Warnung“ bei  $M = 3.5$  ( $SD = 1.5$ ) jeweils in einem mittleren Bereich (Gesamtstichprobe:  $M = 3.7$ ,  $SD = 1.5$ ). Zwischen den Gruppen zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Bewertung mit  $t(54) = -0.913$ ,  $p = .133$  (siehe Abb. 3-44).

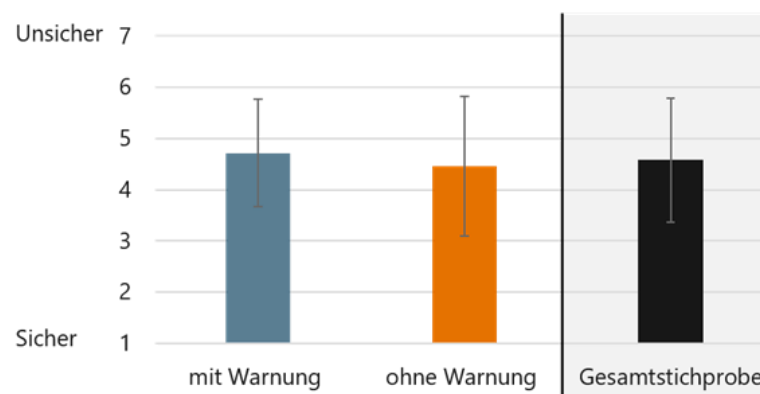


Abb. 3-45: Nutzerstudie – Wahrgenommene Sicherheit während der LoF-Adaptionsfahrt

Bezüglich der wahrgenommenen Sicherheit lagen die Mittelwerte beider Gruppen in einem mittleren bis eher unsicheren Bereich (mit Warnung:  $M = 4.7$ ,  $SD = 1.1$ ; ohne Warnung:

$M = 4.5$ ,  $SD = 1.4$ ; Gesamtstichprobe:  $M = 4.6$ ,  $SD = 1.2$ ). Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied im Sicherheitsempfinden zwischen den beiden Gruppen mit  $t(54) = -0.769$ ,  $p = .223$  (siehe Abb. 3-45).

Im Rahmen der Kritikalitätsbewertung schätzten beide Gruppen die Adaptionfahrt im Mittel im Bereich „unangenehm“ ein (mit Warnung:  $M = 4.8$ ,  $SD = 1.6$ ; ohne Warnung:  $M = 4.4$ ,  $SD = 1.9$ ; Gesamtstichprobe:  $M = 4.6$ ,  $SD = 1.7$ ). Es zeigte sich kein signifikanter Gruppenunterschied bezüglich der empfundenen Kritikalität mit  $t(54) = -0.923$ ,  $p = .13$  (siehe Abb. 3-46).

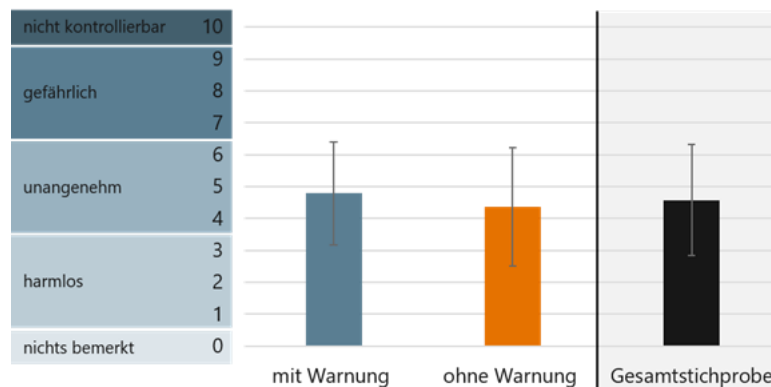


Abb. 3-46: Nutzerstudie – Kritikalität in der LoF-Adaptionfahrt

### 3.2.3.4 Nachbefragung

Im Kontext der Nachbefragung gab der Großteil der Stichprobe an, sich zuzutrauen, das Fahrzeug bei Auftreten des LoF-Fehlers unter Kontrolle zu behalten und zu einem sicheren Halt zu bringen („ja“:  $n = 34$ , 60.7%; „eher ja“:  $n = 21$ , 37.5%). Eine Versuchsperson gab an, sich dies eher nicht zuzutrauen (1.8%). Keine Versuchsperson gab die Antwortmöglichkeit „nein“ an.

Auf die Frage danach, wie sich die Versuchspersonen am ehesten nach Auftreten eines solchen Fehlers verhalten würden, gab eine Versuchsperson an, sofort anhalten zu wollen (1.8%). Die restliche Stichprobe verteilte sich annähernd gleichmäßig über die drei weiteren Kategorien. Insgesamt 18 Versuchspersonen würden ihr Fahrzeug am ehesten bei der nächsten sicheren Abstellmöglichkeit anhalten (32.1%), während 22 Versuchspersonen (39.3%) bis zur nächsten Werkstatt beziehungsweise nach Hause fahren würden. Ihre Fahrt bis zum eigentlichen Ziel fortsetzen würden 15 Versuchspersonen (26.8%). Als weitere Verhaltensweisen wurden von drei Versuchspersonen noch „Werkstatt anrufen“, „Vater anrufen“ und „Geschwindigkeit anpassen“ genannt.

Gefragt nach der maximalen Entfernung, die die Versuchspersonen noch mit dem Fahrzeug im Fehlerzustand zurücklegen würden, wurde eine Spanne von einem Kilometer bis 1500 Kilometern angegeben ( $M = 164$  km,  $SD = 324$  km,  $Md = 30$  km). Dabei gaben 14 Versuchspersonen (25.0%) an, bis zu 10 km weiterfahren zu können, 24 Versuchspersonen (42.9%) bewegten sich in der Spanne zwischen 11 und 50 km, 8 Versuchspersonen (14.3%) zwischen 51 und 100 km und 10 Versuchspersonen (17.9%) gaben an, noch mehr als 100 km fahren zu können.

In Bezug auf die Straßentypen, die die Versuchspersonen noch mit dem Fahrzeug im Fehlerzustand befahren würden, gab jeweils die Mehrheit an, das Fahrzeug noch im urbanen Bereich ( $n = 42$ , 75.0%) und auf Landstraßen ( $n = 46$ , 82.1%) zu bewegen. Für den Straßentyp Autobahn, zeigte sich ein gemischtes Bild (ja:  $n = 32$ , 57.1%; nein:  $n = 24$ , 42.9%).

### **3.2.4 Abgleich der Subjektiv- und Objektivdaten**

Analog zur Expertenstudie wurde auch für die Nutzerstudie ein Abgleich der erhobenen Subjektiv- und Objektivdaten durchgeführt. Im Rahmen der Expertenstudie wurden dazu gezielt die Korrelationen zwischen Expertenurteilen und ausgewählten objektiven Parametern überprüft. Dies war möglich, da die Experten in der Lage waren, auf Basis ihrer Erfahrung Veränderungen im Lenkverhalten gezielt zu detektieren und zu bewerten. Zum einen kann diese Fähigkeit bei Normalfahrenden nicht vorausgesetzt werden. Zum anderen lag der Fokus der Nutzerstudie weniger auf der konkreten Bewertung von objektiv messbaren Kennwerten, sondern auf der allgemeinen Wahrnehmung der Fehlersituation. Darüber hinaus ist die subjektive Wahrnehmung und Interpretation der LoF-Fehlersituation sehr individuell. Aus diesen Gründen fand der Abgleich im Zuge der Auswertung der Nutzerstudie ausschließlich im Rahmen einer augenscheinlichen Plausibilitätsprüfung statt. In dieser zeigte sich, dass sich die Erkenntnisse der Objektivdatenauswertung in den subjektiven Antworten der Versuchspersonen, die sich konkret auf das Fahrverhalten beziehen, wiederfinden lassen. So berichteten die Versuchspersonen beispielweise von einer Reduzierung der Geschwindigkeit nach Fehleraufschaltung, einer schwergängigeren Lenkung und von ihrer Kompensation des veränderten Lenkverhaltens. Diese Aussagen der Versuchspersonen spiegeln sich auch in den Auswertungen der erhobenen Objektivmessdaten (siehe 3.2.2) wider. Dieses Ergebnis legt nahe, dass die erhobenen Subjektiv- und Objektivdaten zusammen ein plausibles Gesamtbild für die Untersuchung der aufgestellten Zielsetzungen liefern.

### **3.2.5 Erweiterte Auswertung**

Wie in Kapitel 3.2.1.2 beschrieben, kam es bei einer Versuchsperson im Rahmen der Adaptionsfahrt im Fahrscenario „Spurwechsel & Kreisverkehr“ zu einem Verlassen der definierten Fahrspur bei der Einfahrt in den Kreisverkehr. Dieses Verlassen der Fahrspur wurde durch das Touchieren einer Pylone angezeigt. Im Folgenden soll eine spezifische Analyse dieses Falls im Gesamtkontext der Datenanalyse durchgeführt werden. Dazu wurden das Fahrverhalten der betreffenden Versuchsperson sowie das subjektive Feedback individuell betrachtet und in den Kontext der restlichen Stichprobe gesetzt.

Zunächst wurde das Fahrverhalten der Versuchsperson in der betreffenden Adaptionsfahrt analysiert. Abb. 3-47 zeigt den Moment des Pylonenkontakts aus der rückwärtig gerichteten Perspektive der Kamera auf der Beifahrerseite des Versuchsfahrzeugs. Außerdem illustriert Abb. 3-47 aus der Vogelperspektive die Position der touchierten Pylone bei der Einfahrt in den Kreisverkehr.



Abb. 3-47: Spurverlassen einer Versuchsperson während der LoF-Adaption (Fahrszenario „Spurwechsel & Kreisverkehr“)

Aus der Abbildung geht hervor, dass die Versuchsperson bei Einfahrt in den Kreisverkehr die betreffende Pylone mit dem rechten Hinterrad touchierte, was das Umfallen der Pylone zur Folge hatte. Bei der Pylone handelt es sich um eine „sichtoptimierte“ Pylone (vgl. Abb. 3-9). Das Verlassen der für das Fahrszenario definierten Fahrspur stellte sich insgesamt nicht als „unkontrolliert“ im Sinne eines frontalen Überfahrens einer Pylone, sondern als ein leichtes Touchieren der Pylone dar. In allen vorherigen Baselinefahrten berührte die betreffende Versuchsperson keine Pylone. Bei Durchsicht der Videoaufnahmen der betreffenden Versuchsperson zeigte sich in einer Vielzahl der absolvierten Fahrszenarien sowohl in den Baseline- als auch den LoF-Adaptionsfahrten eine Tendenz zur generellen Orientierung an der rechten Fahrspurbegrenzung (siehe Abb. 3-48). Die beobachtete Rechtsablage der Versuchsperson begünstigt in der spezifischen Fahrsituation zwar das Touchieren der Pylone (Verlassen der definierten Fahrspur) bei der Einfahrt in den Kreisverkehr, sie stellt aber dennoch das natürliche Verhalten der Versuchsperson in den getesteten Fahrszenarien dar.



Abb. 3-48: Generelle Orientierung an der rechten Fahrspurbegrenzung der Versuchsperson während der Baseline- und der LoF-Adaptionsfahrten (Beispiele)

Im Kontext der Gesamtstichprobe stellte der dargestellte Fall die einzige Situation eines Verlassens der definierten Fahrspur dar. Sowohl in den 168 Baselinefahrten (3 Baselinefahrten pro 56 Versuchspersonen) als auch in den Adaptionsfahrten der restlichen Stichprobe ( $n = 55$ ) trat kein weiterer Fall eines Verlassens der Fahrspur auf. Im Rahmen der Umsetzung des beschriebenen Studiendesigns ist somit die Wahrscheinlichkeit, dass das Verlassen der Fahrspur fehlerkorreliert war (durch direkte Fehlereinwirkung, Irritation, allgemeine Verunsicherung, Überkompensation etc.) erhöht. Dennoch ist eine Restwahrscheinlichkeit, dass das Verlassen der Fahrspur nicht fehlerkorreliert war, etwa aufgrund von fehlendem Fahrvermögen, oder Ablenkung, nicht auszuschließen.

Neben der augenscheinlichen Prüfung des Fahrverhaltens anhand der Videodaten wurde das Fahrverhalten der betreffenden Versuchsperson auch auf Basis der erfassten Objektivmessdaten im Vergleich zum eigenen Verhalten in den Baselinefahrten (ohne LoF) und im Vergleich zu der restlichen Stichprobe analysiert. In den dem Fahrszenario „Kreisverkehr“ vorausgehenden LoF-Adaptionsszenarien „Abbiegen nach links“, „Geradeausfahrt“ und „Spurwechsel“ waren bei der Versuchsperson keine auffälligen Lenkreaktionen beziehungsweise kein auffälliges Lenkverhalten in der LoF-Adaption festzustellen. Im Vergleich zu den individuellen Objektivmessdaten aus den Baselinefahrten ergaben sich keine oder nur sehr geringe Abweichungen hinsichtlich des Lenk- und generellen Fahrverhaltens der Versuchsperson. Hinsichtlich des Fahrszenarios „Kreisverkehr“ wurde eine Analyse der Einfahrt in den Kreisverkehr fokussiert, da das Verlassen der Fahrspur in diesem Abschnitt des Szenarios erfolgt war. Auch bei der Einfahrt in den Kreisverkehr waren bei der betreffenden Versuchsperson nur geringe Abweichungen im Lenk- beziehungsweise Fahrverhalten zu erkennen. Diese Aussage gilt dabei sowohl im Vergleich zu den eigenen Baselinefahrten der Versuchsperson als auch im Vergleich zum gemittelten Verhalten der anderen Nutzer der Stichprobe (siehe Anhang Abb. 6-30 und Abb. 6-31). Im Verlauf des Lenkwinkels der Adaptionsfahrt der Versuchsperson im Fahrszenario „Kreisverkehr“ war circa 3 m vor dem Kontakt mit der Pylone ein etwas weniger starkes Einlenken nach rechts (geringere Lenkrate im Vergleich zu den Baselinefahrten ohne LoF) zu erkennen. Fahrdynamisch betrachtet bedeutet die geringere Lenkrate beziehungsweise das weniger starke Einlenken nach rechts eine Vergrößerung des gewählten Kurvenradius und damit eine Abschwächung der Annäherung an die Pylone auf der rechten Fahrzeugseite. Aus den genannten Gründen und Erkenntnissen der detaillierten Analyse der Objektivdaten lässt sich die Ursache für den Pylonenkontakt beziehungsweise das Verlassen der definierten Fahrspur in der betrachteten Fahrsituation nicht ableiten.

Zusätzlich zum Fahrverhalten wurde auch das Antwortverhalten der Versuchsperson im Rahmen der Subjektivdatenerhebung im Detail analysiert. Die Versuchsperson beschrieb das Lenkverhalten in der Adaptionsfahrt als „unkontrolliert und unpräzise“. Es zeigte sich, dass die Versuchsperson die Adaptionsfahrt tendenziell als kritischer einschätzte im Vergleich zur Gesamtstichprobe. So beantwortete sie beispielsweise die Frage nach der Kritikalität der Adaptionsfahrt (Neukum-Skala) mit dem Wert „6“, während der Mittelwert der Stichprobe mit Warnung bei  $M = 4.8$  ( $SD = 1.6$ ) lag. Trotz ihrer eher kritischen Haltung, lag die Versuchsperson mit ihren Antworten jeweils im Bereich einer Standardabweichung und zeigte somit kein auffälliges Antwortverhalten. In der Nachbefragung traute sich die Versuchsperson subjektiv das

Kontrollieren der Erstfehlersituation zu („eher ja“), gab aber dennoch an, dass sie in einer solchen Situation am ehesten „bei der nächsten sicheren Abstellmöglichkeit anhalten“ würde. Darüber hinaus gab sie an, noch maximal 30km mit diesem Lenkverhalten weiterfahren zu können und sich nur noch die Fahrt auf eher geraden Streckenabschnitten wie auf Landstraßen und Autobahnen zuzutrauen. Zusammengefasst weisen die Subjektivdaten auf eine eher unsichere Versuchsperson hin, die eine kritische Haltung gegenüber dem Lenkverhalten äußert. Es zeigte sich jedoch auch, dass die Versuchsperson ihr eigenes Fahrverhalten eher realistisch einschätzt und die Wahrscheinlichkeit der Weiterfahrt mit diesem Lenkverhalten für die Versuchsperson gering ist.

### **3.3 Diskussion**

Mit Hilfe der durchgeführten Nutzerstudie sollte zum einen die Frage nach der Kontrollierbarkeit eines SbW-Fehlers (LoF) mit einer passiven LoF-Dämpfungscharakteristik in der Erstfehlersituation untersucht werden. Zum anderen wurde explorativ die Kontrollierbarkeit in einer LoF-Adaptionsfahrt betrachtet. Der Fokus der Studie lag dabei auf der Untersuchung der Anpassung der naiven Versuchspersonen an die veränderte Lenkungscharakteristik einer dämpfungsbasierten passiven HWA-Rückfallebene im LoF-Fehlerfall und der Bewertung der Kontrollierbarkeit innerhalb der untersuchten Fahrszenarien. Neben der erforderlichen Anpassung des Lenkverhaltens der Versuchspersonen aufgrund des fehlenden „Active Returns“ der Lenkung im Fahrszenario „Abbiegen“ beinhaltet dies auch die generelle Anpassung der Versuchspersonen an die veränderte HWA-Lenkmomentencharakteristik in den nachfolgenden Adaptionszenarien.

Für beide Zielsetzungen wurden im Rahmen der Studie subjektive und objektive Daten erhoben sowie die Spureinhaltung der Versuchspersonen überprüft. Nachfolgend werden die gewonnenen Ergebnisse in den Gesamtkontext eingeordnet und diskutiert.

