

# Automatische Notbremssysteme für Motorräder

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 147

**bast**

# Automatische Notbremssysteme für Motorräder

von

Nora Leona Merkel  
Raphael Pleß  
Hermann Winner

Fachgebiet Fahrzeugtechnik  
TU Darmstadt

Thomas Hammer  
Norbert Schneider  
Sebastian Will

Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften  
Veitshöchheim

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Fahrzeugtechnik Heft F 147**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 82.0661**  
Automatische Notbremssysteme für Motorräder

### Fachbetreuung

Julia Bräutigam  
Patrick Seiniger

### Referat

Aktive Fahrzeugsicherheit und Fahrerassistenzsysteme

### Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

### Druck und Verlag

Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9307  
ISBN 978-3-95606-703-7

Bergisch Gladbach, September 2022

## Kurzfassung – Abstract

### Automatische Notbremssysteme für Motorräder

Motorradfahrer zählen zu den besonders gefährdeten Verkehrsteilnehmern. Trotzdem werden – im Gegensatz zu Systemen wie ABS und Traktionskontrolle – Assistenzsysteme wie die automatische Notbremse bislang nicht im Zweiradbereich eingesetzt. Grund hierfür ist unter anderem die motorrad-spezifische Fahrdynamik, die z. B. durch instabiles Systemverhalten besondere Herausforderungen für die Umsetzung solcher Systeme bietet.

Ziel des Projekts FE 82.0661/2015 „Automatische Notbremssysteme für Motorräder“ war es, die Grenzen zu ermitteln, innerhalb derer ein Einsatz entsprechender Systeme im Motorrad möglich ist. Neben den fahrdynamischen Grenzen zählen hierzu auch Grenzen, die der Fahrer der Anwendbarkeit setzt. Als integraler Bestandteil des Fahrer-Fahrzeug-Systems muss er in der Lage sein einen Eingriff eines Notbremssystems zu kontrollieren, da es sonst zur Destabilisierung des Fahrzeugs bis hin zum Sturz kommen kann.

Zunächst wurde in einer Expertenstudie untersucht, welche Verzögerungen Normalfahrern zugemutet werden können. Die Experten waren Fahrlehrer und -trainer, die besonders geeignet sind, die Fähigkeiten ungeübter Fahrer einzuschätzen. Mit der Erkenntnis, welche Verzögerungen Normalfahrern zuzumuten sind, wurde anschließend eine Probandenstudie durchgeführt, in der untersucht wurde, inwiefern verschiedene Arten von Eingriffen geeignet sind, den Fahrer in einer Notbremssituation zu unterstützen und welche Verbesserung damit im Vergleich zu durch den Fahrer selbst durchgeführten Notbremsmanövern erzielt wird.

Die Realfahrversuche mit Probanden fanden ausschließlich in Geradeausfahrt mit voller Konzentration auf die Fahraufgabe statt. Um zu untersuchen, wie sich Notbremsmanöver in anderen Situationen (z. B. ein- oder freihändige Fahrt) auswirken, wurde zusätzlich eine Studie auf dem dynamischen Motorrad-Fahrsimulator des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften durchgeführt (WIVW). Hier wurde zudem der Einfluss von Warnelementen untersucht.

Die Studien zeigen, dass durch den Einsatz geeigneter automatischer Bremsengriffe bereits nahezu die Hälfte der Ausgangsgeschwindigkeit abgebaut werden kann, bevor der Fahrer selbst überhaupt eingreift. Die Simulatorversuche zeigen außerdem, dass eine Warnung vor dem automatischen Bremsengriff die Fahrerreaktion positiv beeinflusst.

### Autonomous emergency braking for motorcycles

Motorcycle riders are part of the group of vulnerable road users. However – in contrast to systems such as ABS and traction control – assistance systems such as autonomous emergency braking have not yet been introduced in powered two-wheelers. One of the reasons for this is the one-track vehicle specific riding dynamics such as, e.g., the unstable behavior of the system.

The aim of the project FE 82.0661/2015 “Autonomous emergency braking for motorcycles” was to determine the limits of the applicability of such systems. Besides the physical limits, it is also necessary to consider the limits determined by the rider capabilities. The rider is an integral part of the unstable rider-vehicle-system and needs to be able to control the intervention of an emergency braking system as otherwise destabilization or even a fall can occur.

First, an expert study was performed to determine which decelerations are acceptable for average riders. The experts were riding teachers and instructors who are used to assess the abilities of unexperienced riders. With the knowledge on which decelerations are applicable, a participant study was performed. The aim of this study was to evaluate to what extent different kinds of autonomous braking interventions are suitable to help the rider in an emergency braking situation and which improvements they offer compared to emergency braking maneuvers performed by the rider.