#### **3.3.1 Zielsetzung 1 – LoF-Erstfehler**

Zur Untersuchung der Kontrollierbarkeit im LoF-Erstfehlerfall erlebten naive Versuchspersonen einen Verlust des aktiv gestellten Lenkmoments und einen Rückfall auf eine passive LoF-Dämpfungscharakteristik unmittelbar vor einer Abbiegesituation. Die Hälfte der Versuchspersonen erhielt dabei eine Warnung, die andere Gruppe erhielt keine Warnung. Unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit kam es in Folge der Erstfehleraufschaltung zu keinem Verlassen der für das untersuchte Fahrszenario „Abbiegen nach rechts“ definierten Fahrspur oder einer Berührung der aufgestellten Fahrzeugattrappen (siehe Abb. 3-4). Alle Versuchspersonen waren in der Lage, den fehlenden „Active Return“ infolge des HWA-Fehlers zu kompensieren und das Fahrzeug mit der passiven LoF-Dämpfungscharakteristik in der Fahrspur zu halten. Die Auswirkungen des LoFs und des veränderten Lenkverhaltens zeigten sich in den erhobenen Objektivdaten. Im Vergleich zu den Baselinefahrten (ohne LoF) waren bei der Durchfahrt des Fahrszenarios „Abbiegen nach rechts“ ein deutlich höherer Lenkmomentenbedarf und höhere Lenkraten beim Zurücklenken in die Geradeausposition erkennbar. In den Abschnitten „Einlenken“ und „Zurücklenken“ des Abbiegevorgangs zeigte in beiden Versuchsgruppen

(mit/ohne Warnung) in der Experimentalrunde mit LoF-Fehlerrückmeldung jeweils circa ein Drittel der Versuchspersonen keine, geringe beziehungsweise große Abweichungen zu ihrem eigenen Lenkverhalten während der Baseline-Runden. Die Häufigkeitsverteilung war für diese Abschnitte für beide Versuchsgruppen annähernd vergleichbar. Während die Verteilung der Abweichungen zum Baseline-Lenkverhalten im Abschnitt der maximalen Lenkwinkelamplitude (Scheitelpunkt des Abbiegevorgangs) für die Versuchsgruppe „ohne Warnung“ identisch zu den anderen Abschnitten war, zeigte sich für die Versuchsgruppe „mit Warnung“ in diesem Bereich eine Verschiebung der Häufigkeitsverteilung in Richtung größerer Abweichungen. In der Gruppe „mit Warnung“ nimmt vor allem in diesem Abschnitt die Anzahl der Nutzer mit großen und sehr großen Abweichungen (Ausreißern) zum Baseline-Lenkverhalten merklich zu. Dies spiegelt sich auch in den größeren Unterschieden bei den gemittelten Signalverläufen der Baseline- und der LoF-Fehlerrunden sowie einem deutlich breiteren Streuband wider (vgl. Abb. 6-16). Für beide Versuchsgruppen war generell eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit bei der Durchfahrt durch das Fahrscenario infolge der LoF-Fehlerrückmeldung zu erkennen. Diese Geschwindigkeitsreduktion fiel in der Versuchsgruppe „mit Warnung“ mit circa 4 km/h größer aus als in der Versuchsgruppe „ohne Warnung“ (circa 2 km/h).

Auch die erhobenen Subjektivdaten geben Hinweise auf die Auswirkungen des LoF mit dämpfungsbasierter passiver Rückfallebene auf die subjektive Wahrnehmung der Fahrt. Die Auswertung zeigt einen Anstieg der subjektiv empfundenen Anforderungen des Fahrparcours im Vergleich zu den Baseline-Runden. Zudem gaben die Versuchspersonen an, erschrocken, überrascht, irritiert oder verwundert gewesen zu sein und in Reaktion auf die Fehlerrückmeldung gegengelenkt, stärker gelenkt und die Geschwindigkeit reduziert zu haben. Auch in den Subjektivdaten zeigt sich ein Gruppenunterschied. Hier empfand die Gruppe, die eine Warnung durch das Fahrzeug erhalten hatte, die Situation als kritischer als die Gruppe, die keine Warnung erhalten hatte.

Zusammengenommen liefern die Ergebnisse der Datenauswertung Evidenz für die Kontrollierbarkeit eines LoF-Fehlers in einem SbW-System mit einer dämpfungsbasierten passiven Rückfallebene im Erstfehlerfall. Trotz der Auswirkungen des veränderten Lenkverhaltens, die sowohl durch die objektive Datenerfassung als auch durch die subjektive Befragung der Versuchspersonen erfasst wurden, blieben alle Versuchspersonen im Rahmen der Studie in der vorgegebenen Fahrspur. Die Warnung scheint dabei im ersten Moment irritierend auf die Versuchspersonen zu wirken und die empfundene Kritikalität der Situation zu erhöhen. Dies kann zum einen darauf zurückzuführen sein, dass die Verarbeitung der Reize in der Situation die Durchführung der gefragten Fahraufgabe erschwert. Zum anderen könnte auch die direkte Kommunikation der Fehlersituation durch das Fahrzeug zu einem Vertrauensverlust in das Fahrzeug und einer damit verbundenen erhöhten Kritikalität führen. Im Gegensatz dazu, war die Fehlersituation für die Gruppe „ohne Warnung“ weniger salient, was die empfundene Kritikalität abgeschwächt haben könnte. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass die Warnung in der Nachbetrachtung generell dennoch als hilfreich empfunden wurde.

### 3.3.2 Zielsetzung 2 – LoF-Adaption

Die zweite Zielsetzung beschäftigte sich mit der Exploration der Kontrollierbarkeit in einer weiterführenden Adaptionfahrt mit der passiven LoF-Rückfallebene. Dazu wurden die Versuchspersonen aufgefordert, die Fahrt durch die verbleibenden Fahrszenarien mit der passiven LoF-Dämpfungscharakteristik fortzusetzen. Im Rahmen der Adaptionfahrten wurde die definierte Fahrspur in den Fahrszenarien „Abbiegen nach links“, „Geradeausfahrt“ und „Spurwechsel“ von allen Versuchspersonen eingehalten. Allerdings verließ im Fahrszenario „Kreisverkehr“ eine Versuchsperson beim Einbiegen in den Kreisverkehr den vorgegebenen Fahrkorridor. Wie in Kapitel 3.2.5 detailliert erläutert, ergibt sich hieraus aus rein wissenschaftlicher Perspektive eine erhöhte Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Berühren der Pylone mit dem rechten Hinterrad und damit das Verletzen des Kriteriums der Spureinhaltung in Zusammenhang mit der Veränderung des Lenkverhaltens steht. Ursachen hierfür können ein direkter Fehlereinfluss, eine allgemeine Verunsicherung der Versuchsperson, eine Überkompensation oder eine Irritation darstellen. Eine Restwahrscheinlichkeit, dass es sich um eine zufällige, nicht fehlerkorrelierte Pylonenberührung handelt, ist an dieser Stelle jedoch nicht auszuschließen. Um das Verlassen der definierten Fahrspur interpretieren und einordnen zu können, wurde der Fall noch einmal spezifisch analysiert und hierbei auch die Aussagen der Objektiv- und Subjektivdatenauswertung hinzugezogen. Wie die Analyse dieses speziellen Falles zeigt, wies die betreffende Versuchsperson eine generelle Rechtsablage in ihren Fahrten durch den Parcours auf. Zudem äußerte sie eine eher kritische Haltung dem veränderten Lenkverhalten gegenüber und würde in der Folge die Fahrt mit diesem Lenkverhalten im Realverkehr eher nicht fortsetzen.

Im Rahmen einer dezidierten Auswertung der Objektivdaten für diesen Fall sowie für die gesamte Stichprobe zeigten sich keine signifikanten Veränderungen im Lenkverhalten in der Adaptionfahrt im Vergleich zu den Baselinefahrten. Dies spricht dafür, dass die objektiv gemessene Fahrleistung durch die passive LoF-Dämpfungscharakteristik nicht signifikant beeinflusst wurde. In den Objektivdaten zeigte sich für die Fahrszenarien „Abbiegen nach links“, „Geradeausfahrt“, „Spurwechsel“ und „Kreisverkehr“ durchgängig eine gute Adaption der Versuchspersonen an das LoF. Hinsichtlich des Lenkverhaltens waren in der LoF-Adaption keine großen Unterschiede zum Baselineverhalten der Versuchspersonen zu erkennen. Bezüglich der Fahrgeschwindigkeit innerhalb der einzelnen Fahrszenarien war in der Adaption eine generelle Reduktion der Geschwindigkeit durch die Versuchspersonen zu beobachten. Aufgrund der für die Versuche gewählten LoF-Lenkungscharakteristik waren in den Fahrszenarien „Abbiegen nach links“ und „Kreisverkehr“ ein teilweise deutlich höherer Lenkmomentenbedarf zu beobachten. Aufgrund der Charakteristik der Kennlinie war der Lenkmomentenbedarf bei der „Geradeausfahrt“ und dem „Spurwechsel“ geringer. Das nicht vorhandene Feedbackmoment in der Nulllage und die damit einhergehende geringe Mittenzentrierung der Lenkung führte insbesondere bei der Geradeausfahrt zu einer Zunahme der Lenkkorrekturen durch die Versuchspersonen.

Die Subjektivdaten der Gesamtstichprobe weisen darauf hin, dass sich für die Versuchspersonen ein spürbarer Unterschied im Lenkverhalten darstellte. In der subjektiven Wahrnehmung wurde das Lenkverhalten als „unpräzise“ und „schwammig“ beschrieben. Zudem zeigte sich ein signifikanter Anstieg der wahrgenommenen mentalen und körperlichen Anforderungen bei der Bewältigung der Manöver. In der Folge antizipieren die Versuchspersonen unterschiedliche Verhaltensweisen im Umgang mit einem solchen Ereignis während einer Realfahrt. Während sich der Großteil der Stichprobe die Kontrolle über das Fahrzeug bei Auftreten des Fehlers zutraut, würde ein Drittel der Versuchspersonen das Fahrzeug im weiteren Verlauf bei der nächsten sicheren Gelegenheit abstellen.

Zusammengenommen liefern die Ergebnisse der Datenauswertung Evidenz für eine generelle Kontrollierbarkeit des LoF mit einer dämpfungsbasierten passiven Dämpfungscharakteristik in der LoF-Adaption. Da das Lenkverhalten subjektiv als unangenehm wahrgenommen wird und zu einem angepassten Lenkverhalten führen kann, antizipieren die Versuchspersonen interindividuell unterschiedliche Verhaltensweisen für die Weiterfahrt in einer realen Situation. Die wahrgenommene Unsicherheit im Umgang mit dem veränderten Lenkverhalten sowie die erhöhten Anforderungen, die sich daraus ergeben, können somit dazu führen, dass eine Weiterfahrt über das Aufsuchen einer sicheren Abstellmöglichkeit hinaus nicht von allen Fahrenden gewünscht ist.

### **3.3.3 Limitationen**

Die Ergebnisse einer Studie sind immer vor dem Hintergrund ihrer Limitationen zu diskutieren. An dieser Stelle ist die Verwendung des Kriteriums der Spureinhaltung als Operationalisierung für die Kontrollierbarkeit zu reflektieren. Die Einhaltung einer durch Pylonen begrenzten Spur stellt im Kontext von Realfahrtstudien eine häufig genutzte, praktikable Möglichkeit dar, um die Fahrleistung von Versuchspersonen reproduzierbar zu bewerten. Bei der Interpretation ist dabei zu beachten, dass es sich um ein binäres Kriterium handelt, welches eine Aussage über das Verlassen der Spur zulässt. Eine detaillierte Auswertung des Ausmaßes der Spurabweichung sowie der gewählten Trajektorie bedarf dabei weiterer Messmethoden. Zudem kann ein Verlassen der Fahrspur beziehungsweise das Berühren oder Überfahren einer Pylone nicht nur auf die jeweilige Manipulation im Rahmen der Studie rückführbar sein, sondern ein Abkommen von der Fahrspur kann auch durch andere Faktoren wie die generelle Wahl der Trajektorie oder fehlende fahrerische Fertigkeiten der Versuchsperson zu erklären sein. Im Rahmen der vorgestellten Studie wurden verschiedene Maßnahmen umgesetzt, um die Wahrscheinlichkeit eines zufälligen Verlassens der definierten Fahrspur zu minimieren. Zunächst bekamen die Versuchspersonen während der Eingewöhnungsfahrten die Möglichkeit, die Fahrszenarien zu üben und sich mit den Abmaßen des fremden Fahrzeugs vertraut zu machen. Darüber hinaus wurden sichtoptimierte Pylonen und Balloon Cars verwendet, um den Versuchspersonen die Orientierung innerhalb der Fahrszenarien zu vereinfachen. Die Fahrszenarien wurden dabei so gewählt, dass sie alltägliche Fahrsituationen widerspiegeln und keine überhöhten Anforderungen an die Versuchspersonen stellen. Diese Annahme des Versuchsdesigns konnte durch die Datenauswertung gestützt werden. Für alle Manöver gaben die Versuchspersonen eine niedrige bis mittlere Bewertung hinsichtlich der Schwierigkeit an.

Zudem kam es in den Baselinefahrten bei keiner Person zu einem Verlassen der für die einzelnen Fahrszenarien definierten Fahrspur. Die Tatsache, dass es in einer LoF-Adaptionsfahrt zu einem Verlassen der Fahrspur im Fahrszenario „Kreisverkehr“ kam, gibt einen Hinweis darauf, dass die verwendete Methodik in der Lage ist, hinsichtlich der Fahrleistung zu diskriminieren.

Die Ergebnisse der Adaptionsfahrten sind vor dem Hintergrund der Auftretenswahrscheinlichkeit und ihrem artifiziellen Charakter zu diskutieren. Ziel der Studie war es, die Kontrollierbarkeit des LoF mit einer passiven Dämpfung in einer weitergeführten Fahrt explorativ zu untersuchen. Dazu wurden die Versuchspersonen durch die Versuchsleitung gebeten, ihre Fahrt mit der veränderten Lenkcharakteristik durch die Fahrszenarien der Adaptionsfahrt fortzusetzen. Die Nachbefragung zeigt auf, dass ein Großteil der Versuchspersonen bei Auftreten eines solchen Fehlers die Fahrt im Realverkehr bei der nächsten sicheren Anhaltemöglichkeit abbrechen oder ihre Route an die neuen Gegebenheiten des Lenkverhaltens anpassen würden. Diese Ergebnisse zeigen auf, dass das Lenkverhalten ungeachtet der generellen Kontrollierbarkeit subjektiv unterschiedlich unangenehm wahrgenommen wird und die Versuchspersonen in Abhängigkeit dieser Wahrnehmung ihren Umgang mit der Situation wählen.

## 4 Fazit und Ausblick

Die Technologie Steer-by-Wire (SbW) ermöglicht im Vergleich zu konventionellen, mechanisch gekoppelten Lenksystemen eine Vielzahl von neuen Möglichkeiten, weshalb in den kommenden Jahren eine schrittweise Einführung von SbW-Systemen in die Masse der produzierten Fahrzeuge erwartet wird. Ein zentraler Aspekt bei der breiten Einführung der SbW-Technologie in den Markt ist die Systemsicherheit. Das Lenkgefühl (Feedback) am Lenkrad wird bei SbW-Systemen aufgrund der fehlenden mechanischen Verbindung zwischen dem Lenkrad und den gelenkten Fahrzeugrädern über den fahrerseitigen „Hand-Wheel-Actuator“ (HWA) nachgebildet. Mit dem Ziel eine uneingeschränkte Funktion und Beherrschbarkeit des Systems auch im Falle eines Fehlers im HWA zu gewährleisten, stellt mit Blick auf die Systemsicherheit aktuell – wie für die übrigen Komponenten eines SbW-Systems auch – eine redundante Auslegung der aktiven HWA-Komponenten den Stand der Technik dar. Diese redundante Auslegung der aktiven HWA-Komponenten weist dabei in der Regel eine hohe Systemkomplexität auf. Mit dem Ziel einer Optimierung dieser Systemkomplexität befinden sich aktuell auch Ansätze für SbW-Systeme mit einer passiven HWA-Rückfallebene in der Entwicklung, bei denen die passive Rückfallebene für das HWA-Feedbackmoment auf einer Dämpfungscharakteristik (Lenkmoment-Lenkraten-Kennlinie) basiert.

Vor diesem Hintergrund befasste sich das vorliegende Projekt mit der Untersuchung der Kontrollierbarkeit von Loss of Feedback (LoF) in SbW-Fahrzeugen mit einem nicht-redundanten HWA. Die in diesem Zusammenhang abgeleitete zentrale Forschungsfrage lautete:

***„Ist ein Ausfall des HWAs und ein damit einhergehender Verlust des aktiven Feedbacks bei einer nicht-redundanten Auslegung des HWAs mit einer passiven HWA-Rückfallebene durch Normalfahrende kontrollierbar?“***

Zur Beantwortung der Fragestellung wurde im Auftrag des VDA/DIN-AK 33-18 von der fka GmbH in Kooperation mit dem Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University als unabhängige Institutionen ein zweistufiges Studienkonzept entwickelt und umgesetzt. In einer vorgelagerten Expertenstudie bewerteten neun Experten aus dem Kreis des VDA/DIN-AK 33-18 in zwei Versuchsfahrzeugen (Ford Edge und VW ID.4) verschiedene LoF-Dämpfungscharakteristiken für eine passive HWA-Rückfallebene hinsichtlich der Kontrollierbarkeit für Normalfahrende in verschiedenen Fahrszenarien. Hierbei wurde neben dem LoF-Erstfehlerfall auch die Weiterfahrt mit dem LoF (LoF-Adaption) fokussiert. Auf Basis der ausgewerteten Bewertungen der teilnehmenden Experten wurde eine LoF- Dämpfungscharakteristik für die weiterführenden Untersuchungen im Rahmen einer Nutzerstudie ausgewählt.

Die Ergebnisse der im August 2024 durchgeführten Expertenstudie zeigen dabei einen klar erkennbaren Trade-off zwischen der LoF-Erstfehlersituation und der LoF-Adaption, der bei der Auslegung einer Dämpfungscharakteristik für eine reibungsbasierte passive HWA-Rückfallebene zu beachten ist. Während in der LoF-Erstfehlersituation (LoF-Erstfehleraufschaltung während einer Kreisfahrt) die Höhe der resultierenden Störeinflüsse mit zunehmender Steigung und zunehmendem Maximalkraftwert für die Dämpfung abnehmen, so führen diese

gleichzeitig zu einem starken Anstieg der erforderlichen Lenkarbeit und hohen Lenkmomenten in den untersuchten LoF-Adaptionsszenarien (Abbiegen und Fahrt durch einen Kreisverkehr). Mit Blick auf die Beherrschbarkeit für eine große Bandbreite an Normalfahrenden ist hier ein entsprechender Kompromiss zwischen den beiden angesprochenen Aspekten erforderlich. Die durchgeführte Expertenstudie hat dabei gezeigt, dass diese Aspekte von den entsprechenden Experten gut bewertet und ausgelegt werden können. Neben den allgemeinen Anforderungen ist die Auslegung einer LoF-Dämpfungscharakteristik auch von den Fahrzeugparametern und insbesondere den Parametern des verbauten Lenksystems abhängig. So muss beispielsweise die Grundreibung im HWA bei der Auslegung und Gestaltung der LoF-Dämpfungscharakteristik berücksichtigt werden. In der Studie zeigte sich, dass ein später Einlaufpunkt in den beiden für die Studie verwendeten Versuchsfahrzeugen bezüglich der Kontrollierbarkeit eher schlechter bewertet wurde und ein früherer Einlaufpunkt zu bevorzugen ist.

Mit der in der Expertenstudie ausgewählten LoF-Dämpfungscharakteristik wurde im Anschluss die Kontrollierbarkeit durch Normalfahrende untersucht. Dazu wurde eine Nutzerstudie auf der Teststrecke des Instituts für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University durchgeführt, die zum einen die LoF-Erstfehlersituation bei Durchfahrt des Fahrplanszenarios „Abbiegen nach rechts“ und zum anderen explorativ die Weiterfahrt mit der veränderten LoF-Lenkungscharakteristik im Rahmen einer Adaptionfahrt adressierte. Die Ergebnisse der Nutzerstudie liefern empirische Evidenz für die Kontrollierbarkeit eines LoFs bei einem SbW-System mit dämpfungsbasierter passiver Rückfallebene. Im Rahmen der LoF-Erstfehleraufschaltung waren alle Versuchspersonen in der Lage, das Fahrzeug innerhalb der definierten Fahrspur zu halten und das Fahrplanszenario „Abbiegen nach rechts“ durchzuführen. Dies gelang den Versuchspersonen unabhängig davon, ob sie bei der LoF-Fehleraufschaltung durch das Fahrzeug gewarnt wurden oder nicht. Auch die explorative Untersuchung der Weiterfahrt mit der veränderten LoF-Lenkungscharakteristik lieferte Hinweise auf eine generell gute Adaption an das LoF, auch wenn es im Rahmen der Adaptionfahrten zu einem Fall des Verlassens der vorgegebenen Fahrspur beim Einbiegen in den Kreisverkehr kam. In beiden Untersuchungssituationen zeigte sich, dass der LoF und das daraus resultierende Lenkverhalten von den Versuchspersonen wahrgenommen und als subjektiv unangenehm bewertet wurde. Diese subjektive Bewertung und die damit einhergehende erhöhte wahrgenommene Beanspruchung beim Absolvieren der Fahrplanszenarien resultieren in einer variierenden Bereitschaft, die Fahrt mit der passiven Dämpfungscharakteristik unabhängig von einer generellen Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs fortzusetzen.

Zusammengefasst liefert das vorgestellte Projekt Evidenz für die Kontrollierbarkeit einer nicht-redundanten Auslegung des HWA mit passiver Dämpfungscharakteristik durch Normalfahrende in den untersuchten Fahrplanszenarien. Es zeigte sich darüber hinaus, dass Expertise bei der Ausgestaltung der LoF-Dämpfungscharakteristik erforderlich ist, um den Trade-off zwischen den Störeinflüssen in der LoF-Erstfehlersituation und dem benötigten Kraftaufwand in der Lenkarbeit aufzulösen. In dieser Abwägung sollten zum einen technische Parameter des jeweiligen Fahrzeugs (z.B. Grundreibungsniveau) zum anderen aber auch die Bandbreite verschiedener Nutzergruppen beachtet werden. Eine Übertragung des vorgestellten methodi-

schen Vorgehens auf weitere Fahrzeuge sowie die Erweiterung der Methodik um weitere Fahr-szenarien ermöglichen eine detaillierte Ausgestaltung einer passiven LoF-Dämpfungscharakteristik für spezifische Fahrzeuge.

## 5 Literatur

- [BRO09] Brockmann, M.  
Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS  
PReVENT Report v5.0, 2009
- [DIN24] DIN 70065  
Kraftfahrzeuge – Anforderungen an ein "Steer-by-Wire (SbW)-System  
(Road vehicles – Requirements for a "Steer-by-Wire (SbW)-system")  
DIN Deutsches Institut für Normung, Ausgabedatum 05/2024
- [HAR06] Hart, S. G.  
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, 2006
- [KÖR18] Körber, M.  
Theoretical considerations and development of a questionnaire to measure trust  
in automation  
In Congress of the International Ergonomics Association (pp. 13-30). Springer,  
2018
- [MAC80] Macdonald, W. A., & Hoffmann, E. R.  
Review of relationships between steering wheel reversal rate and driving task de-  
mand  
Human factors, 22(6), 733-739, 1980
- [MAR06] Markkula, G., & Engström, J.  
A steering wheel reversal rate metric for assessing effects of visual and cognitive  
secondary task load  
In Proceedings of the 13th ITS World Congress, Leeds, 2006
- [NEU03] Neukum, A. & Krüger, H.-P.  
Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethodik und Be-  
wertungskriterien  
VDI-Berichte, 1791, 297-318, 2003
- [OSS12] Osswald, S., Wurhofer, D., Trösterer, S., Beck, E., & Tscheligi, M.  
Predicting information technology usage in the car: towards a car technology ac-  
ceptance model  
In Proceedings of the 4th International Conference on Automotive User Interfaces  
and Interactive Vehicular Applications (pp. 51-58), 2012

## 6 Anhang

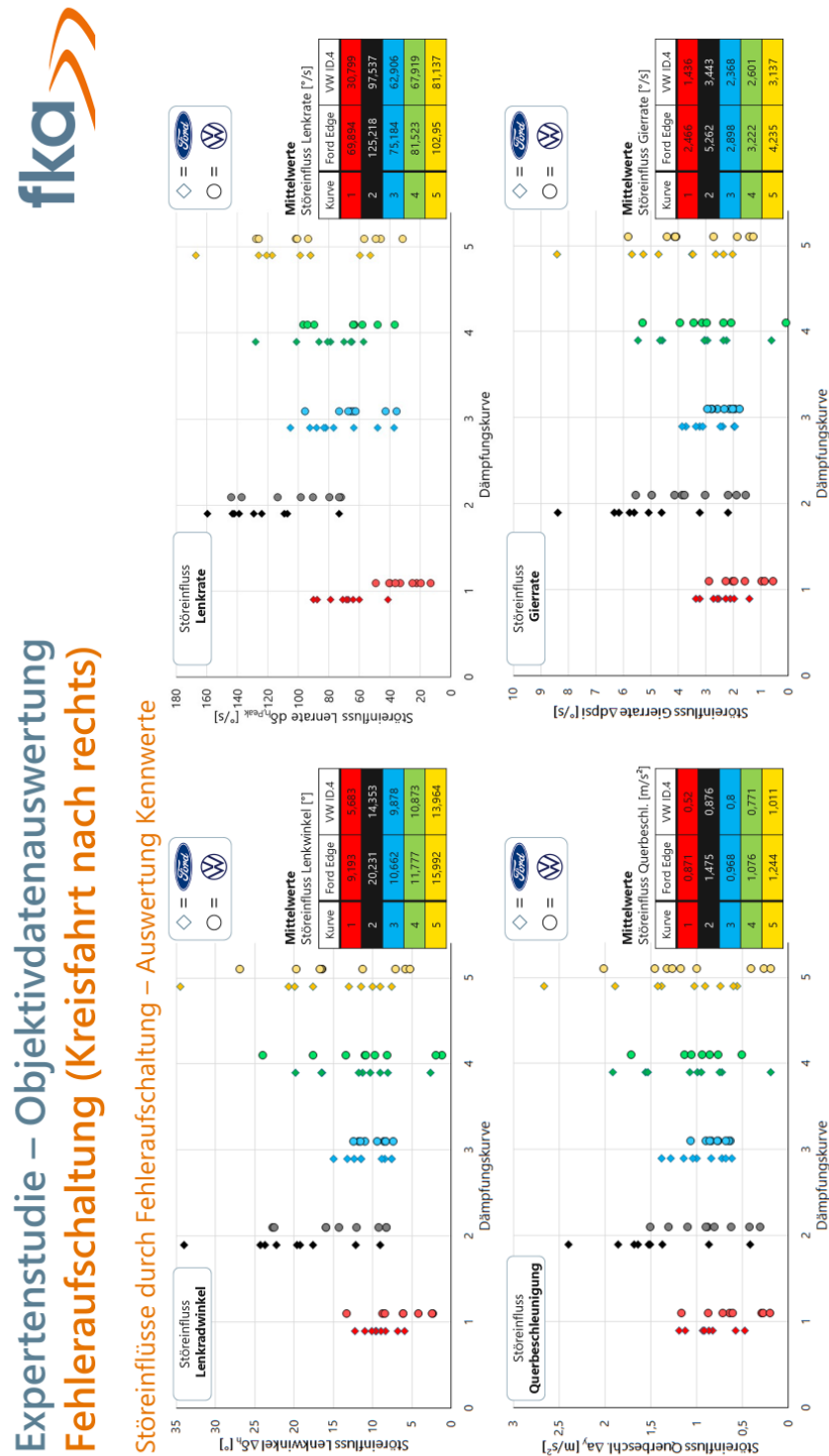


Abb. 6-1: LoF-Expertenstudie – Störeinflüsse bei LoF-Fehlerrückmeldung (Ford Edge & VW ID.4, Kreisfahrt mit LoF-Fehlerrückmeldung)

## Expertenstudie – Objektdatenauswertung

## Messdaten – Übersicht – Beispiel 1

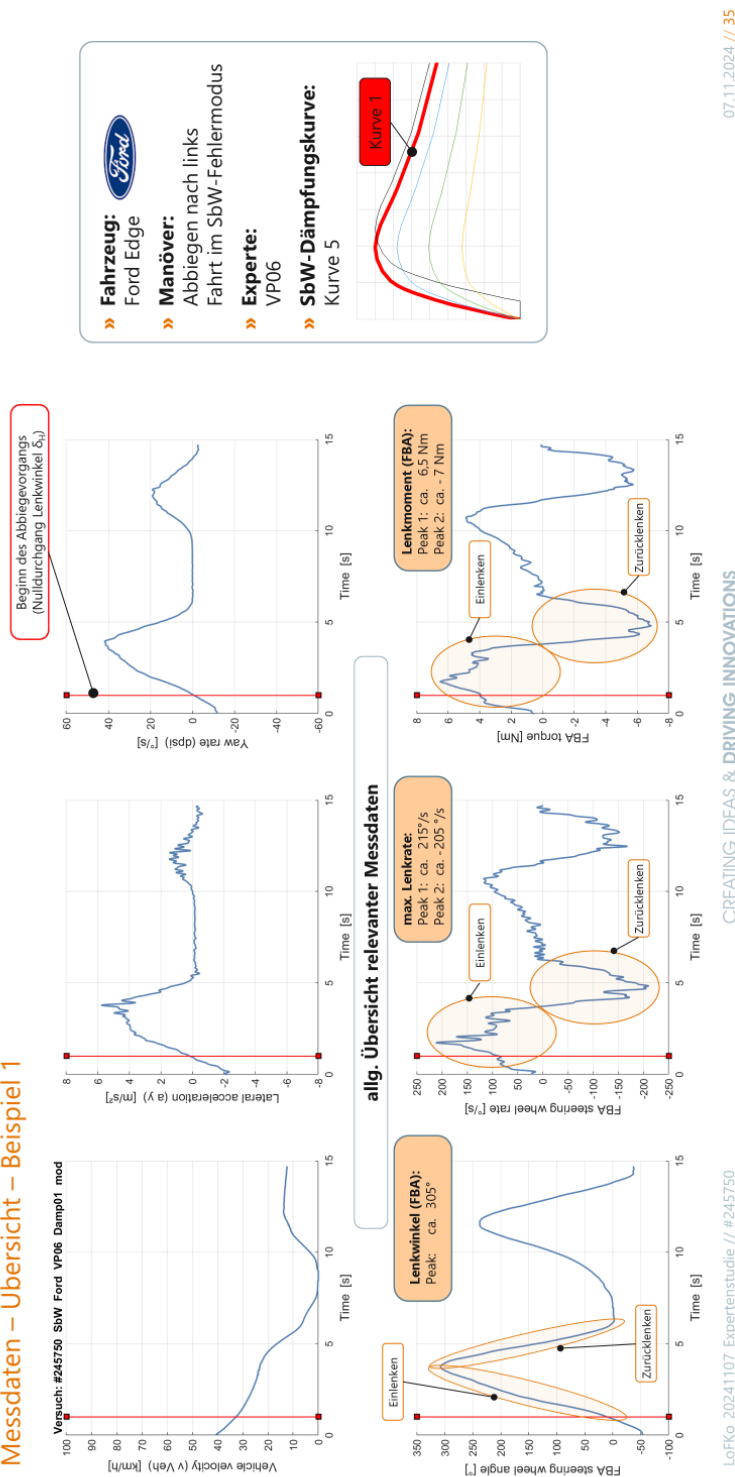


Abb. 6-2: LoF-Expertenstudie – Exemplarischer Messdatenplot  
(Ford Edge, Abbiegen nach links, Dämpfungscharakteristik 1)

## Expertenstudie – Objektivdatenauswertung Fahren im SbW-Fehlermodus (Kreisverkehr) – Beispiel

### Messdaten – Übersicht – Beispiel

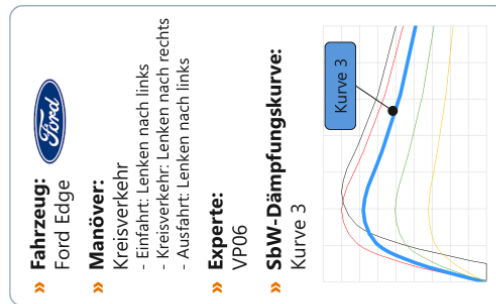
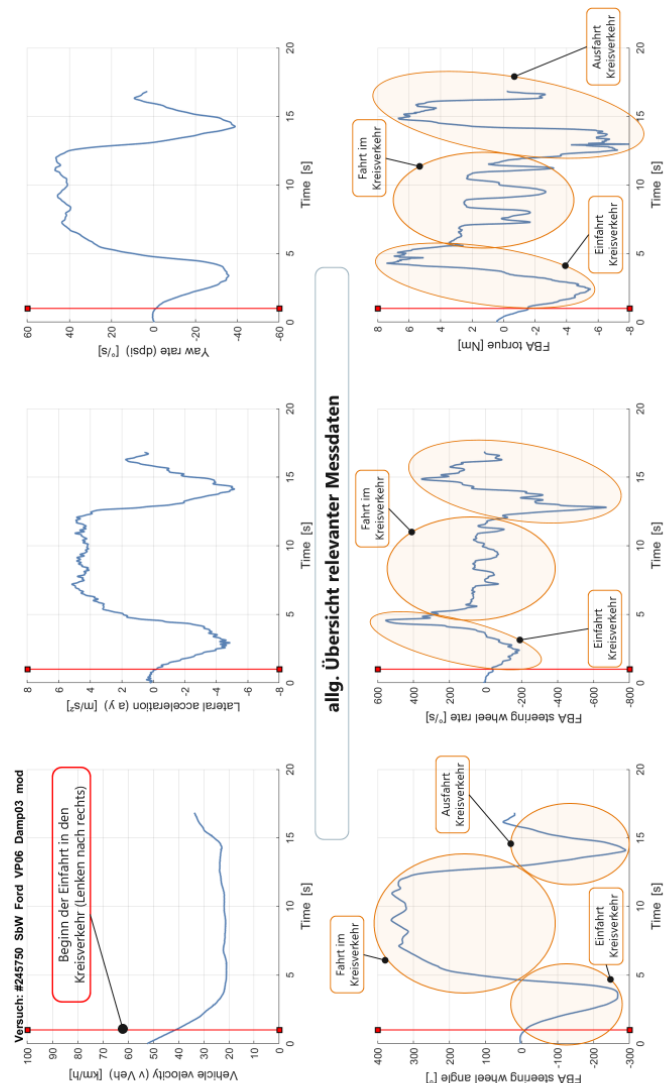


Abb. 6-3: LoF-Expertenstudie – Exemplarischer Messdatenplot  
(Ford Edge, Kreisverkehr, Dämpfungscharakteristik 3)

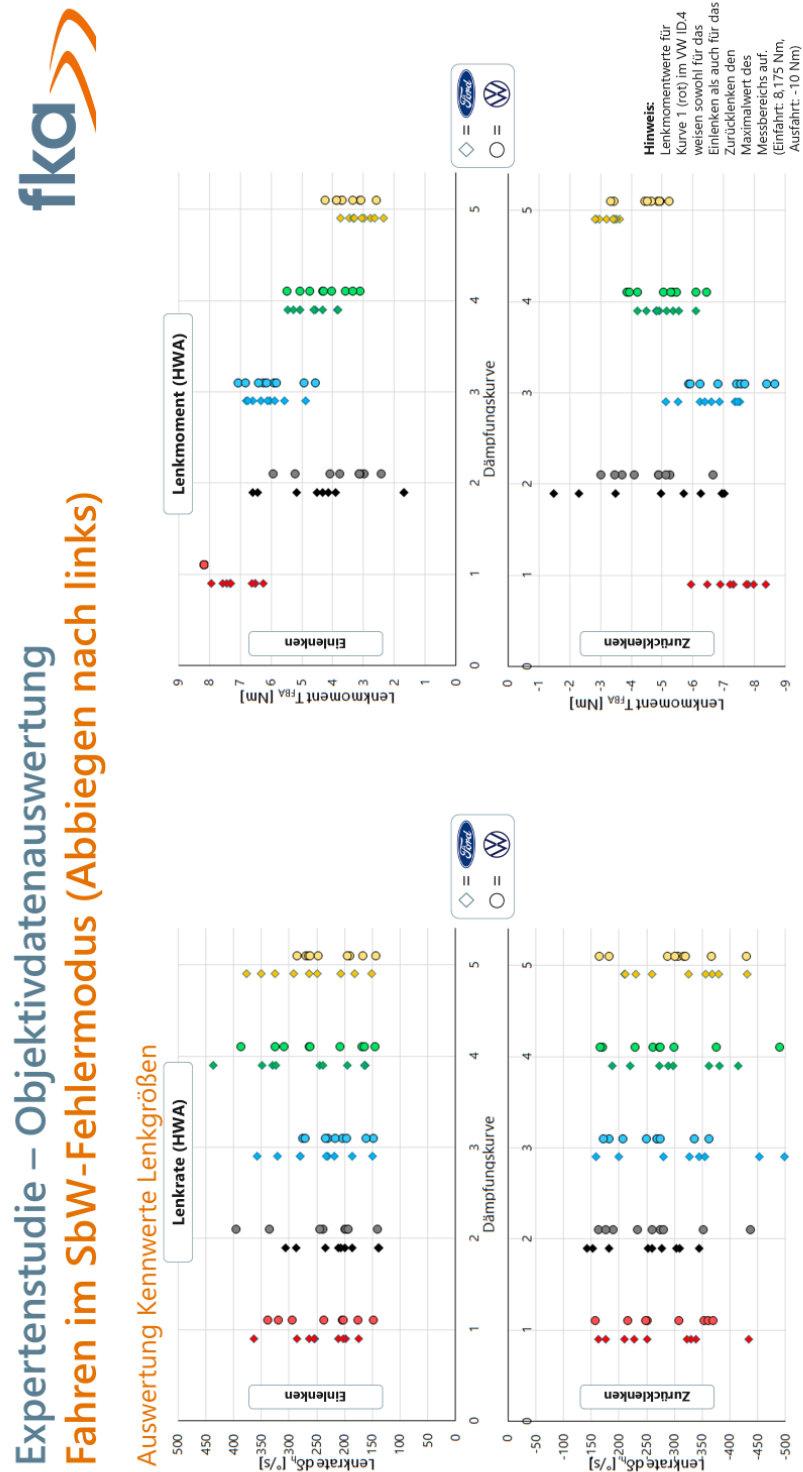
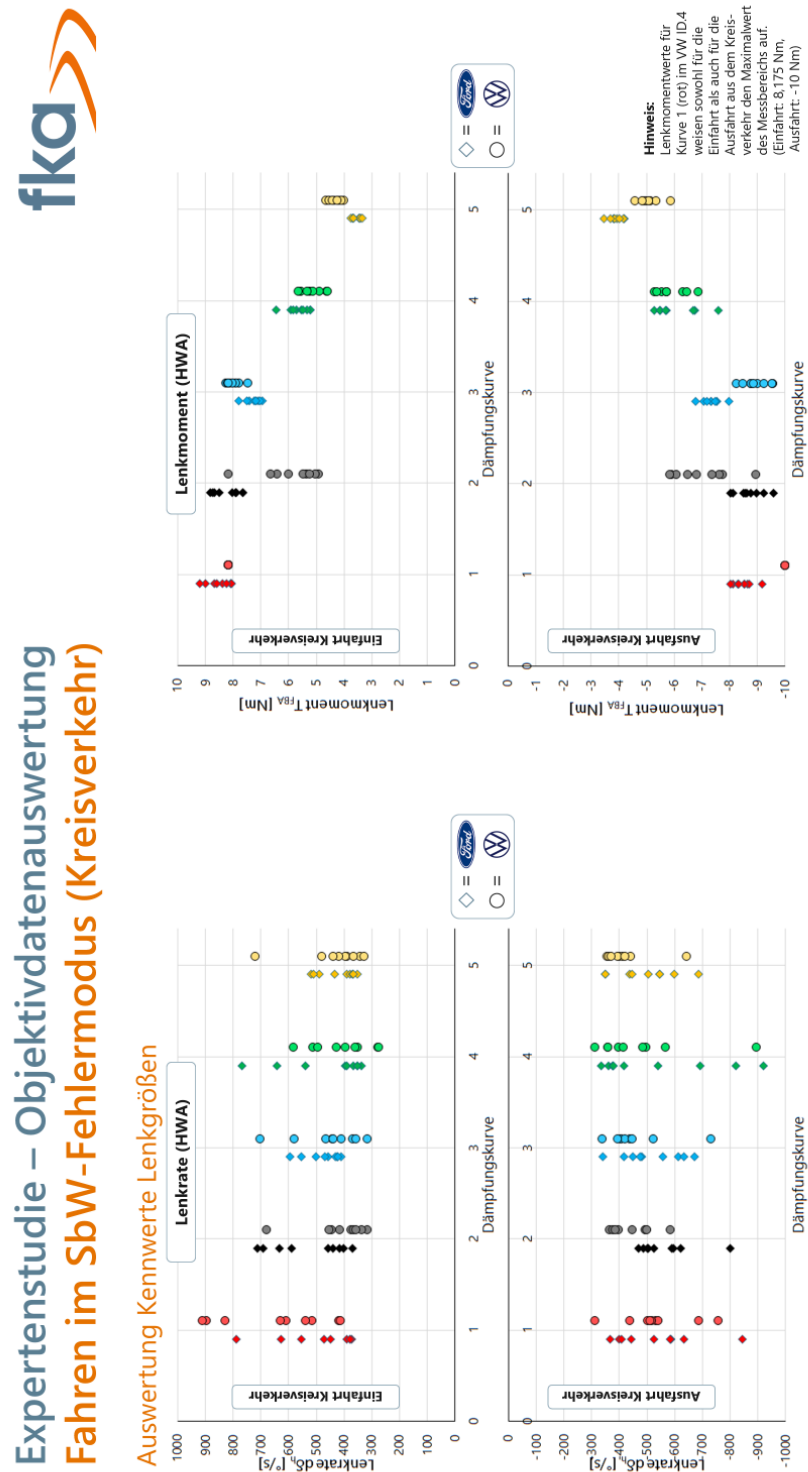