Due to safety reasons, the riding studies with participants are only performed while going straight ahead and with full concentration on the riding task. To investigate the consequences of autonomous emergency braking maneuvers in more critical

situations (e.g. one-hand or free-hand riding), additional studies are performed on the dynamic motorcycle riding simulator at the Würzburg Institute for Traffic Sciences (WIVW). Additionally, the influence of warning elements was evaluated.

The studies showed that with suitable autonomous braking interventions, the initial speed can almost be reduced to half before the rider even starts to apply the brakes. The simulator experiments showed that warning elements can have a positive influence on the rider reaction.

## Summary

### Autonomous emergency braking for motorcycles

Motorcycle riders are part of the group of vulnerable road users. In contrast to systems like ABS and traction control, assistance systems like autonomous emergency braking (AEB) have not yet been introduced in powered two-wheelers. One of the reasons for this is the one-track vehicle specific riding dynamics like e.g. the unstable behavior of the system, especially at low speeds or the cornering behavior at roll angles. The aim of the project FE 82.0661/2015 “Autonomous emergency braking for motorcycles” is to determine the limits of the applicability of such systems.

In previous research projects important aspects of AEB have already been discussed. As an example, project “PISa” (Powered Two-Wheeler Integrated Safety, 2006 to 2010), which was funded by the EU, investigated how braking interventions with and without warnings influence the stability of a motorcycle rider on his vehicle (SYMEONIDIS et al. 2012). It was shown that automatic braking interventions with  $3 \text{ m/s}^2$  are feasible for riders without getting the feeling of losing control (SAVINO et al. 2010). Within the “MOTORIST” project (Motorcycle Rider Integrated Safety), which ended in 2018, the usual behavior of riders in different braking situations was investigated (GIORGI u. PIERINI 2014). This kind of research is important to develop a base line for the design of automatic brake applications.

The contents of the previous work are important aspects for the development and design of autonomous emergency braking systems for motorcycles. In particular, it has been shown that decelerations in low ranges up to  $3 \text{ m/s}^2$  are controllable for motorcycle riders and do not negatively affect the rider’s stability in his position on the motorcycle. However, while working on the project, the authors are not aware of any work to determine the limits of the maximum deceleration that is acceptable for unprepared riders to be able to maintain a stable state of the motorcycle, so that controllability of the vehicle is still ensured.

Within the framework of the project FE 82.0661/2015 these limits are to be investigated. In addition to the physical limits, these include in particular limits that the rider sets to the applicability. As an integral part

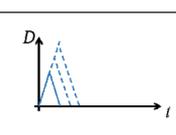
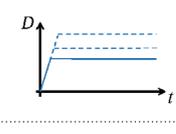
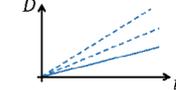
of the rider-vehicle-system, the rider must be able to control the intervention of an emergency braking system. Otherwise, it could destabilize the vehicle and even cause a fall.

The approach in the project is based on the assumption that the rider must be in a ready-for-braking state to be able to control an automatic braking intervention. In order to bring him into this state and at the same time being able to achieve a reduction of speed before reaching the braking readiness, preparatory partial braking maneuvers are used. These partial braking interventions are the main content of the investigations. There are three braking profiles that can be considered as preparatory braking maneuvers:

- block braking, where the target deceleration is built up quickly and then is kept at the required level
- deceleration ramp, where the deceleration is built up slowly
- braking impulse, where the deceleration is only is short to ‘wake up’ the rider

For the various profiles, it is necessary to examine how high the decelerations or deceleration gradients may be without overstraining an unprepared rider who is surprised by an automatic braking intervention. Table 1 shows the various intervention profiles including the parameters to be varied. For safety reasons, it is not possible to approach the controllability limits in a participant study. Therefore, the experiments are split up into a three-part study.

First, an expert study is carried out to determine which decelerations average riders can handle. The experts are riding instructors and trainers who are

Braking profiles	Varied parameters	
Braking impulse	Level of deceleration	
Block braking	Level of deceleration	
Deceleration ramp	Gradient	

Tab. 1: Investigated intervention profiles

particularly suitable to assessing the skills of unexperienced riders. The experts are decelerated by remote control while driving straight ahead and then they give a rating as to whether the respective braking intervention is reasonable for an average unprepared rider without impairing the controllability of the situation. If the assessment is positive, the deceleration or the deceleration gradient is increased for the next braking maneuver until the braking intervention is classified as no longer acceptable. The determined parameters for the three braking profiles are shown in table 2.

With the knowledge of which decelerations are acceptable for average riders, a participant study is carried out in the second part of this project. In this study it is examined to what extent the braking profiles determined by experts are suitable to assist the rider in an emergency braking situation and which increase in safety this offers compared to the rider himself carrying out an emergency braking maneuver.