Abb. 6-4 LoF-Expertenstudie – Kennwerte Lenkgrößen  
 (Ford Edge & VW ID.4, Abbiegen nach links – LoF-Adaption)



LoFko\_20241107\_Expertenstudie // #245750

CREATING IDEAS &amp; DRIVING INNOVATIONS

07.11.2024 // 25

Abb. 6-5: LoF-Expertenstudie – Kennwerte Lenkgrößen  
 (Ford Edge & VW ID.4, Kreisverkehr – LoF-Adaption)

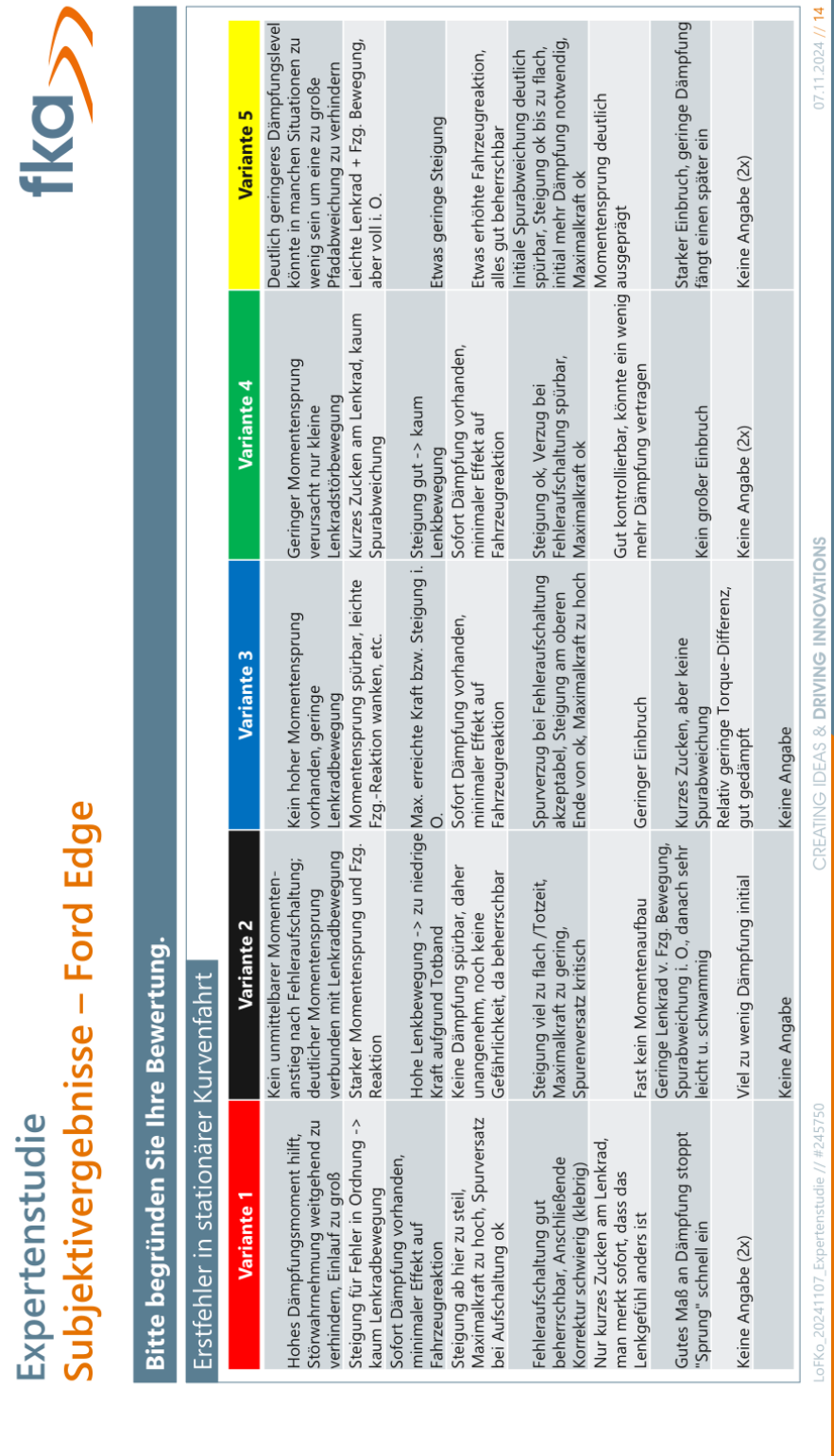


Abb. 6-6: LoF-Expertenstudie – Subjektivergebnisse (Ford Edge, Kreisfahrt mit LoF-Fehleraufschaltung)

## Expertenstudie Subjektivergebnisse – Ford Edge



Bitte begründen Sie Ihre Bewertung.

Abbiegen

| Variante 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Variante 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Variante 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Variante 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Variante 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sehr hohe Lenk kraft beim Abbiegen nötig<br>Rückstellverhalten recht stark gedämpft, aber gut kontrollierbar<br>Max. Kraft zu hoch -> Steigung zu hoch<br>Etwas weniger angenehm ggü. Kurve 3, da Maximalkraft zu hoch, trotzdem gut beherrschbar<br>Maximalkraft zu hoch, Steigung ok bis zu steil, Rückstellung erfordert zu viel Kraft<br>Gradient etwas höher als beim vorherigen Setting, Steer-back-to-center etwas überdämpft | Ungleicher Momentenverlauf erschwert präzises Lenken; Momentenanstieg verspätet, für Abbiegevorgang zu hoch<br>Differenz zwischen wenig & viel Dämpfung zu hoch<br>Erst niedriges Moment mit hoher anschließender Steigung -> ungünstig aber beherrschbar<br>Einsetzen der Dämpfung unangenehm, Totband nicht so schlimm, Gradient dann aber zu steil nicht gefährlich<br>Steigung sehr flach, Maximalkraft ok, Rückstellung gut beherrschbar<br>Eigentlich schon wieder zu frei, Einlaufpunkt kommt zu spät -> schwammig | Erhöhter Kraftaufwand beim Abbiegen erforderlich<br>Moment leicht zu hoch, aber machbar<br>Max. erreichte Kraft i. O., Steigung etwas zu stark<br>Dämpfung beim Zurücklenken deutlich spürbar, aber bei weitem nicht gefährlich<br>Maximalkraft beim Einlenken und Zurückstellen zu hoch, Steigung ok<br>Trotz hoher Gradienten noch kontrollierbar | Beherrschbares Handmoment beim schnellen Ein-/Auslenken<br>Maximalkraft beim Zurücklenken etwas hoch, Steigung ok<br>Gute Steigung -> max. erreichte Kraft gut<br>Dämpfung beim Zurücklenken deutlich spürbar, aber bei weitem nicht gefährlich<br>Steigung und Peak zu hoch<br>Klarer Widerstand, aber nicht zu viel Torquelevel adäquat & vorhersehbar<br>Keine Angabe (2x) | Leichtes, gleichmäßiges Lenk radmoment ermöglicht müheloses präzises Abbiegen<br>Momentenaufbau gut<br>Angenehme Maximalkraft -> Steigung i.O.<br>Gute Maximalkraft für schnelle Lenkbewegungen<br>Steigung ok, Maximalkraft ok, Rückstellung gut durchführbar<br>Niedriger Gradient / Level macht sowohl Ein- als auch zurück nach Center sehr einfach & kontrolliert<br>Rücklauf leicht gedämpft<br>Keine Angabe (2x) |
| Steigung und Peak zu hoch                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Steigung und Peak zu hoch                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Steigung und Peak viel zu hoch                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Keine Angabe (2x)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Keine Angabe (2x)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Etwas hohe Dämpfung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Keine Angabe (2x)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Keine Angabe                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

LoFko\_20241107\_Expertenstudie // #245750

CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

07.11.2024 // 15

Abb. 6-7: LoF-Expertenstudie – Subjektivergebnisse  
(Ford Edge, Abbiegen nach links – LoF-Adaption)

## Expertenstudie Subjektivergebnisse – Ford Edge



Bitte begründen Sie Ihre Bewertung.

| Adaption                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Variante 1                                                                                                                                                                                                                                                 | Variante 2                                                                                                                                                          | Variante 3                                                                                                                                                                                                                                                             | Variante 4                                                                                                                                                                                 | Variante 5                                                                                                                                                                                                                                                          |  |
| „Spiel“ um die Mitte für Zielgenauigkeit nachteilig, Lenkmomentfortlauf ist nicht harmonisch, präzises Fahren ist erschwert<br>Man merkt direkt, dass es schwergängig ist und dass etwas defekt ist, Fahrer würde vermutlich rechts ranfahren und anhalten | Prazißes Fahren ist erschwert, Zielgenauigkeit ist durch „lose Mitte“ erschwert<br>Geradauslauf sehr schlecht, keine Präzision, Spur halten sehr viel Konzentration | Prazißes Fahren möglich, harmonisches Lenkmoment, beim schnellen Fahren Spurwechsel Lenkmoment etwas hoch<br>On-Center im Vergleich zu etwas höherer Lenkgeschwindigkeit zu lose bzw. Gradienten und max. Torque zu hoch<br>Kein Totband -> max. erreichte Kraft i. O. | Prazißes Fahren im passiven Zustand möglich, Momentenniveau passend, Spurwechsel gezielt machbar und beherrschbar<br>Gut kontrollierbar, Gegenkraft kommt sauber rein u. ist nicht zu hoch | Prazißes Fahren des Fzg. Möglich; evtl. könnten Fahrstörungen das Lenkverhalten beeinflussen, da das Moment sehr gering ist<br>Nach schnelleren Lenkbewegungen dauert es etwas länger, bis man wieder Mitte gefunden hat, sonst fast schon komfortables Kraftniveau |  |
| Totband i.O.-> Steigung zu hoch                                                                                                                                                                                                                            | Fast kein Momentenaufbau                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                        | Totband i. O., erreichte max. Kräfte und Steigung gut                                                                                                                                      | Etwas geringe Steigung                                                                                                                                                                                                                                              |  |
| Spurwechsel gut bedämpft, Dämpfung insg. nicht störend                                                                                                                                                                                                     | Keine Dämpfung spürbar, dennoch i. O.                                                                                                                               | Man wird nicht so stark am Lenken gehindert, guter Gradient                                                                                                                                                                                                            | Gleich Kurve 3, Rauslenken ähnlich normaler Lenkungshaptik                                                                                                                                 | Nicht mehr so nah an normalen Momentenniveau, daher trotz geringer Maximalkraft gut spürbar                                                                                                                                                                         |  |
| Steigung etwas steil, Maximalkraft zu hoch aber ok, Spurwechsel sicher durchführbar                                                                                                                                                                        | Steigung zu flach, Maximalkraft zu gering, Spurwechsel beherrschbar, erfordert aber Konzentration                                                                   | Anlenkpunkt und niedrige Lenkwinkelgeschwindigkeit ok                                                                                                                                                                                                                  | Steigung + Maximalkraft ok, Spurwechsel gut beherrschbar                                                                                                                                   | Steigung & Maximalkraft ok, Fahrzeug gut beherrschbar, Spurwechsel unkritisch                                                                                                                                                                                       |  |
| Gut kontrollierbar, vielleicht etwas überdämpft                                                                                                                                                                                                            | Zu leichtgängig und schwammig, leicht wackelig um die Mitte                                                                                                         | Gut fahrbar, etwas schwergängig                                                                                                                                                                                                                                        | Guter Momentenaufbau, Peak wird nicht erreicht                                                                                                                                             | Anlenkverhalten gut                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| Man gewöhnt sich schnell eher, Steigung u. Kraft recht hoch, teilweise recht starke Unterschiede im Handmoment bei geringen Unterschieden in Lenkgeschwindigkeit                                                                                           | Totband führt zu nahezu keinem Moment -> sehr wackeliges Lenken führt zu Schwierigkeiten in der Lenkpräzision                                                       | Steigung ok bis hoch, Maximalkraft ok bis hoch, Dämpfung bei kleiner bis mittlerer Lenkwinkelgeschwindigkeit akzeptabel bis hoch                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                            | Nicht so schlimm wie Setting mit zu spätem Einschaltzeitpunkt, aber flacher Gradient reduziert Präzision on-center                                                                                                                                                  |  |
| Auch bei niedrigen Lenkwinkelgeschwindigkeiten Handmoment zu hoch (klebrig)                                                                                                                                                                                | Keine genügende Kontrolle für kleine Lenkbewegungen                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                        | Torque Level Aufbau (Gradient) gut vorhersehbar                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |
| Keine Angabe                                                                                                                                                                                                                                               | Keine Angabe                                                                                                                                                        | Keine Angabe (2x)                                                                                                                                                                                                                                                      | Keine Angabe (2x)                                                                                                                                                                          | Keine Angabe (2x)                                                                                                                                                                                                                                                   |  |

LoFko\_20241107\_Expertenstudie // #245750

CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

07.11.2024 // 16

Abb. 6-8: LoF-Expertenstudie – Subjektivergebnisse  
(Ford Edge, allgemeine Adaptionen – LoF-Adaption)

## Expertenstudie Subjektivergebnisse – Ford Edge



Bitte begründen Sie Ihre Bewertung.

| Kreisverkehr                                                                                             |                                                                                                                                       |                                                                                                             |                                                                                                                               |                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variante 1                                                                                               | Variante 2                                                                                                                            | Variante 3                                                                                                  | Variante 4                                                                                                                    | Variante 5                                                                                           |
| Lenkkraftaufwand ist zu hoch                                                                             | Ungleicher Lenkmomentenaufbau erschwert die Spurhaltung                                                                               | Erhöhtes Lenkmoment beim schnellen Ein-/ Auslenken                                                          | Max. Moment leicht zu hoch                                                                                                    | Müheloses, präzises Lenkverhalten                                                                    |
| Man weiß vorher, dass es schwer geht                                                                     | Einlaufpunkt und Momentenniveau passen nicht, man denkt beim Einlenken, dass es ganz leicht geht, muss aber dann richtig stark lenken | Moment leicht zu hoch                                                                                       | Leicht erhöhtes Handmoment beim schnellen Ein-/Auslenken, jedoch beherrschbar                                                 | Wie beim Abbiegen durch das niedrige Level/Gradient sehr einfach zu kontrollieren                    |
| Max. Kraft & Steigung zu hoch                                                                            | Hohe Steigung & hohe max. Kraft vor allem nach Totband -> Delta Kraft sehr ungünstig                                                  | Zu hohe max. Kraft -> Steigung etwas zu hoch                                                                | Max. Kraft gut -> aber im fallenden Bereich hier -> Steigung gut                                                              | Maximalkraft & Steigung i.O.                                                                         |
| Maximalkraft deutlich erhöht ggü. Kurve 3, unangenehmer bei schnellen Lenkbewegungen, alles beherrschbar | Steigung viel zu steil, Maximalkraft viel zu hoch, Sprung zwischen kleiner und großer Lenkwinkelgeschwindigkeit viel zu hoch          | Zunehmende Dämpfung erkennbar, man kann aber gut reagieren, da Maximalkraft nicht zu hoch                   | An der Grenze zu zu wenig Dämpfung, da sich die Dämpfung „zu gut“ anfühlt, kein „Kaputtgefühl“ nicht zu klein für Fahrmanöver | Max. Momente noch spürbar, aber nicht zu klein für Fahrmanöver                                       |
| Maximalkraft zu hoch, Steigung zu steil, Einbiegen und Ausfahren schwer kontrollierbar                   | Gradient und Peak unangenehm relativ zu Totband, an der Grenze zu gefährlich                                                          | Maximalkraft beim Einbiegen und Ausfahren zu hoch, Steigung zu hoch                                         | maximales Torquelevel etwas zu hoch, aber kontrollierbar                                                                      | Auch mit 1 Hand leicht machbar                                                                       |
| Torquelevel subjektiv höher als bei vorherigem Setting, da aber Gradient höher, weniger „überraschend“   | Gefühl bei niedriger v. Fzg. höhere Dämpfung als beim Fahren v. auch beim Abbiegen kam mir das Handmoment geringer vor                | On-Center im Vergleich zu etwas höherer Lenkgeschwindigkeit zu lose bzw. Gradienten und max. Torque zu hoch | Maximalkraft hoch, Zielgenauigkeit beim Einbiegen und Ausfahren erfordert Konzentration, Steigung ok                          | Steigung ok, Maximalkraft ok, Maximalkraft beim Einbiegen und Ausfahren auf Normalniveau ohne Fehler |
| Steigung und Peak zu hoch                                                                                | Peak zu hoch                                                                                                                          | Steigung und Peak viel zu hoch                                                                              | Steigung und Peak zu hoch                                                                                                     | Angenehme Steigung, Peak ok                                                                          |
|                                                                                                          | Große, schnelle Lenkbewegungen führen zu unvorhergesehenen höheren Torqueleveln                                                       | Etwas hohe Dämpfung                                                                                         | Etwas erhöhter Aufwand beim Zwischenlenken, rauslenken fast schon im Normalbereich                                            | Keine Angabe (2x)                                                                                    |
| Keine Angabe (2x)                                                                                        | Keine Angabe                                                                                                                          | Keine Angabe                                                                                                | Keine Angabe                                                                                                                  | Keine Angabe (2x)                                                                                    |