During the experiments, the test persons ride a motorcycle equipped with measuring technology at a time to collision (TTC = 1.5 s) following the dummy target EVITA (figure 1). EVITA is a measurement tool used to simulate approaching scenarios without exposing the participant to a real collision risk (FECHER et al. 2015). At an appropriate point, the dummy target is decelerated. At the same time a

Braking profile	Varied parameter	Determined maximum
Block braking	Deceleration	5 m/s <sup>2</sup>
Deceleration ramp	Deceleration gradient	9.1 m/s <sup>3</sup>
Braking pulse	Deceleration	4.7 m/s <sup>2</sup>

Tab. 2: Acceptability of the braking profiles at 70 km/h



Fig. 1: Participant study with EVITA

remote-controlled braking intervention is applied to the motorcycle. EVITA serves merely to make the automatic braking intervention plausible for the rider, since an intervention without a preceding braking vehicle would be equivalent to testing false positive interventions.

For all braking interventions, one of the braking profiles previously parameterized in the expert study is used. In addition, some EVITA releases are performed without automatic braking interventions to have a reference to how quickly the rider himself applies the brake.

In order to assess the effectiveness of the individual braking interventions, it is examined how quickly the rider is brought to the ready-for-braking state by the automatic intervention. The time required for this is referred to as transition time. The transition is considered complete when only relatively few relative movements between the vehicle and the rider's upper body occur. The better the rider is connected to the vehicle, the closer the ratio of the rider's body acceleration to the vehicle acceleration moves to one. The transition is defined as completed as soon as neither of the two accelerations exceeds the other by a factor of more than 1.5. Table 3 shows the determined transition periods.

The results show, that all investigated braking profiles show a beneficial effect compared to the rider induced (reference) braking maneuvers. The block profile enables the shortest transition at 0,72 s and allows for the biggest velocity reduction before the transition is completed. Thus, the block profile is the most effective preparatory partial braking profile in terms of transition and shows the biggest efficiency.

In addition to the objective evaluation, the riders have been surveyed about their subjective perceptions of an AEB intervention. According to the NEUKUM scale for evaluating criticality (NEUKUM et al. 2008) the braking is first categorized

Profile	Mean transition time in s	Velocity reduction in m/s
Block	0.72	2.05
Ramp	0.82	0.83
Pulse	1.37	0.42
Reference	1.66	0.14

Tab. 3: Transition times for the different braking profiles

incontrollable	10
dangerous	9
	8
uncomfortable	7
	6
	5
harmless	4
	3
	2
not noticed	1
	0

Fig. 2: Scale for evaluating criticality (NEUKUM et al. 2008)

roughly with a five score verbal scale (figure 2, left) and afterwards in a fine grade numerical scale (figure 2:, right)

The self applied (reference) braking resulted in the least critical rating (mean 1.5). Amongst the automatically applied brakings, the block profile (mean 2.5) was rated less critical than the ramp profile (3.25), while the impulse profile received a rating close to 'uncomfortable' (3.5).

The riding studies show, that the block profile is the most effective and efficient of the investigated profiles while receiving the least critical subjected ratings as well. Thus, the block profile seems most promising for preparatory partial braking in future releases of motorcycle AEB systems.

The real-life studies with standard riders were performed in riding straight ahead with full concentration on the riding task. In order to investigate the impact of secondary tasks on the AEB performance (e.g. one- or freehanded riding), a second study is performed on a dynamic motorcycle riding simulator of the Würzburg Institute for Traffic Sciences (figure 3).

Different secondary tasks were given to the participants. They were used to distract the rider from his primary riding task and could sometimes only be solved by riding one- or freehanded. Whilst the execution of these secondary tasks, an automatic brake application is triggered. The simulator studies show, that even with rather critical scenarios including e.g. distraction and free handed riding, no loss of controllability in terms of falls can



Fig. 3: DESMORI Motorcycle Simulator

be provoked. However, it becomes apparent that – especially when riding one handed – the lateral dynamics of the motorcycle is negatively influenced.

Comparative experiments on the simulator with and without warning precedent to the brake triggering distinctively show improved performance of AEB regarding its efficiency when a warning is applied. Also, the subjective ratings of the experimentees improve after receiving precedent warnings.

In a conclusion, the studies could prove that preparatory partial braking in advance to a full emergency braking provide an increase in safety in relevant emergency situations. Among the investigated profiles, the block profile was the most promising. Ideally, AEB should warn the rider in advance to a brake triggering. The acceptance of AEB was highly rated as well in real life as in simulator studies.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	11	3.4.1	Messfahrzeug .....	29
1.1	Motivation und Projektziel .....	11	3.4.2	EVITA .....	31
1.2	Stand der Forschung .....	11	3.4.3	Gesamtsystem .....	32
1.2.1	Grundlagen .....	11	3.4.4	Simulator .....	32
1.2.2	Physikalische Grenzen .....	13	<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	34
1.2.3	Projektumfeld .....	14	4.1	Expertenstudie .....	34
1.3	Einordnung des Projekts .....	15	4.1.1	Kontrollierbarkeit für Normalfahrer . . . .	34
1.3.1	Kernfrage .....	15	4.1.2	Parametrierung Probandenstudie . . . .	38
1.3.2	Betrachtete Fälle .....	16	4.1.3	Geschwindigkeitsvariation .....	38
1.3.3	Untersuchungsschwerpunkte .....	16	4.1.4	Kurvenfahrt .....	40
1.4	Potenzial .....	17	4.2	Probandenstudie Realfahrt .....	41
1.5	Referenz .....	18	4.2.1	Messdatenauswertung Probandenstudie .....	42
1.5.1	Ideale Bremsung .....	18	4.2.2	Subjektivbewertung .....	47
1.5.2	Reales Bremsverhalten von Motorradfahrern .....	19	4.2.3	Fragebogenauswertung .....	47
1.5.3	Referenz für Fahrversuch .....	20	4.2.4	Zusammenfassung Probandenstudie Realfahrt .....	48
<b>2</b>	<b>Methodik</b> .....	20	4.3	Probandenstudie Simulator .....	49
2.1	Transition .....	20	4.3.1	Fahrdaten .....	49
2.2	Kriterien .....	20	4.3.2	Subjektivbewertung .....	54
2.2.1	Objektive Kriterien .....	20	4.3.3	Zusammenfassung Simulatorstudie . . .	58
2.2.2	Subjektive Kriterien .....	21	<b>5</b>	<b>Fazit und Ausblick</b> .....	58
<b>3</b>	<b>Versuchsdesign</b> .....	22	<b>Literatur</b> .....	60	
3.1	Expertenstudie .....	23	<b>Tabellen</b> .....	62	
3.1.1	Zumutbarkeit von Verzögerungen . . . .	23	<b>Bilder</b> .....	63	
3.1.2	Geschwindigkeitseinfluss .....	24			
3.1.3	Kurvenfahrt .....	24			
3.2	Probandenstudie Realfahrt .....	25			
3.2.1	Szenario im Fahrversuch .....	25			
3.2.2	Ablauf des Fahrversuchs .....	26			
3.3	Probandenstudie Simulator .....	26			
3.3.1	Ablenkung .....	27			
3.3.2	Versuchsplan .....	28			
3.3.3	Messinstrumente und Auswertung . . . .	28			
3.4	Messwerkzeuge .....	29			

Die Anhänge A1 – A5 zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Projektziel

Die Anzahl der Verkehrstoten in Deutschland folgt einem rückläufigen Trend. Bei Betrachtung der Statistik fällt jedoch auf, dass der Rückgang bei getöteten Zweiradfahrern im Verhältnis zu Pkw-Insassen deutlich geringer ausfällt (siehe Bild 1-1). Daraus folgt, dass der Anteil der der Zweiradfahrer an der Gesamtzahl der getöteten Verkehrsteilnehmer steigt. Während 1991 noch 11 % der Verkehrstoten Zweiradfahrer waren, ist der Anteil bis 2015 auf 20 % angestiegen (Statistisches Bundesamt 2016).

Im Pkw-Bereich kommen bereits seit vielen Jahren Assistenzsysteme zum Einsatz, die zum Ziel haben, die Sicherheit zu verbessern. Beispielhaft sei hier die Elektronische Stabilitätskontrolle (ESC, Electronic Stability Control) genannt, die mittlerweile verpflichtend für neu zugelassene Fahrzeuge ist. Aber auch weitere Systeme, wie automatische Notbremsysteme oder ACC (Abstandsregeltempomat) werden vermehrt eingesetzt. Eine Untersuchung der Unfallforschung des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft (UDV) zeigt, dass der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen (FAS) sich positiv auf die Entwicklung von Sach- und Personenschäden auswirkt (HUMMEL 2011).