LoFko\_20241107\_Expertenstudie // #245750

CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

07.11.2024 // 17

Abb. 6-9: LoF-Expertenstudie – Subjektivergebnisse  
(Ford Edge, Kreisverkehr – LoF-Adaption)

Expertenstudie  
Subjektivergebnisse – Ford Edge



Bitte geben Sie weitere Anmerkungen zur erlebten Dämpfungskurve an.

| Variante 1                                                                                                            | Variante 2                                                                   | Variante 3                                                                                                         | Variante 4                                                                                                                                | Variante 5                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stärke: geringe Störung der Lenkung bei Fehleraufschaltung, Schwäche: zu hohe Lenkkräfte bei urbanen Abbiegevorgängen | Unharmonischer Lenkmomentenverlauf erschwert präzises Fahren und Spurhaltung | kaum Lenkradbewegung beim Fehleraufschalten, leicht erhöhter Momentenverlauf im passiven Zustand aber beherrschbar | guter Kompromiss zwischen notwendiger Dämpfung bei Fehler in der stationären Kreisfahrt und Handling auf Landstraßen und Abbiegevorgängen | müheloses Handling im passiven Zustand                                                                                      |
| Immer noch okay, Maximalkraft könnte etwas niedriger sein                                                             | Sehr ungünstiges Gesamtverhalten                                             | Einlauf bzw. Gradient passt nicht                                                                                  | Schon fast zu nah an normalem Lenkgefühl, dem Fahrer wird haptisch nicht genug klar gemacht, dass etwas nicht stimmt                      | Für niedrigere Fahrzeuggeschwindigkeiten sehr angenehm, allerdings leidet die Präzision bei höheren Geschwindigkeit zu sehr |
| Zu hohe max. Kraft & Steigung -> nicht geeignet                                                                       | Keine Angabe (7x)                                                            | Max. Kraft an "Limit" für Probandenstudie & fragwürdig                                                             | Sehr gute Kurve -> geeignet für Probandenstudie                                                                                           | Keine Angabe (7x)                                                                                                           |
| Keine Angabe (6x)                                                                                                     |                                                                              | Guter Kompromiss beim Raus- und Zurücklenken                                                                       | Keine Angabe (6x)                                                                                                                         |                                                                                                                             |
|                                                                                                                       |                                                                              | Keine Angabe (5x)                                                                                                  |                                                                                                                                           |                                                                                                                             |

Abb. 6-10: LoF-Expertenstudie – Subjektivergebnisse (Ford Edge, allgemeine Anmerkungen)

## Expertenstudie

### Subjektivergebnisse – VW ID.4



Bitte begründen Sie Ihre Bewertung.

Erstfehler in stationärer Kurvenfahrt

| Variante 1                                                                                                                        | Variante 2                                                                                                                                                                                                         | Variante 3                                                                        | Variante 4                                                                                                | Variante 5                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kein störender Momentensprung in der stationären Kursfahrt wahrnehmbar                                                            | Momentensprung am Lenkrad bei Fehleraufschaltung deutlich spürbar. Führt zu Störleakwinkel. Dämpfungsmoment am Lenkrad für dieses Manöver zu gering. Einlaufpunkt etwas niedriger -> geringes Moment im Fehlerfall | Leichter Momenteneinbruch bei Fehleraufschaltung spürbar, jedoch gut beherrschbar | Lenkradbewegung durch Momentensprung spürbar, jedoch beherrschbar                                         | Einlaufpunkt: vermutlich vorhanden, rel. Viel störend beim Lenken um Null, da kein Gegenmoment vorhanden, Steigung: könnte steiler sein, Maximalkraft: ok |
| Kaum Lenkrad-Reaktion Für Normalfahrer war der Aufschaltzeitpunkt kaum auflösbar, hätte auch ein Stein auf der Straße sein können | Einlaufpunkt etwas niedriger -> geringes Moment im Fehlerfall                                                                                                                                                      | Totband, Steigung sehr gut -> Maxkraft hier nicht erreicht                        | Günstiges Gesamtverhalten (Maximalkraft, Totband, Steigung)                                               | Steigung i. O.; Maximalkraft i. O.; beides situativ unkritisch                                                                                            |
| Maximalkraft zu hoch. Steigung bis 50% Maximalkraft ok, danach zu prozessiv                                                       | Dämpfung sofort spürbar, ggf. etwas zu leicht, aber gut beherrschbar                                                                                                                                               | Quasi keine Lenkradbewegung, direkt von Reibung v. Dämpfung abgefangen            | Kontrollierbarkeit deutlich eingeschränkt; zu wenig Dämpfung, Einlaufpunkt zu spät (Borderline 3, eher 4) | Etwas mehr Dämpfung wäre schön, Beherrschbarkeit ohne Probleme gegeben                                                                                    |
| Dämpfung deutlich spürbar, aber noch nicht zu hoch                                                                                | Steigung zu flach. Kleinste Handkraft zu gering. Fahrer überkorrigiert                                                                                                                                             | Steigung ok; Maximalkraft ok                                                      | Steigung im unteren Bereich zu flach. Steigung zu progressiv. Maximalkraft zu hoch.                       | Steigung zu flach, schnell Überkorrektur des Fahrers. Maximalkraft ok.                                                                                    |
| Fehleraufschaltung führt zu sehr geringen Fahrzeugbewegungen, anschließende Korrektur ist schwierig                               | Leichtes Zucken, min. Spurabweichung                                                                                                                                                                               | Geringer Momenteneinbruch, im Anschluss gut korrigierbar                          | Etwas zu wenig Dämpfung, aber trotzdem gut beherrschbar                                                   | Momentensprung recht hoch; Fzg. Reaktion spürbar                                                                                                          |
| Durch reduzierten bzw. keinen Einlaufpunkt geringe Initialreaktion                                                                | Leichter Einbruch aber ok                                                                                                                                                                                          | Dämpfung in ausreichendem Maße sofort spürbar. Wenig Fahrzeugreaktion             | Leichter Momenteneinbruch, Korrektur ok                                                                   | Deutliche Lenkradbewegung/ Fahrzeugbewegung durch Momentensprung                                                                                          |
| Hohe Dämpfung mitgitiert Fehlerinspeisung gut                                                                                     | Deutlich zu wenig Dämpfung                                                                                                                                                                                         | Gut gedämpftes Verhalten, kaum Torque-Sprung                                      | Kurzes Zucken, kaum Spurabweichung                                                                        | Moment inkl. Grundreibung ok                                                                                                                              |
| Keine Angabe                                                                                                                      | Keine Angabe (2x)                                                                                                                                                                                                  | Keine Angabe (2x)                                                                 | Keine Angabe (2x)                                                                                         | Relativ wenig Dämpfung, allerdings subjektiv früherer Einlaufpunkt                                                                                        |
|                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                   |                                                                                                           | Kurzes Zucken am Lenkrad, min. Spurabweichung                                                                                                             |

LoFko\_20241107\_Expertenstudie // #245750

CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

07.11.2024 // 25

Abb. 6-11: LoF-Expertenstudie – Subjektivergebnisse  
(VW ID.4, Kreisfahrt mit LoF-Fehleraufschaltung)

## Expertenstudie Subjektivergebnisse – VW ID.4



Bitte begründen Sie Ihre Bewertung.

| Abbiegen                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                   |                                                                                                                                   |                                                                            |                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variante 1                                                                                                                                                                                                                                                                   | Variante 2                                                                        | Variante 3                                                                                                                        | Variante 4                                                                 | Variante 5                                                                                             |
| Erhöhter Kraftbedarf beim Einlenken; sehr starker Kraftbedarf beim schnellen Zurücklenken                                                                                                                                                                                    | Abbiegevorgang sowohl bzgl. Einlenken als auch Auslenken unkritisch               | Dämpfung bei höheren Geschwindigkeit deutlich spürbar, aber gut beherrschbar                                                      | Mühe los Abbiegen möglich, Ein- und Auslenken stellen kein Problem dar     | Sehr leichtes Abbiegen möglich aufgrund des geringen Moments - unkritisch                              |
| Viel zu hohes Moment -> Steigung zu hoch                                                                                                                                                                                                                                     | Hohe Maximalkraft beim Zurücklenken (Komfort-Thema)                               | Maxkraft etwas zu hoch aber noch im möglichen -> interessant für Probandenuntersuchung?                                           | Maximalkraft etwas hoch aber i. O. (evtl. Komfort-Thema)                   | Maximalkraft und Steigung i. O.                                                                        |
| Rückstellkraft und Maximalkraft beim Zurückstellen zu hoch. Für Normalfahrer zu ungewohnt                                                                                                                                                                                    | Steigung ok. Maximalkraft ok. Rückführung ok.                                     | Steigung ok. Maximalkraft am oberen Ende von ok.                                                                                  | Steigung passend. Maximalkraft ok. Rückführung gut beherrschbar            | Steigung ok. Maximalkraft ok. Zurücklenken gut darstellbar                                             |
| Bei hohen Fzg. Geschwindigkeiten kann es bei den dann notwendigen hohen Lenk-geschwindigkeiten sehr unangenehm werden, die Beherrschbarkeit wäre aus meiner Sicht gerade noch so gewährleistet, da der Fahrer aufgrund der deutlich wahrnehmbaren Dämpfung defensiver fährt. | Dämpfung auch bei höheren Lenkgeschwindigkeiten noch okay; nicht zu hoch.         | Lenkarmomenten-Niveau befindet sich beim Einlenken in üblichen Größenordnungen. Beim Auslenken leicht erhöhter Kraftaufwand nötig |                                                                            | Niedriger Gradienten/Level bei niedrigen Fzg. Geschwindigkeiten gut kontrollierbar                     |
| Steigung Peak viel zu hoch                                                                                                                                                                                                                                                   | Steigung und Peak ok                                                              | Steigung und Peak deutlich spürbar                                                                                                | Gutes Maximalmoment, nicht störend                                         | Steigung u. Peak ok                                                                                    |
| Maximalkraft bzw. Steigung sehr hoch, dadurch Lenken sehr aufwändig                                                                                                                                                                                                          | bei langsamen Geschwindigkeiten ist zu später Einlaufpunkt nicht ganz so kritisch | Generell unauffällig, etwas hohe Lenkkräfte zum Geradestellen                                                                     | Niedrige Dämpfung/Gradient weniger störend bei niedrigen Geschwindigkeiten | Fehlende Rückstellung störend, aber bei diesem Manöver kontrollierbar, da langsame Fahrgeschwindigkeit |
| Deutlich zu hohe Lenkkräfte                                                                                                                                                                                                                                                  | Keine Angabe (3x)                                                                 | Etwas zu viel Dämpfung                                                                                                            | Dämpfung ein Tick hoch, aber leicht zu kontrollieren                       | Angenehmes Dämpfungsmoment                                                                             |
| Zu hohe Dämpfung                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                   | Keine Angabe (2x)                                                                                                                 | Keine Angabe (2x)                                                          | Gutes Kraftniveau                                                                                      |
| Keine Angabe                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                   |                                                                                                                                   |                                                                            |                                                                                                        |

LoFko\_20241107\_Expertenstudie // #245750

CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

07.11.2024 // 26

Abb. 6-12: LoF-Expertenstudie – Subjektivergebnisse  
(VW ID.4, Abbiegen nach links – LoF-Adaption)

## Expertenstudie Subjektivergebnisse – VW ID.4



Bitte begründen Sie Ihre Bewertung.

Adaption

| Variante 1                                                                                                                             | Variante 2                                                                                                                                                                                                                 | Variante 3                                                                                                           | Variante 4                                                                                                                                               | Variante 5                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kurvenfahrt präzise mit erhöhter Kraft machbar, Spurwechsel gefährlich, da Kraftaufwand zu hoch; engere, schnellere Kurven sind mühsam | Durch das geringe Dämpfungs-moment lassen sich die Kurven leicht fahren. Präzision teilweise schwierig. Spurwechsel leicht, Gefahr von Störungen durch den Fahrer in das Lenkrad aufgrund des geringen Handmoments gegeben | Kurvenfahrten präzise und mühelos fahrbar, Spurwechsel mit leicht erhöhtem Lenkrafteaufwand machbar und beherrschbar | Kurvenfahrten sind mühelos möglich, Präzision leicht durch "Sticky"-Effekte der mech. Reibung beeinflusst; Spurwechsel mit üblichem Lenktaufwand fahrbar | Kurven leicht fahrbar, mech. Reibung beeinflusst Präzision ("Sticky"), evtl. Gefahr durch Störung des Fahrers gegeben wg. Geringen Moments; Spurwechsel beherrschbar und einfach zu fahren |
| Zu hohe Maximalkraft                                                                                                                   | Einlaufverhalten ungünstig (aber nicht safety kritisch)                                                                                                                                                                    | angenehme Steigung und Totband -> Maxkraft nicht erreicht                                                            | Steigung gut abgestimmt                                                                                                                                  | Einlaufverhalten i. O.; unkritisch                                                                                                                                                         |
| deutlich zu hohe Gradienten/Level, signifikantes Reibungsgefühl                                                                        | Durch fehlende Dämpfung & späten Einlaufpunkt / niedriger Gradient deutliche Einschränkung der Kontrollierbarkeit / Präzision                                                                                              | Gut kontrollierbar, Grundreibung etwas störend, eventuell Gradient etwas zu hoch                                     | Steigung und Dämpfung im unteren Bereich zu gering, Überkorrektur des Fahrers; Maximalkraft ok                                                           | niedrige Lenkkräfte beeinflussen die Kontrollierbarkeit deutlich, durch frühen Einlaufpunkt noch borderline kontrollierbar                                                                 |
| Steigung ok, Spurwechsel stabil                                                                                                        | Steigung zu flach, Dämpfung zu gering (Totzeit). Maximalkraft ok.                                                                                                                                                          | Steigung ok, Maximalkraft ok.                                                                                        | Präzision leidet ein wenig                                                                                                                               | Steigung bei Spurwechsel zu flach. Maximalkraft ok.                                                                                                                                        |
| Spurwechsel wird bei der hohen Dämpfung deutlich gestört, bleibt aber beherrschbar.                                                    | Auto wird etwas unruhiger, bleibt aber gut beherrschbar                                                                                                                                                                    | Permanente Dämpfung spürbar, jedoch nicht störend und gut beherrschbar.                                              | Etwas zu wenig Dämpfung, aber gut beherrschbar                                                                                                           | Tendenziell etwas zu wenig Dämpfung, Beherrschbarkeit trotzdem i.O.                                                                                                                        |
| Momente zu hoch (klebrig)                                                                                                              | Steigung und Peak ok                                                                                                                                                                                                       | Handmomentenaufbau ok                                                                                                | Anlenkverhalten ok                                                                                                                                       | Anlenkmomente niedrig aber ok                                                                                                                                                              |
| Keine Angabe (3x)                                                                                                                      | Kraftniveau ok, fast schon komfortabel, Einlaufpunkt etwas spät, aber gut mit Reibung überdeckt                                                                                                                            | Etwas hohes Kraftniveau aber noch i. O.                                                                              | Noch kontrollierbar, aber schon deutlich eingeschränkt (niedriges Level, Gradient)                                                                       | Lässt sich sicher fahren                                                                                                                                                                   |
|                                                                                                                                        | Keine Angabe (2x)                                                                                                                                                                                                          | Keine Angabe (2x)                                                                                                    | Präzision v. Lenkverhalten i. O.                                                                                                                         | Keine Angabe (2x)                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                      | Keine Angabe                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                            |

LoFko\_20241107\_Expertenstudie // #245750

CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

07.11.2024 // 27

Abb. 6-13: LoF-Expertenstudie – Subjektivergebnisse  
(VW ID.4, allgemeine Adaptionsfahrt – LoF-Adaption)

## Expertenstudie Subjektivergebnisse – VW ID.4



Bitte begründen Sie Ihre Bewertung.

| Kreisverkehr                                                                                                |                                                                                                            |                                                                                                                                                                          |                                                                                     |                                                                                                                   |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Variante 1                                                                                                  | Variante 2                                                                                                 | Variante 3                                                                                                                                                               | Variante 4                                                                          | Variante 5                                                                                                        |  |
| Lenkmomente zu hoch für die schnellen großen Lenkwinkel                                                     | Die erforderlichen schnellen Lenkradbewegungen sind aufgrund des geringen Lenkradmoments leicht umzusetzen | Einlenken in den Kreisverkehr problemlos. Präzise Kreisfahrt möglich. Ausfahrt aus Kreisverkehr durch die sehr schnelle Lenkradbewegung grenzwertig, eher problematisch. | Momentenniveau bei schnellen Lenkradbewegungen gut beherrschbar                     | Die schnellen Lenkradbewegungen sind aufgrund des geringen Moments mühelos umsetzbar                              |  |
| Zu hohe Maximalkraft -> Steigung auch zu hoch                                                               | Maximalkraft etwas zu hoch (Komfort-Thema)                                                                 | Maxkraft etwas zu hoch -> Steigung i. O.                                                                                                                                 | Hohe Maximalkraft aber i. O.                                                        | Maximalkraft bzw. Steigung etwas hoch => Komfort ungünstig                                                        |  |
| Einbiegen und Ausfahren aus dem Kreis zu hohe Maximalkraft, gewählte Trajektorie kann nicht gehalten werden | Steigung ok. Maximalkraft noch akzeptabel.                                                                 | Steigung ok. Maximalkraft zu hoch. Rückstellung noch akzeptabel darstellbar                                                                                              | Steigung für mittlere Lenkgeschwindigkeiten ok; Maximalkraft am oberen Ende von ok. | Unterschied zwischen Steigung und Maximalkraft beim Einbiegen und Ausfahren zu groß. Spurabweichung beherrschbar. |  |
| Hart an der Grenze zu gefährlich.                                                                           | Steigung Peak passend                                                                                      | Starker Momentenanstieg und Peak                                                                                                                                         | Steigung Peak ok                                                                    | Steigung und Peak ok                                                                                              |  |
| Steigung und Peak viel zu hoch                                                                              | Höhe der Dämpfung bei Ausfahrt (relativ zum Level während des Fahrens) überrascht den Fahrer               | Lenkkräfte im Ein-/Auslenken passen zum Verhalten während der Fahrt, eventuell höher als ideal                                                                           | Man muss etwas an der Kurve rausziehen                                              | Da sehr langsam gefahren wird, kontrollierbar                                                                     |  |
| Zu hohe Dämpfung, zwingt zum langsamen Fahren                                                               | i. O.                                                                                                      | Etwas hohes Kraftniveau, gerade beim Rücklenken                                                                                                                          | Keine Angabe (4x)                                                                   | Keine Angabe (4x)                                                                                                 |  |
| Zu hohe Lenkkräfte                                                                                          | Keine Angabe (3x)                                                                                          | Keine Angabe (3x)                                                                                                                                                        |                                                                                     |                                                                                                                   |  |
| Keine Angabe (2x)                                                                                           |                                                                                                            |                                                                                                                                                                          |                                                                                     |                                                                                                                   |  |

LoFko\_20241107\_Expertenstudie // #245750

CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

07.11.2024 // 28

Abb. 6-14: LoF-Expertenstudie – Subjektivergebnisse  
(VW ID.4, Kreisverkehr – LoF-Adaption)

Expertenstudie  
Subjektivergebnisse – VW ID.4



Bitte geben Sie weitere Anmerkungen zur erlebten Dämpfungskurve an.