Im Zweiradbereich fällt der Einsatz von Assistenzsystemen deutlich geringer aus. Die Ausrüstung neu zugelassener Fahrzeuge mit ABS ist seit 2017 gesetzlich vorgeschrieben (EU-Verordnung 168/2013: Europäisches Parlament 2013). Auch Systeme wie Traktionskontrolle und Hinterrad-Abhebekontrolle werden zunehmend eingesetzt. Dennoch befindet sich die Entwicklung weiterer Assistenz-

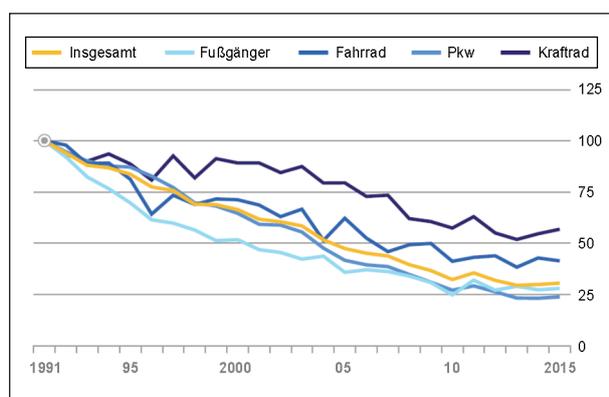


Bild 1-1: Verkehrstote in Deutschland nach Verkehrsbeteiligung von 1991 bis 2015 (1991 = 100 %) (Quelle: Statistisches Bundesamt (2016)).

systeme in einem sehr frühen Stadium. Dieser Rückstand ist vor allem darin begründet, dass sich durch die einspurfahrzeugspezifische Fahrdynamik im Vergleich zum Zweispurfahrzeug deutlich größere Herausforderungen ergeben. Es handelt sich beim Zweirad um ein grundsätzlich instabiles System, das insbesondere im Niedriggeschwindigkeitsbereich durch den Aufsassen stabilisiert werden muss. Der Aufsasse besitzt mit bis zu 1/2 der Gesamtsystemmasse auch einen wesentlich höheren Einfluss auf die Fahrdynamik, beispielsweise durch Verlagerung seines Schwerpunkts. Eine weitere Herausforderung besteht im Fahrzeugverhalten unter Rollwinkel bei Kurvenfahrt. Beispielhaft seien hier Effekte wie das Bremslenkmoment und die enge Kopplung zwischen Lenkeingaben und Rollbewegung genannt. Aus den genannten Punkten ergibt sich, dass der Aufsasse eines Zweirads bei der Auslegung eines Assistenzsystems nicht außer Acht gelassen werden kann. Ein Eingriff kann nicht unabhängig vom Fahrer erfolgen, er muss vielmehr so gestaltet sein, dass der Fahrer weiterhin seiner Stabilisierungsaufgabe nachkommen kann und nicht zu einer unerwünschten Reaktion angeregt wird, die ggf. das Fahrzeug destabilisieren kann.<sup>1</sup>

Ziel des Projekts ist es, Fahrdynamikbereiche zu identifizieren, in denen weitgehend gefahrlos automatische Bremsengriffe erfolgen können. Gegebenenfalls sind außerdem die in den einzelnen Bereichen anwendbaren Verzögerungshöhen zu untersuchen. Anschließend soll eine Potenzialabschätzung erfolgen, die eine Aussage über die Reduktion der Motorradunfallzahlen durch entsprechende Bremssysteme zulässt (BASt 2016).

## 1.2 Stand der Forschung

### 1.2.1 Grundlagen

Unfälle im Längsverkehr zählen zur größten Gruppe der Unfallarten (WINNER 2015: S. 894). Motorradfahrer zählen zudem zu den stark gefährdeten Verkehrsteilnehmern und ihre Unfälle enden nicht selten tödlich. Bei Betrachtung der tödlich endenden Unfälle mit mehreren beteiligten Verkehrsteilnehmern, bei denen die Hauptschuld beim Motor-

<sup>1</sup> Text bis hierher übernommen aus Beitrag zur Konferenz des Instituts für Zweiradsicherheit am 01./02.10.2018 in Köln: (MERKEL et al. (2018)).

radfahrer liegt, stellt sich heraus, dass viele der Getöteten auf Zusammenstöße zurückzuführen sind. Solchen Unfällen wird im Automobilbereich mit automatischen Notbremsystemen (engl.: autonomous emergency braking [systems], AEB) begegnet.

Automatische Notbremsysteme stellen eine Unterart der Frontkollisionsassistenzsysteme (FVCX – Forward Vehicle Collision [Assistance System], (ISO 2002, 2013)) dar. Dazu zählen Systeme zur Frontkollisionsvorbereitung, Frontkollisionswarnung, Frontkollisionsschwereminderung sowie Frontkollisionsverhinderung.

Je nach Systemauslegung können AEB den FVCM oder FVCA zugeordnet werden (Tabelle 1-1). Der Leistungsbeschreibung des Projekts (BASt 2016) entsprechend werden im Rahmen des Projekts zudem warnende Systeme (FVCW) als Untergruppe der Notbremsysteme betrachtet.