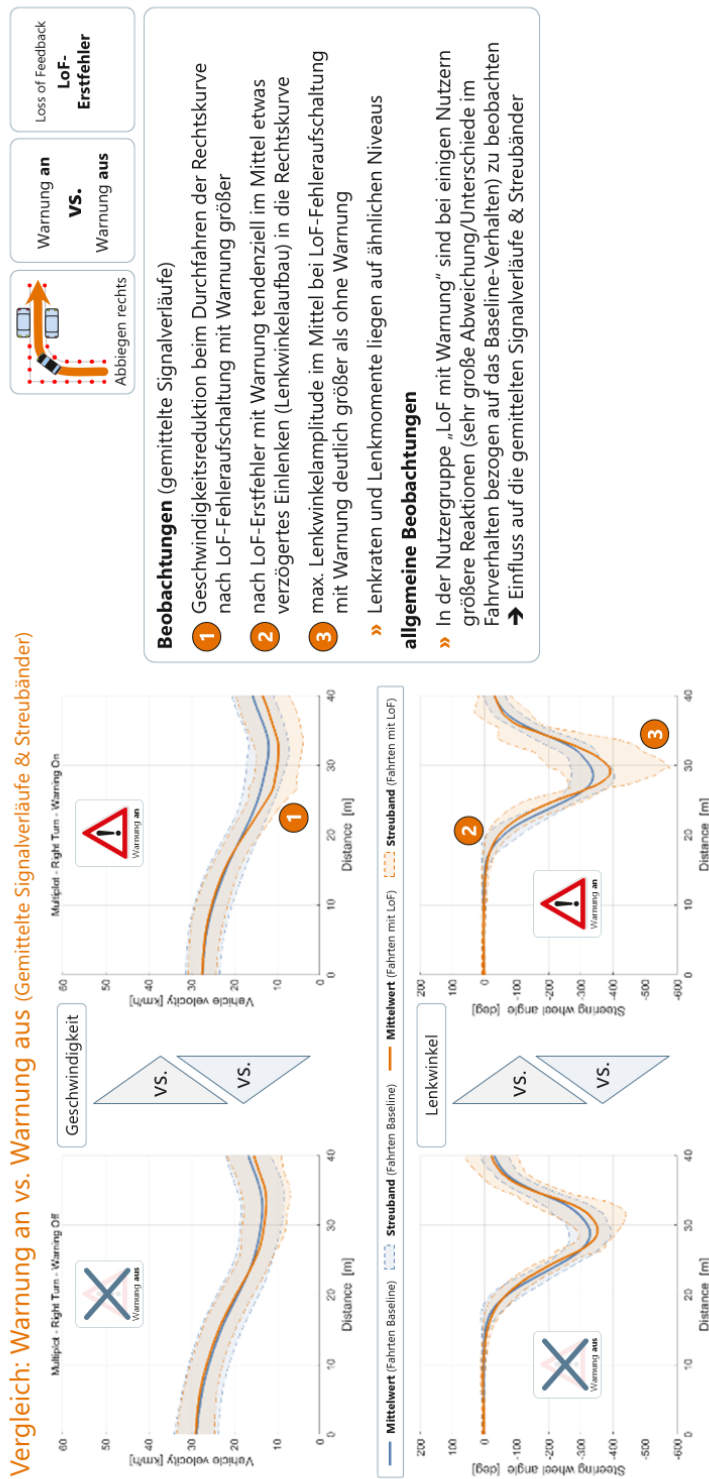
| Variante 1                                                                                        | Variante 2                                                                                                                        | Variante 3                                                                                                                                       | Variante 4                                                                              | Variante 5                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nicht geeignet (zu hohe Maximalkraft bzw. Steigung); Einlaufverhalten konnte ich nicht beurteilen | Deutlich zu später Einlaufpunkt & zu niedriger Gradient                                                                           | Maxkraft etwas zu hoch -> ggf. interessant für Probandenstudie: Steigung und Totband passend; könnte die richtige Kurve für Probandenstudie sein | Sehr gute Konfiguration -> ggf. für Probandenstudie                                     | Maximalkraft etwas zu hoch -> nicht safety sondern im Bezug auf Komfort                                 |
| Insgesamt sehr unangenehm, auch bei Normalfahrt                                                   | Guter Kompromiss aus Steigung und Maximalkraft, tendenziell bei kleineren Lenkgeschwindigkeiten zu leicht (aber gut beherrschbar) | Guter Kompromiss aus Raus- und Zurücklenken. Zurücklenken könnte etwas weniger bedämpft sein (Maximalkraft)                                      | Guter Kompromiss, bei Normalfahrt tendenziell zu wenig Dämpfung (aber gut beherrschbar) | Guter Kompromiss aus Raus- und Zurücklenken, bei Normalfahrt etwas zu wenig Dämpfung. Gut beherrschbar. |
| Überall zu hohe Kräfte, zu viel Gradient                                                          | Keine Angabe (7x)                                                                                                                 | Keine Angabe (7x)                                                                                                                                | Entweder späterer Einlaufpunkt oder flache Steigung störend                             | Keine Angabe (7x)                                                                                       |
| Keine Angabe (6x)                                                                                 |                                                                                                                                   |                                                                                                                                                  | Generell zu niedriger Gradient, Level                                                   |                                                                                                         |
|                                                                                                   |                                                                                                                                   |                                                                                                                                                  | Keine Angabe (5x)                                                                       |                                                                                                         |

Abb. 6-15: LoF-Expertenstudie – Subjektivergebnisse (VW ID.4, allgemeine Anmerkungen)

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten Abbiegen nach rechts – LoF-Erstfehler



Vergleich: Warnung an vs. Warnung aus (Gemittelte Signalverläufe & Streubänder)



LoFko\_20250226\_Nutzerstudie // #245750

CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 // 38

Abb. 6-16: LoF-Nutzerstudie – Abbiegen nach rechts mit LoF-Fehlerrückmeldung  
Vergleich gemittelte Signalverläufe und Streubänder für die Versuchsgruppen mit/ohne Warnung

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten Abbiegen nach rechts – LoF-Erstfehler

Vergleich: individuelle Nutzerreaktion auf LoF (LoF-Erstfehler-Lenkverhalten vs. Baseline)

### » Beispiele

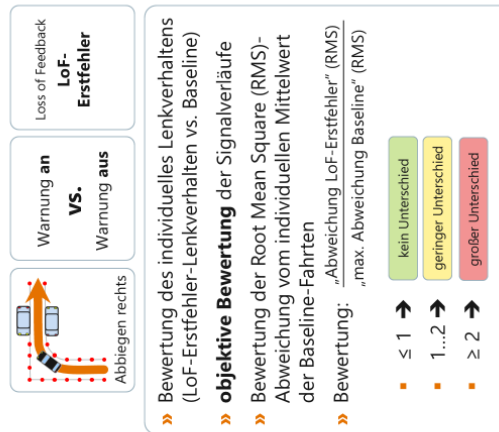
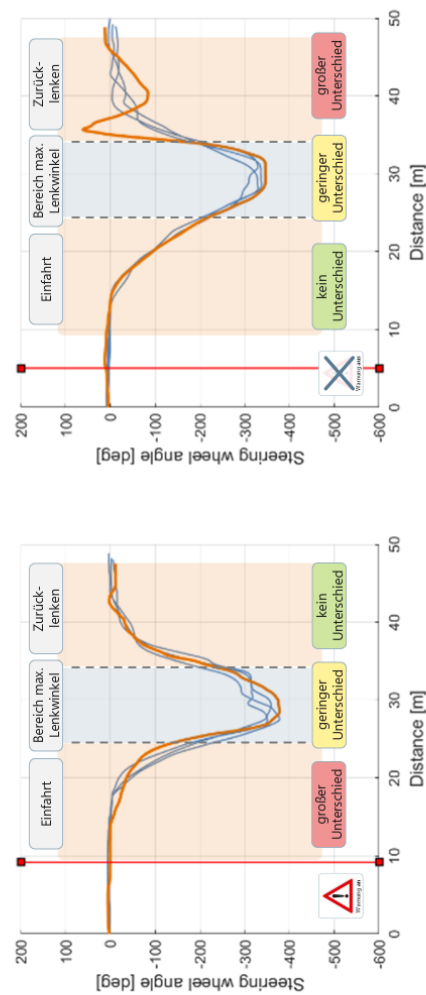


Abb. 6-17: LoF-Nutzerstudie – Vergleich: individuelle Nutzerreaktion auf LoF  
Objektive Bewertung der Abweichung im Lenkverhalten  
(LoF-Lenkverhalten vs. Baseline) – Beispiele

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten Abbiegen nach links – LoF-Adaption (mit Warnung)



Abbiegen links

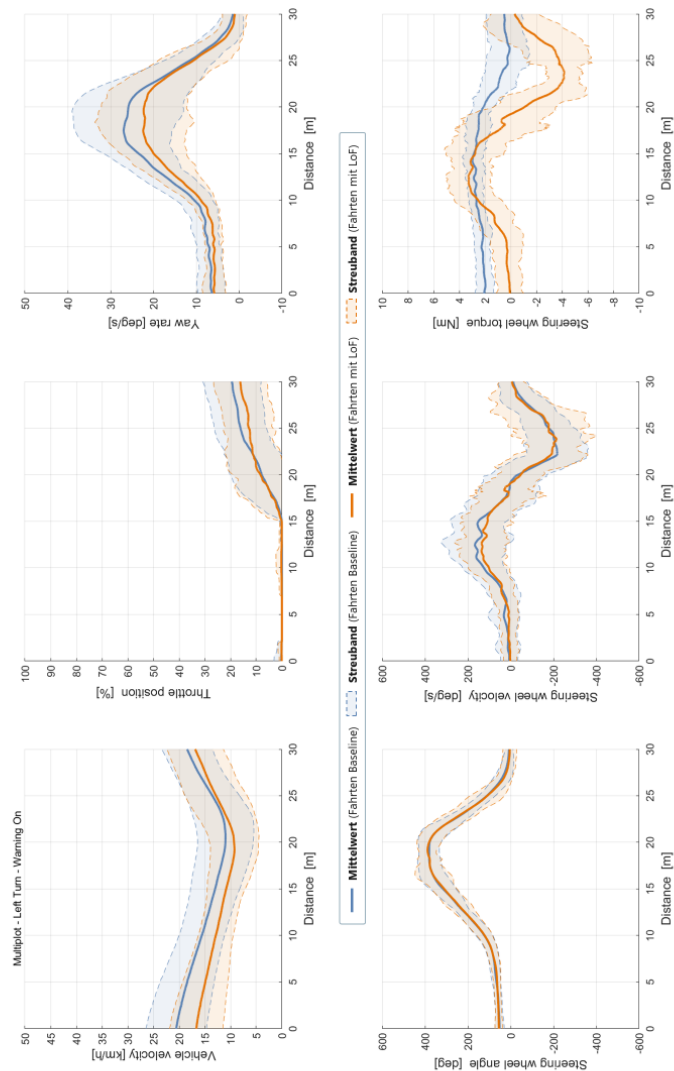
Warnung an

Loss of Feedback  
LoF-Adaption

**Beobachtungen**

- » erkennbare Reduktion der Fahrgeschwindigkeit (ca. -5 km/h)
- » Lenkverhalten (Lenkwinkel & Lenkrate) in der Adaption vergleichbar zu Baseline-Verhalten
- » etwas größere Streuung der Werte der Lenkrate beim Auslenken aus der Linkskurve
- » Änderung im Verlauf der Gierrate aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeit
- » Lenkmomentenbedarf weist aufgrund der LoF-Charakteristik deutliche Unterschiede auf

**gute Adaption** der Nutzer der Versuchsgruppe „LoF mit Warnung“



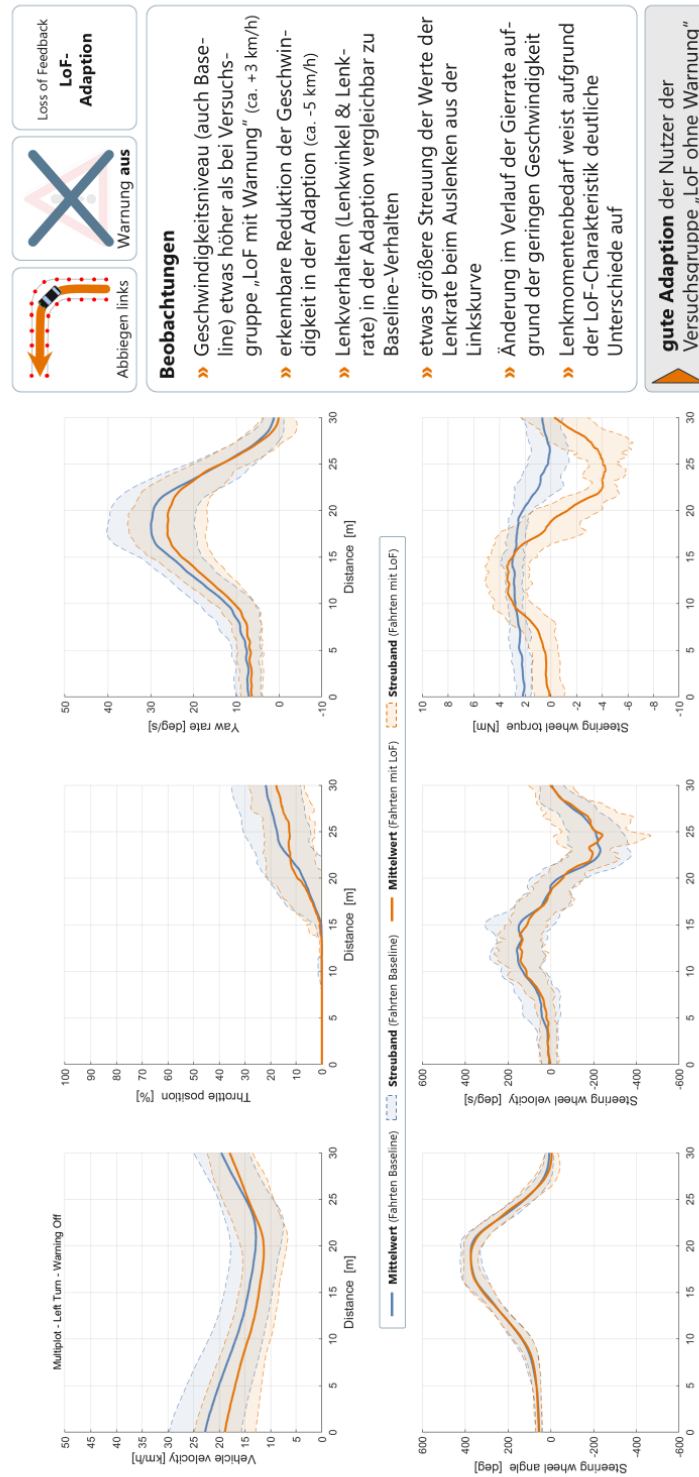
LoFko\_20250226\_Nutzerstudie // #245750

CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 // 47

Abb. 6-18: LoF-Nutzerstudie – Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption (Abbiegen nach links, Versuchsgruppe „mit Warnung“)

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten Abbiegen nach links – LoF-Adaption (ohne Warnung)



LoFko\_20250226\_Nutzerstudie // #245750

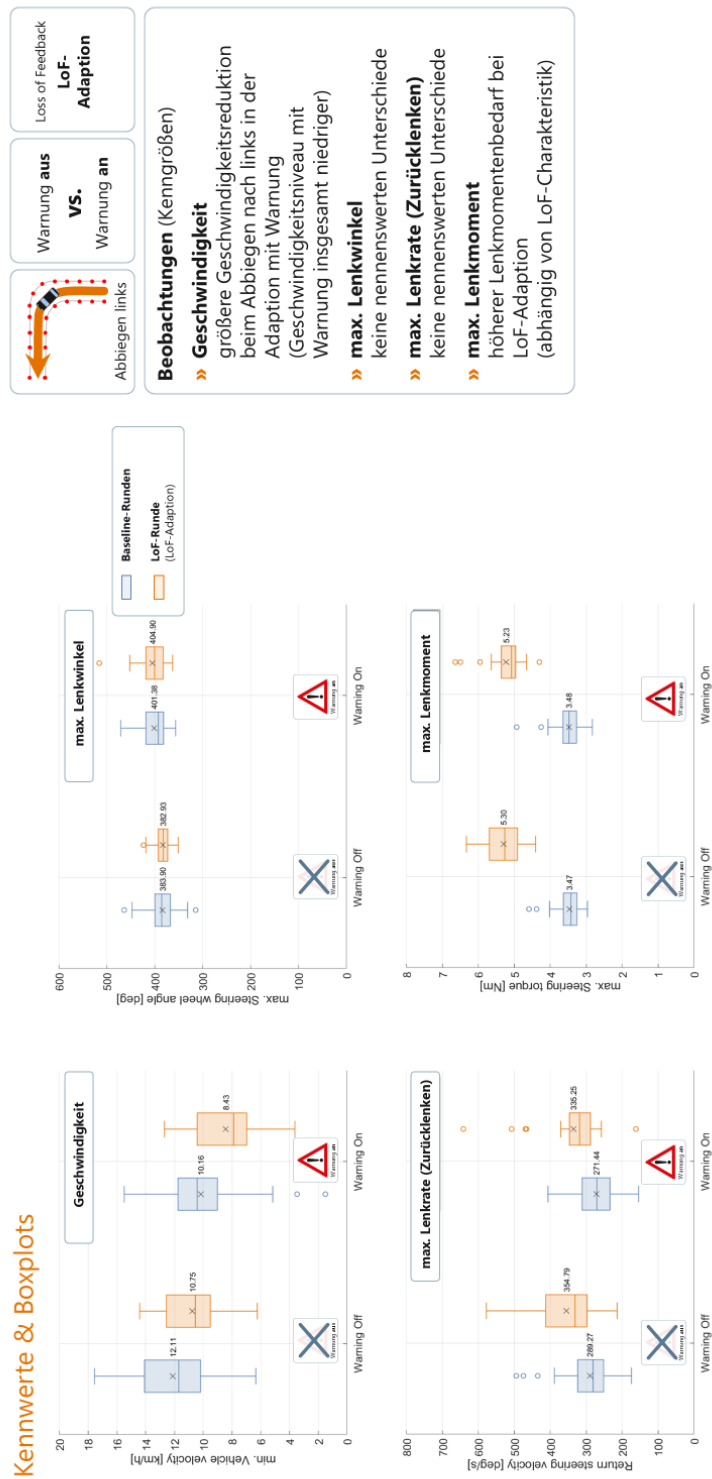
CREATING IDEAS &amp; DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 // 48