Alle genannten Systeme verfolgen das gemeinsame Ziel, die Effektivität einer folgenden Bremsung zu erhöhen, sobald die Notwendigkeit einer Notbremsung eindeutig detektiert ist. Das kann durch verschiedene Maßnahmen, wie z. B. Verkürzen der Reaktionszeit des Fahrers (z. B. durch Warnung), Verstärken des vom Fahrer aufgetragenen Bremsdrucks bis hin zu einem autonomen Bremsengriff, erfolgen. Dabei ist es zunächst unerheblich, ob die Gefahr durch den Fahrer selbst oder aber durch geeignete Sensorik erkannt wird und ob eine Betätigung der Bremse vollständig, nur zum Teil oder gar nicht durch den Fahrer erfolgt. Unabhängig vom Fahrzeugtyp gilt als „Voraussetzung für das Durchführen des Notbremsvorgangs [...] zum einen die Ausstattung [des Fahrzeugs] mit einem Notbremsystem, zum andern das Erkennen einer Gefährdungssituation.“ (FREIENSTEIN 2013). Das vorliegende Projekt konzentriert sich dabei weniger auf die Funktionsweise der Systemkomponenten, son-

dern verfolgt vielmehr das Ziel, die Anwendungsgrenzen eines hypothetischen AEB-Systems zu ermitteln, das eine maximale Schutzwirkung ermöglicht.

**Bewertung der Schutzwirkung von AEB**

Die Effektivität und Effizienz von AEB kann, wie auch bei anderen der Sicherheit dienenden FAS, prinzipiell durch verschiedene Methoden ermittelt werden (KÜHN u. HANNAWALD 2015):

- Retrospektiver Vergleich:
  - z. B. Vergleich von Unfallzahlen von Fahrzeugen mit Assistenzsystem gegenüber solchen ohne entsprechendes System.
- „Was wäre wenn...“
  - Gestützt durch Berechnungen oder Simulationen werden real aufgetretene Unfallszenarien nachgestellt und ermittelt, welchen Einfluss das FAS auf das Unfallgeschehen gehabt hätte.
- FOT (Field Operational Test)
  - Hauptsächlich zur Potenzialanalyse neuer Technologien wird ein Versuchsfahrzeug mit Messsystemen ausgestattet und anhand geeigneter Datenauswertungen ein Schutzzpotenzial ermittelt.

Ein retrospektiver Vergleich für die Bewertung von AEB im Motorrad kommt nicht in Frage, da aufgrund der nicht vorhandenen Verbreitung des Systems im Straßenverkehr keine entsprechende Datenbasis vorhanden ist.

Auch der FOT kann nur in eingeschränktem Maße angewendet werden, da im Rahmen des Projekts kein voll funktionsfähiges Gesamtsystem in Betrieb genommen wird. Fahrversuche (Real- und Simulatorfahrt) sind lediglich als Mittel zur Bestimmung z. B. fahrdynamischer Grenzwerte vorgesehen.

FVC	Forward vehicle collision	Frontkollision
FVCX		Obermenge der Frontkollisionsassistenzsysteme
FVCC	Forward vehicle collision conditioning	Frontkollisionsvorbereitung
FVCW	Forward vehicle collision warning	Frontkollisionwarnung
FVCM	Forward vehicle collision mitigation	Frontkollisionsschwereminderung
FVCA	Forward vehicle collision avoidance	Frontkollisionsverhinderung

Tab. 1-1: Frontkollisionsassistenzsysteme nach (RESCHKA et al. 2015: S. 915)

Mit den Erkenntnissen aus Fahrversuchen wird anschließend die „Was wäre wenn...“-Methode angewendet (wie bspw. auch in (GEORGI et al. 2009; EDWARDS et al. 2014; SAVINO et al. 2014)). Es kann beispielsweise ermittelt werden, inwiefern ein System innerhalb der im Fahrversuch ermittelten Grenzen dazu geeignet wäre, Kollisionen zu verhindern, oder Kollisionsgeschwindigkeiten zu reduzieren.

### Besondere Herausforderungen im Motorradsektor

AEB finden bislang lediglich im Bereich der Zweispurfahrzeuge kommerzielle Anwendung. Zwar ist eine Adaptierbarkeit der benötigten Hardware (sowohl auf Sensor- als auch auf Aktorseite) in Einspurfahrzeuge grundsätzlich denkbar, durch fahrdynamische Besonderheiten bestehen für die Nutzbarkeit von AEB jedoch einige spezifische Herausforderungen (SAVINO et al. 2015; SAVINO et al. 2016):

- Instabilität des Fahrer-Fahrzeug-Systems, insbesondere bei Niedriggeschwindigkeit
- Großer Einfluss des Fahrers auf die Fahrdynamik (bis über 1/3 der Gesamtsystemmasse)
- Möglichkeit der Destabilisierung des Fahrzeuges bei falscher Fahrerreaktion
- Systemverhalten unter Rollwinkel (z. B. Bremslenkmoment, Lenk-Roll-Kopplung)
- Überschlagsrisiko bei starken Verzögerungen

Eine direkte Übertragung vorhandener Systeme aus dem Pkw-Bereich kommt also nicht in Frage. Trotz der genannten Herausforderungen wird jedoch ein erhebliches Unfallschutzpotenzial durch die Nutzung von AEB im Motorrad erwartet (vgl. (ROLL et al. 2009; DEKRA 2010)).