Abb. 6-19: LoF-Nutzerstudie – Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption (Abbiegen nach links, Versuchsgruppe „ohne Warnung“)

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten Abbiegen nach links – LoF-Adaption

### Kennwerte & Boxplots



LoFko\_20250226\_Nutzerstudie // #245750

CREATING IDEAS &amp; DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 // 49

Abb. 6-20: LoF-Nutzerstudie – Boxplots für ermittelte Kennwerte – LoF-Adaption  
(Abbiegen nach links, Versuchsgruppen mit/ohne Warnung)

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten

### Geradeausfahrt – LoF-Adaption (mit Warnung)



Geradeausfahrt

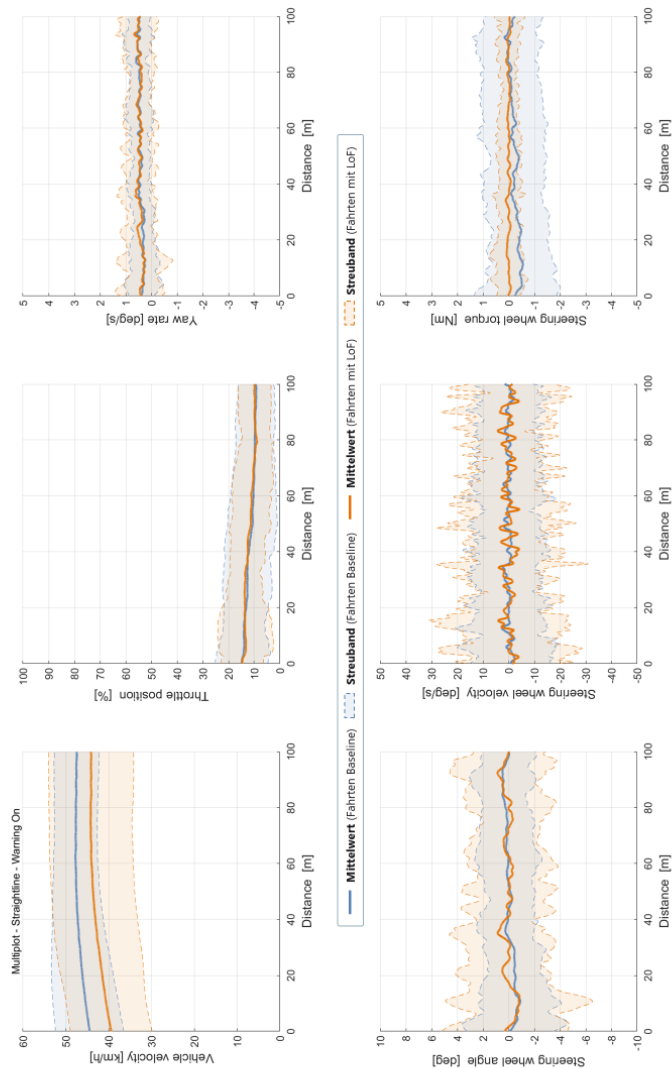
Warnung an

Loss of Feedback  
LoF-Adaption

**Beobachtungen**

- » Reduktion der Fahrgeschwindigkeit in der Adaption (ca. -5 km/h)
- » größere Streuung der Werte für Lenkwinkel und Lenkrate bei der Geradeausfahrt in der Engstelle (geringere Mittenzentrierung)
- » Streubreite des Lenkmoments nimmt ab, Lenkmomentenniveau eher geringer (abhängig von der LoF-Charakteristik)

**gute Adaption** der Nutzer der Versuchsgruppe „LoF mit Warnung“



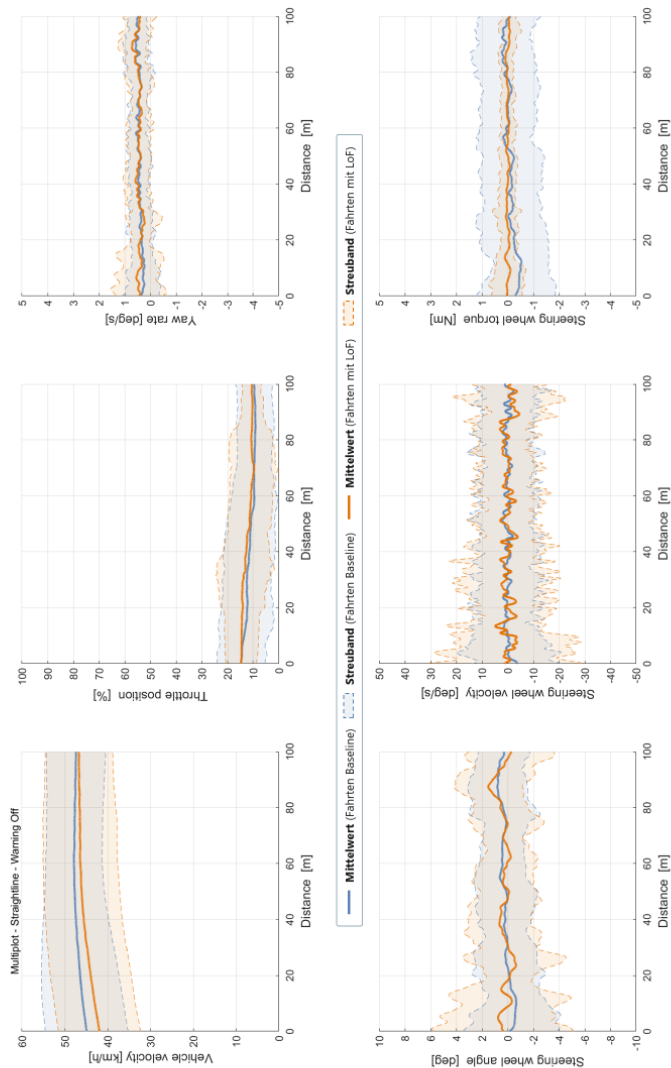
LoFko\_20250226\_Nutzerstudie // #245750

CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 // 50

Abb. 6-21: LoF-Nutzerstudie – Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption (Geradeausfahrt, Versuchsgruppe „mit Warnung“)

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten Geradeausfahrt – LoF-Adaption (ohne Warnung)



LoFko\_20250226\_Nutzerstudie // #245750

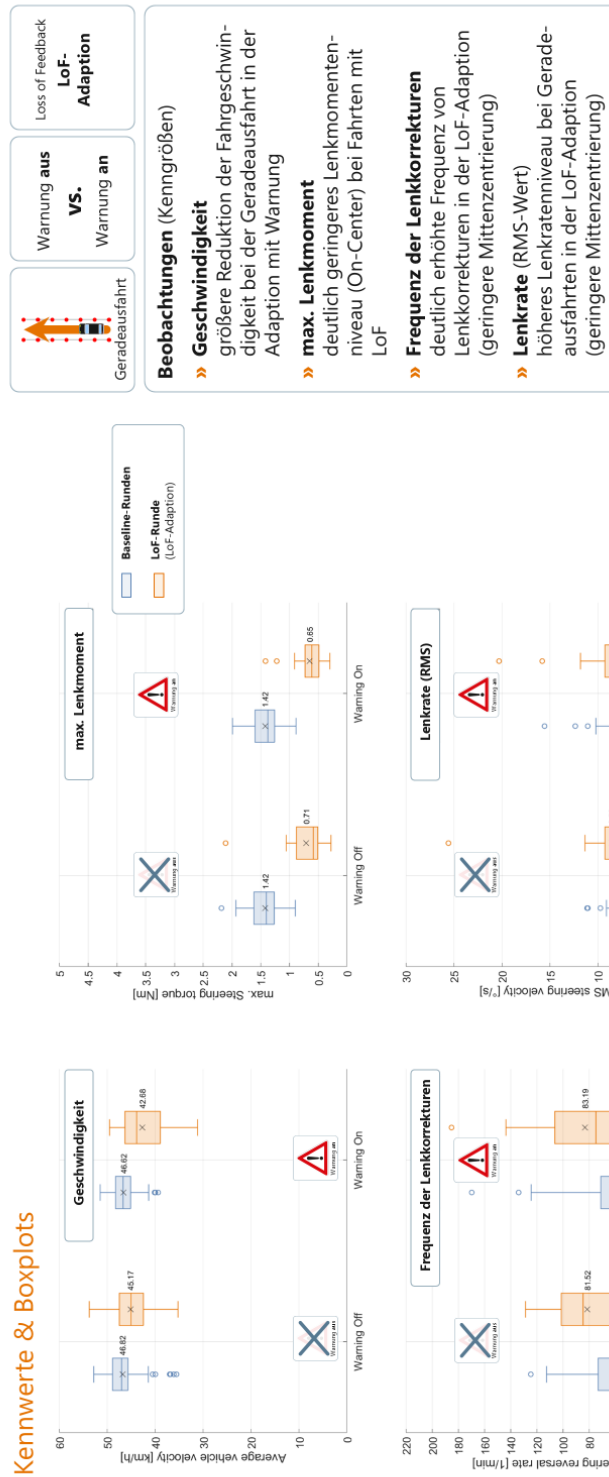
CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 // 51

Abb. 6-22: LoF-Nutzerstudie – Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption (Geradeausfahrt, Versuchsgruppe „ohne Warnung“)

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten Geradeausfahrt – LoF-Adaption

### Kennwerte & Boxplots

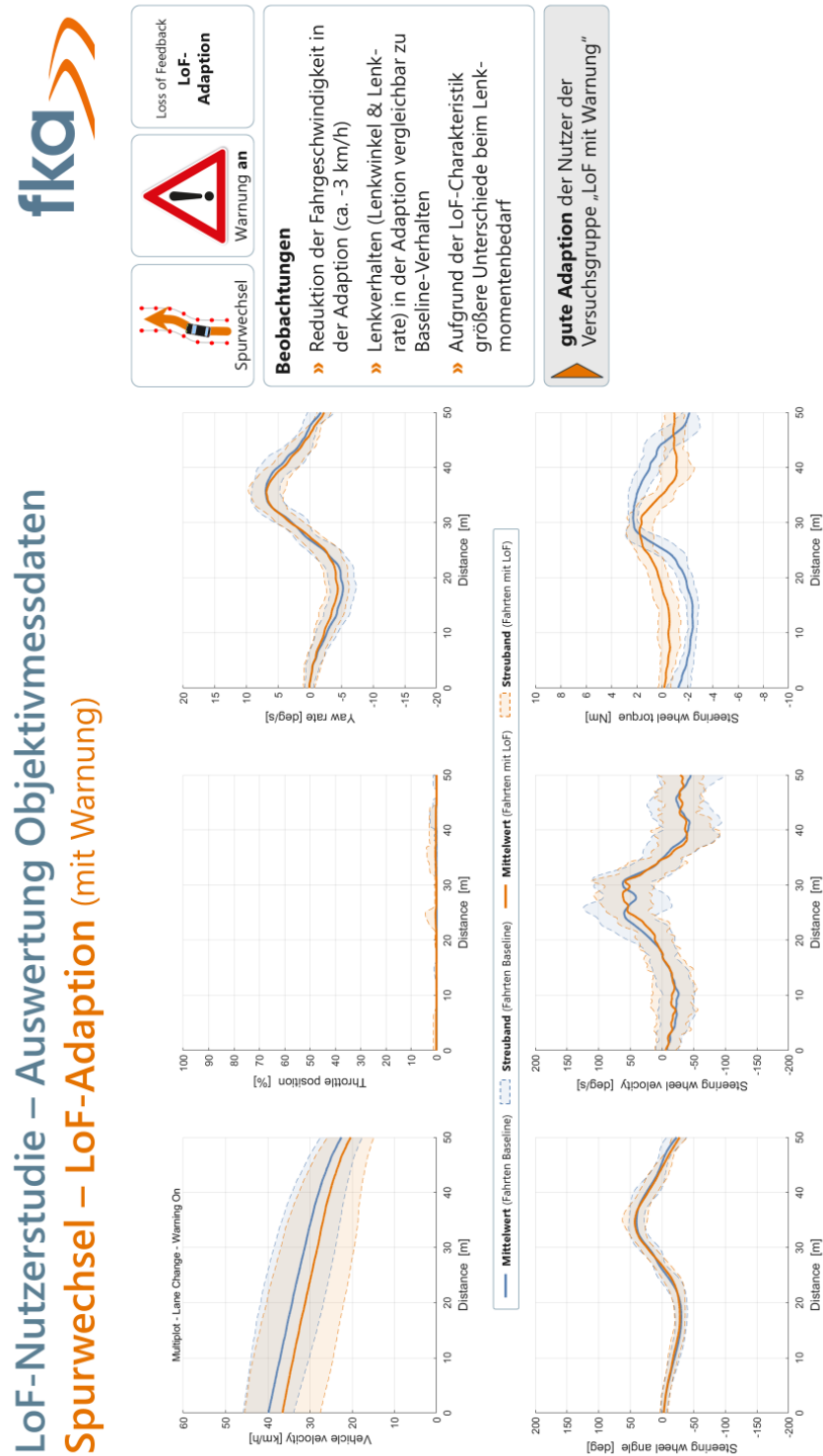


LoFko\_20250226\_Nutzerstudie // #245750

CREATING IDEAS &amp; DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 // 52

Abb. 6-23: LoF-Nutzerstudie – Boxplots für ermittelte Kennwerte – LoF-Adaption (Geradeausfahrt, Versuchsgruppen mit/ohne Warnung)



LoFko\_20250226\_Nutzerstudie // #245750

CREATING IDEAS &amp; DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 // 53

Abb. 6-24: LoF-Nutzerstudie – Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption (Spurwechsel, Versuchsgruppe „mit Warnung“)

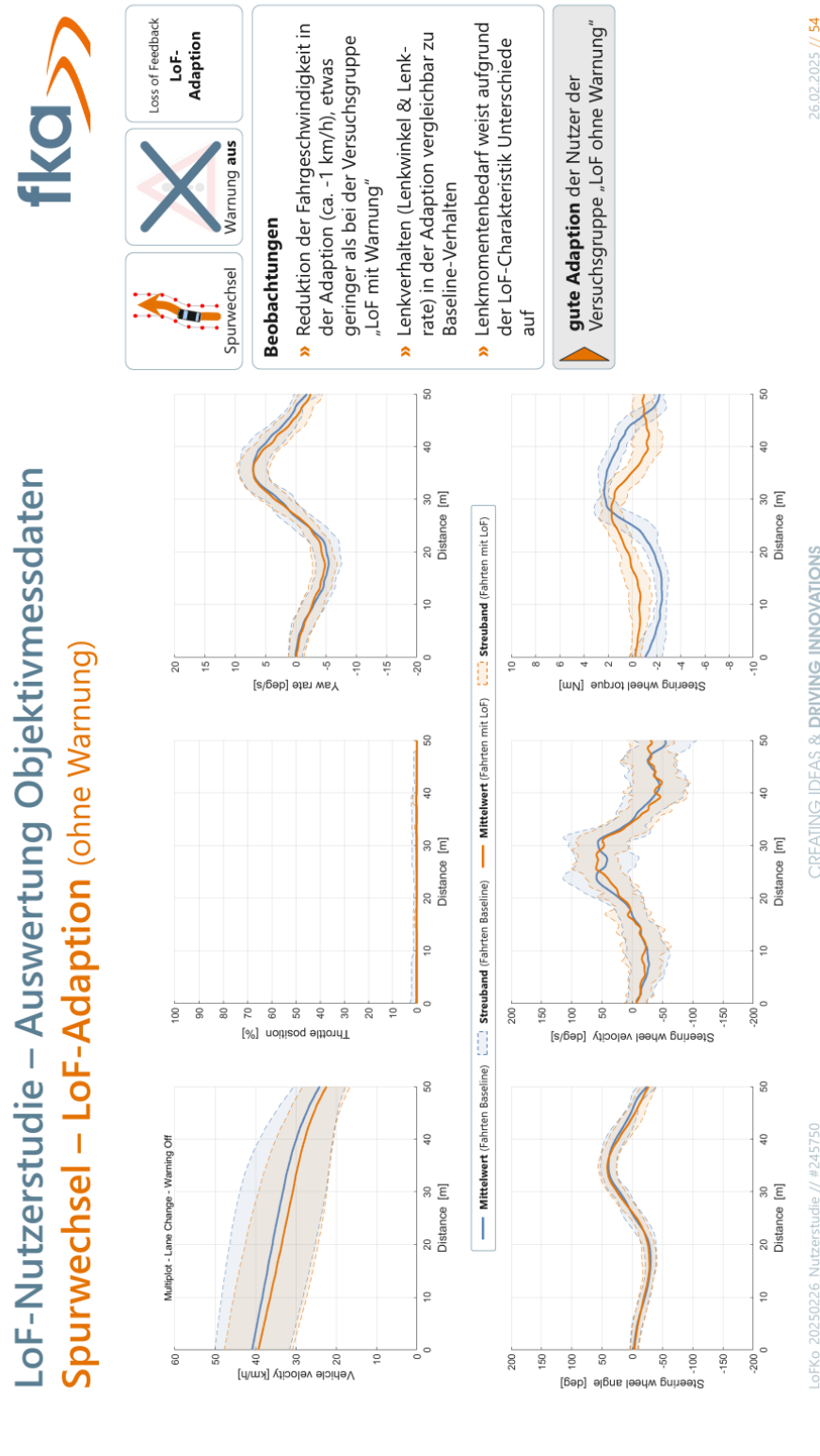
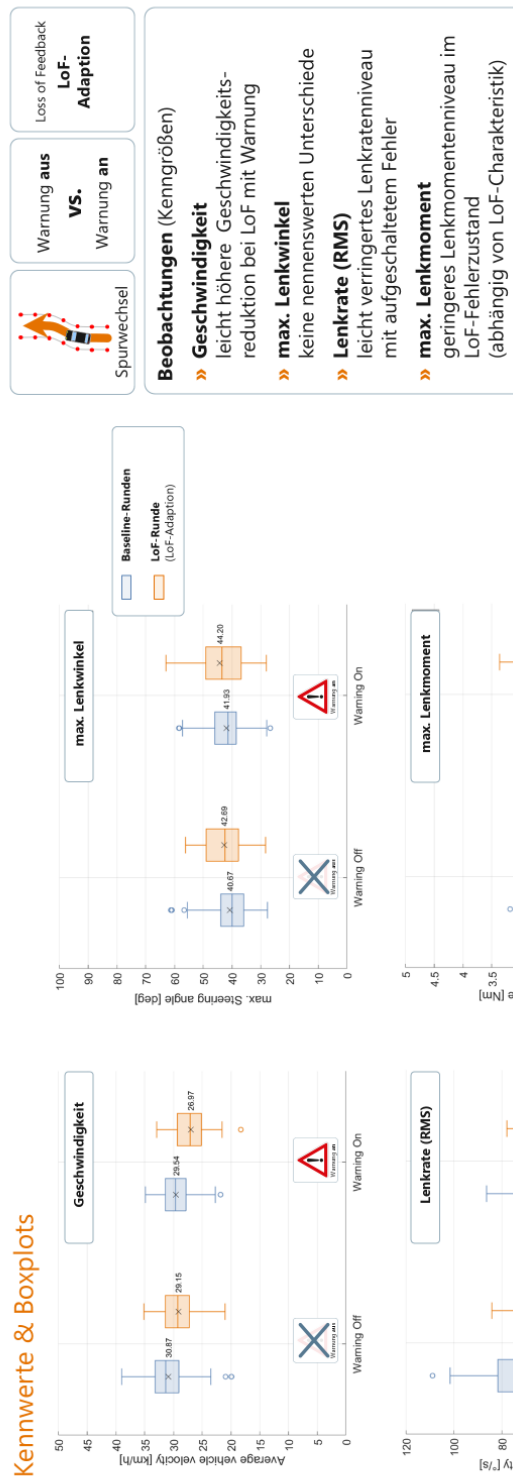