#### 1.2.2 Physikalische Grenzen

Die Herleitung der physikalischen Grenzen einer (Kurven-)Bremsung im Motorrad werden in der Literatur umfassend beschrieben (SCHRÖTER et al. 2013; SCHRÖTER et al. 2015). Sie sind hauptsächlich auf zwei Effekte zurückzuführen: Die Überschreitung der Schlupfgrenzen und die Überschlagsneigung von Motorrädern.

### Schlupfgrenze

Die über den Reifen auf die Fahrbahn übertragbare Kraft  $F_{\max}$  wird durch den Reibwert  $\mu$  zwischen Reifen und Fahrbahn bestimmt. Die insgesamt übertragbare Kraft berechnet sich also nach

$$F_{\max} = \mu \cdot F_N,$$

wobei  $F_N$  die Normalkraft darstellt. Davon ausgehend, dass es sich bei der Normalkraft um die Gewichtskraft handelt, ergibt sich also

$$m \cdot a_{\max} = \mu \cdot m \cdot g$$

mit der maximalen Gesamtbeschleunigung

$$a_{\max} = \mu \cdot g.$$

Die Gesamtbeschleunigung setzt sich dabei aus der Längsbeschleunigung  $a_x$  und der Querb beschleunigung  $a_y$  zusammen:

$$a_{\max} = \mu \cdot g = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$

Bei Geradeausfahrt ist also eine maximale Beschleunigung oder Verzögerung von  $a_{\max}$  möglich. Wird durch Querb beschleunigungen Kraftübertragung in Querrichtung nötig, verringert sich das Längsbeschleunigungs-/verzögerungspotenzial und umgekehrt. Wird bei einem Ausweichmanöver der Rollwinkel  $\varphi_{\text{serve}}$  erreicht, verringert sich das Längsbeschleunigungspotenzial. Der Zusammenhang ist in Bild 1-2 dargestellt.

Die Überschreitung der Schlupfgrenzen unter Rollwinkel kann durch geeignete Regeleinriffe moderner Bremssysteme (sog. Kurven-ABS) vermieden werden. Im vorliegenden Projekt wird davon ausgegangen, dass ein potenzielles Notbremssystem mit einem entsprechenden Bremssystem mit Kurven-ABS ausgestattet ist, weshalb auf rollwinkelbeding-

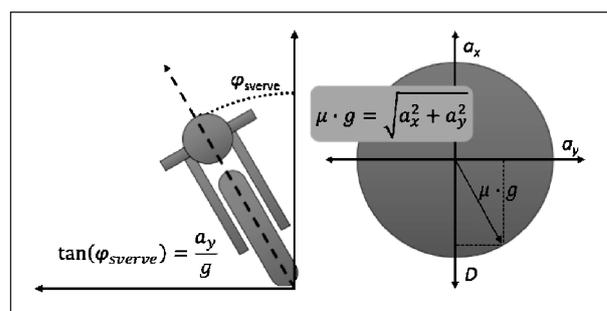


Bild 1-2: Beschleunigungspotenzial

te Einschränkung von Notbremsungen in Kurvenfahrt nicht weiter eingegangen wird. Die Betrachtung der Kurvenfahrt betrifft lediglich die Kontrollierbarkeit durch den Fahrer, der gegebenenfalls von einem Eingriff überrascht wird.

### Überschlagsneigung

Im Verhältnis zu Pkw besitzen Motorräder ein großes Verhältnis von Schwerpunkthöhe zu Radstand. Daraus resultiert eine erhöhte Überschlagsneigung bei hohen Verzögerungen. Durch geeignete Wahl der Fahrzeuggeometrie kann die Überschlagsneigung reduziert werden. Zudem existieren auf dem Markt bereits Regelsysteme, die das Abheben des Hinterrads erkennen und den Bremsdruck am Vorderrad entsprechend verringern können, um einen Überschlag zu verhindern.