Abb. 6-25: LoF-Nutzerstudie – Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption (Spurwechsel, Versuchsgruppe „ohne Warnung“)

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten Spurwechsel – LoF-Adaption

### Kennwerte & Boxplots



LoFko\_20250226\_Nutzerstudie // #245750

CREATING IDEAS &amp; DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 // 55

Abb. 6-26: LoF-Nutzerstudie – Boxplots für ermittelte Kennwerte – LoF-Adaption (Spurwechsel, Versuchsgruppen mit/ohne Warnung)

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten

### Kreisverkehr – LoF-Adaption (mit Warnung)



Kreisverkehr

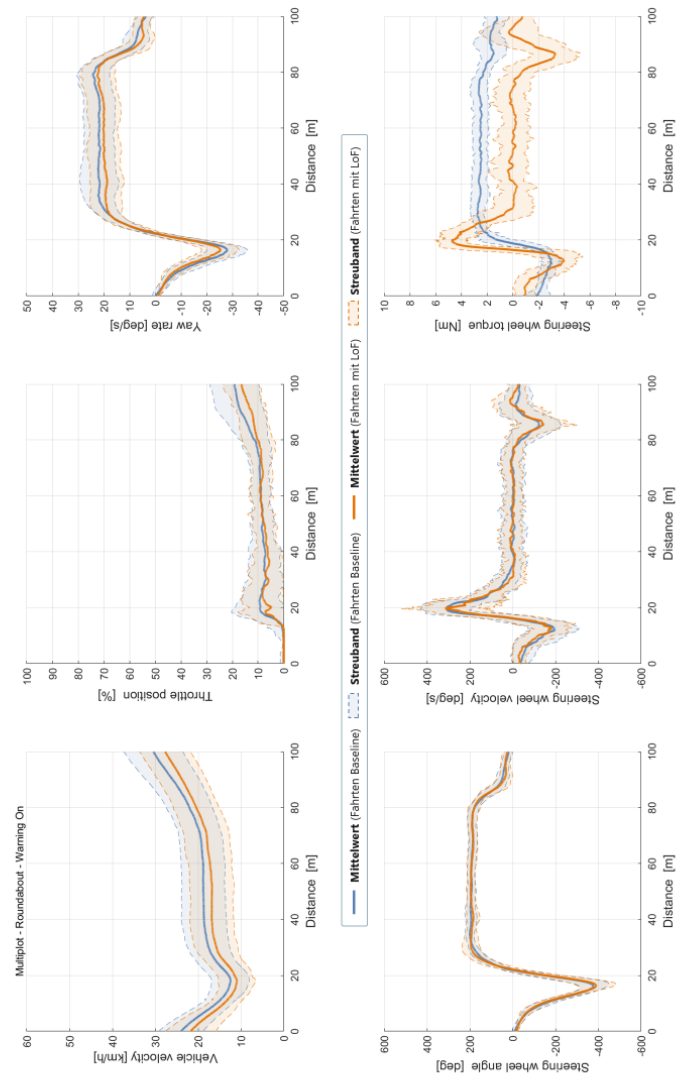
Warnung an

Loss of Feedback  
**LoF-Adaption**

**Beobachtungen**

- » Reduktion der Fahrgeschwindigkeit in der Adaption (ca. -1 km/h)
- » Lenkverhalten (Lenkwinkel & Lenkrate) in der Adaption vergleichbar zu Baseline-Verhalten
- » Lenkmomentenbedarf weist aufgrund der LoF-Charakteristik Unterschiede auf

**gute Adaption** der Nutzer der Versuchsgruppe „LoF ohne Warnung“



LoFko\_20250226\_Nutzerstudie // #245750

CREATING IDEAS &amp; DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 // 56

Abb. 6-27: LoF-Nutzerstudie – Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption (Kreisverkehr, Versuchsgruppe „mit Warnung“)

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten

### Kreisverkehr – LoF-Adaption (ohne Warnung)



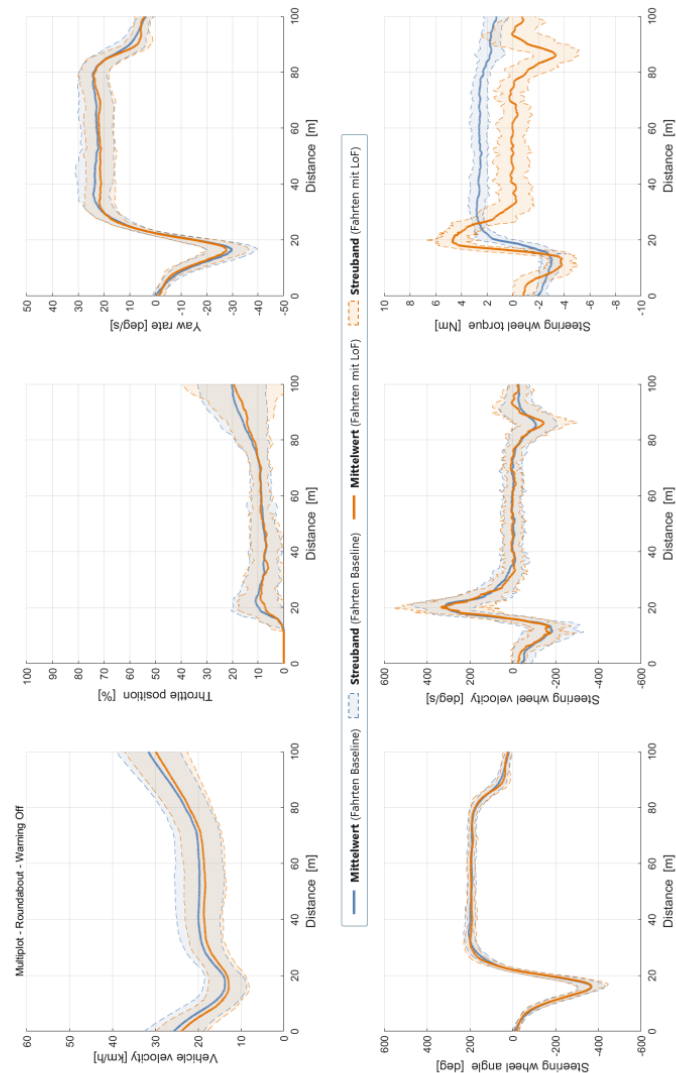
Kreisverkehr

Warnung aus

Loss of Feedback  
LoF-Adaption

**Beobachtungen**

- » Geschwindigkeitsniveau (auch Baseline) etwas höher als bei Versuchsgruppe „LoF mit Warnung“ (ca. +2 km/h)
- » Reduktion der Fahrgeschwindigkeit in der Adaption (ca. -1 km/h)
- » Lenkverhalten (Lenkwinkel & Lenkrate) in der Adaption vergleichbar zu Baseline-Verhalten
- » Lenkmomentenbedarf weist aufgrund der LoF-Charakteristik Unterschiede auf



LoFko\_20250226\_Nutzerstudie // #245750

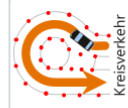
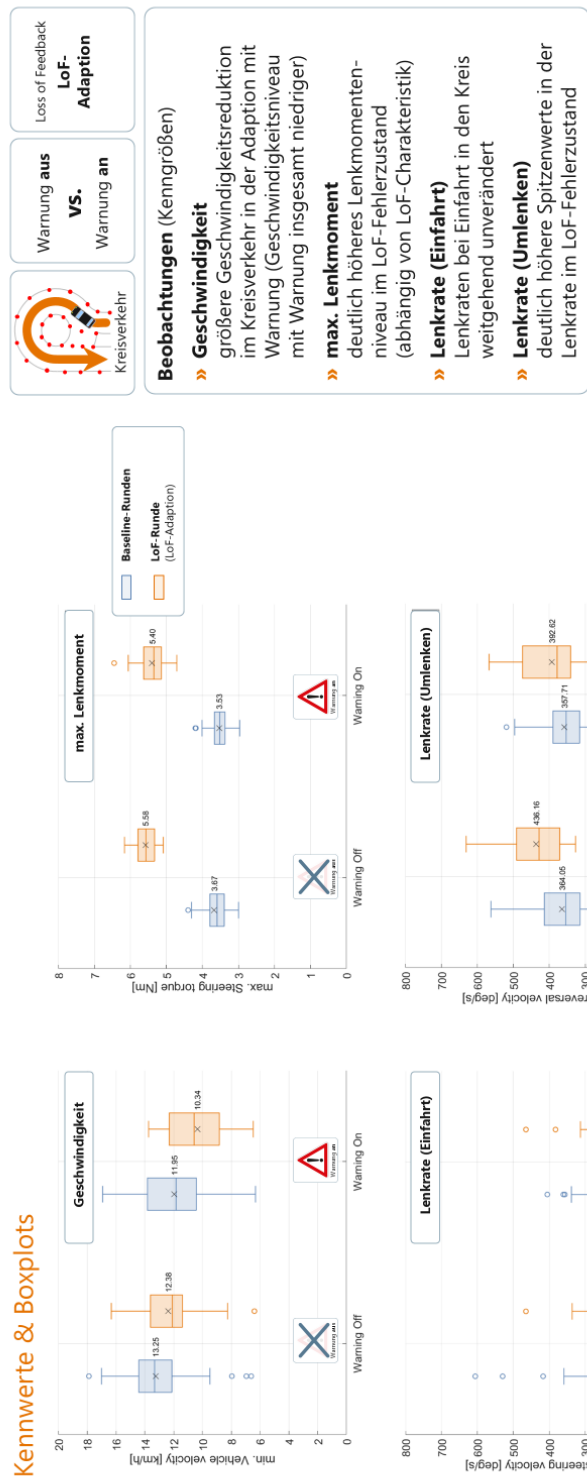
CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 // 57

Abb. 6-28: LoF-Nutzerstudie – Gemittelte Signalverläufe und Streubänder – LoF-Adaption (Kreisverkehr, Versuchsgruppe „ohne Warnung“)

## LoF-Nutzerstudie – Auswertung Objektivmessdaten Kreisverkehr – LoF-Adaption

### Kennwerte & Boxplots



Warnung aus  
vs.  
Warnung an

Loss of Feedback  
LoF-  
Adaption

Abb. 6-29: LoF-Nutzerstudie – Boxplots für ermittelte Kennwerte – LoF-Adaption (Kreisverkehr, Versuchsgruppen mit/ohne Warnung)

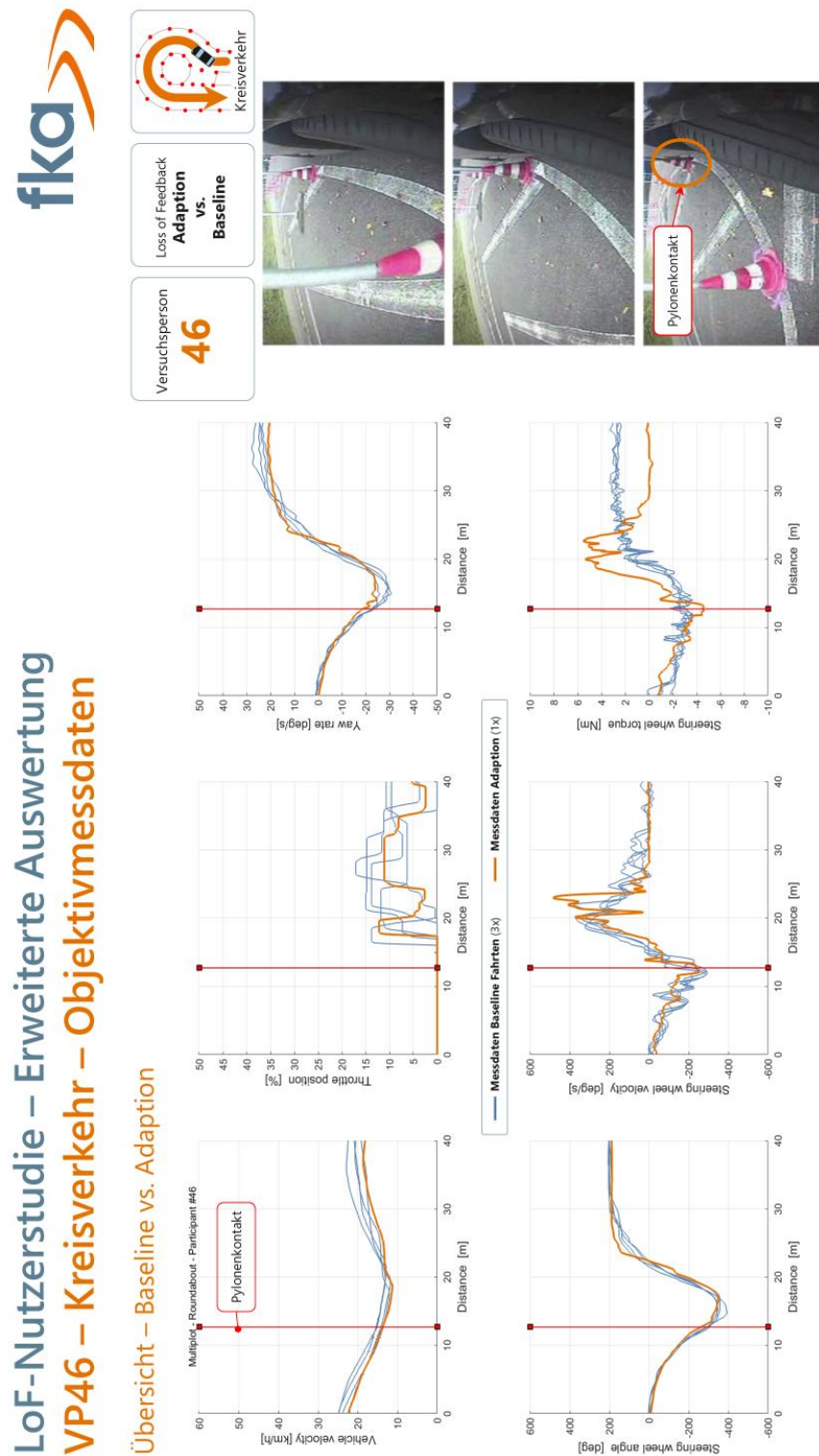
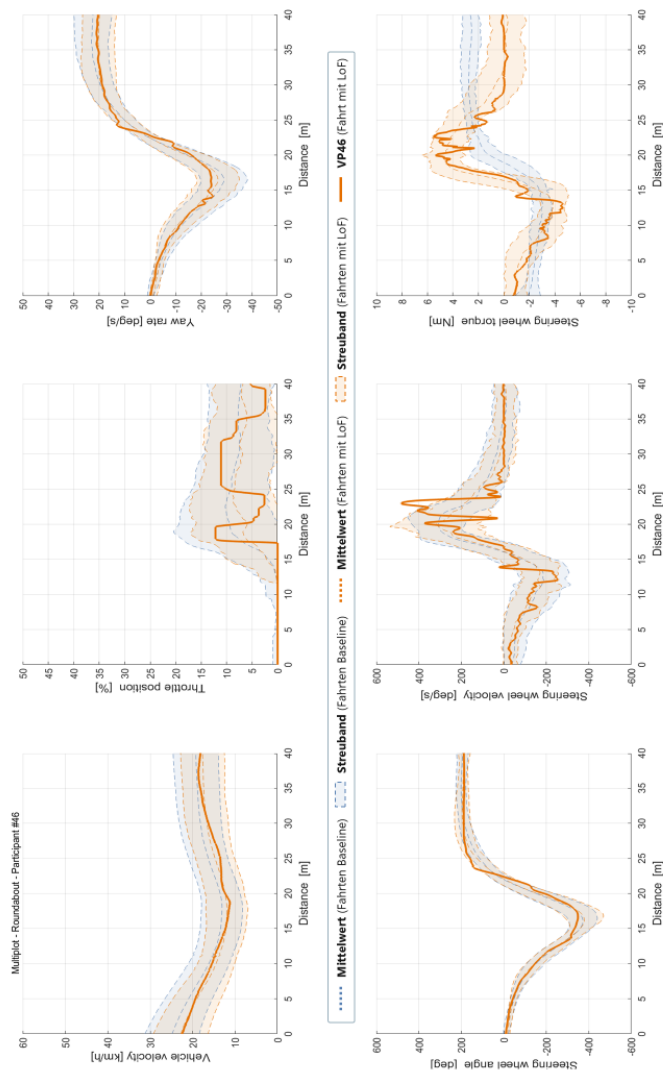
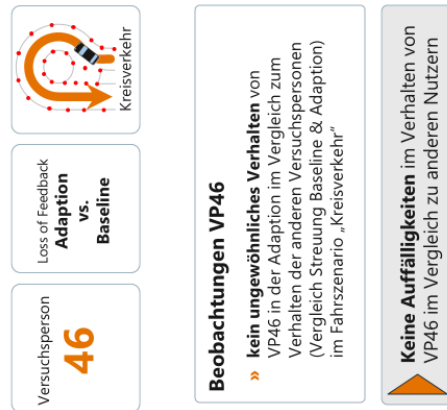


Abb. 6-30: LoF-Nutzerstudie – Erweiterte Auswertung –  
Vergleich Objektivdaten VP46 (Baseline vs. LoF-Adaption, Kreisverkehr)

## LoF-Nutzerstudie – Erweiterte Auswertung VP46 – Kreisverkehr – Objektivmessdaten

Vergleich VP46 vs. anderer Versuchspersonen (n = 55)



LoFo 20250226\_Nutzerstudie // #245750

CREATING IDEAS & DRIVING INNOVATIONS

26.02.2025 //118

Abb. 6-31: LoF-Nutzerstudie – Erweiterte Auswertung –  
Vergleich Objektivdaten VP46 zu den anderen Nutzern der Stichprobe  
(LoF-Adaption, Kreisverkehr)