### Betrachtung der physikalischen Grenzen im vorliegenden Projekt

Für den Verlauf des vorliegenden Projekts werden beide beschriebenen Grenzen nicht detailliert betrachtet, da ihnen durch bereits verfügbare Assistenzsysteme begegnet werden kann. Es findet allerdings die Festlegung einer maximalen Verzögerung statt, um in Fahrversuchen auch im Falle eines Bremsengriffes Ausweichmanöver zu ermöglichen, ohne Gefahr zu laufen, die Schluftpfgrenze zu überschreiten (siehe Kapitel 3.1). Durch die Begrenzung der Verzögerung wird auch verhindert, dass es zu Überschlägen kommen kann.

#### 1.2.3 Projektumfeld

In der Vergangenheit wurden bereits mehrere EU-geförderte Projekte bearbeitet, die die Potenzialabschätzung des Einsatzes von Assistenz- und Sicherheitssystemen im Motorradbereich zum Thema hatten. Hier sind insbesondere PISa (Powered Two-Wheeler Integrated Safety, 2006 bis 2010), MYMOSA (Motorcyclist and Motorcycle Safety 2006 bis 2010) und SiM (Safety in Motion, 2006 bis 2009) zu nennen, die thematisch wie personell eng verbunden waren und im Folgenden kurz beschrieben werden.

PISa identifizierte basierend auf der Analyse von Motorradunfällen eine Reihe von Assistenzsystemen und Maßnahmen, die ein Potenzial zur Unfallvermeidung bieten (SAVINO et al. 2010):

- Autonome Bremsung
- (Front-)Kollisionswarnung
- Bremsassistent (Verstärkung)
- Antiblockiersystem (ABS)
- Bremsassistent (Integralbremse)
- Adaptive Cruise Control (ACC)
- Verbesserung der Wahrnehmbarkeit

Eine im Rahmen von PISa durchgeführte Studie befasst sich mit der Auswirkung einer Bremsung auf die Stabilität eines Zweiradaufsassen (SYMEONDIS et al. 2012). Dabei werden drei Fälle unterschieden:

- eine durch den Aufsassen eingeleitete Bremsung,
- eine automatische Bremsung mit Warnung,
- eine automatische Bremsung ohne Warnung.

Im Experiment sitzt der Aufsasse auf einer Fahrzeugatrappe, die auf einem Schlitten longitudinal mit 0,35 g nach hinten beschleunigt wird. Der Aufbau auf dem Schlitten ist dabei starr (starrer Lenker, keine Rollbewegung). Somit kann mit dem Experiment nur eine Aussage über die Aufsassenbewegung aus einer idealisierten Sitzposition heraus und ohne Einflüsse aus einer etwaigen Fahrzeugquerdynamik gemacht werden. Die Auswirkung der Bewegung auf die Fahrdynamik kann nicht untersucht werden. Eine Variation der Verzögerungswerte findet ebenfalls nicht statt. Ergebnis der Studie ist, dass kein Einfluss auf die Stabilität des Fahrers (Veränderung der Sitzposition während der Bremsung) festzustellen ist, ob er die Bremsung selbst einleitet oder nicht, und, ob er gewarnt wird oder nicht. Durch den starren Aufbau der Motorradatrappe ist es jedoch nicht möglich, die Auswirkung der Fahrerbewegung auf die Stabilität des Fahrzeugs während des Manövers zu bewerten, obwohl diese für die Einsatzgrenzen von AEB im Motorrad eine hohe Relevanz hat.

In einer weiteren Studie im Rahmen des Projekts wurde ein Großroller mit einem Notbremssystem basierend auf einem Laserscanner ausgerüstet. Probanden fahren auf ein stehendes Hindernis zu und wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten gebremst. In den Versuchen wurde gezeigt, dass automatische Bremsungen mit einer mittleren Verzö-

gerung von knapp  $3 \text{ m/s}^2$  möglich sind, ohne dass die Fahrer Kontrollverlust verspüren (SAVINO et al. 2010).

MYMOSA verfolgte einen multidisziplinären Ansatz, um die Motorradsicherheit zu verbessern. Dabei flossen Motorraddynamik, Unfallanalyse, Biomechanik, Simulationsprogramme und neue Schutzausrüstungskonzepte zusammen, um einen neues Konzept integrierter Sicherheit zu entwerfen (BRENNNA et al. 2008). Zum Zeitpunkt der Anfertigung des vorliegenden BERICHTs ist den Autoren jedoch keine Veröffentlichung zum Thema Bremsassistenten aus diesem Projekt bekannt.

Im SiM-Projekt (PIEVE et al. 2010) wurde als Konzept für ein innovatives, sicheres Fahrzeug ein dreirädriger Piaggio-Roller mit verschiedenen aktiven und passiven Sicherheitssystemen ausgerüstet. Dazu gehört neben Traktionskontrolle, semi-aktivem Fahrwerk Airbags und einem speziellen HMI<sup>2</sup>-Konzept auch ein „aktives Bremssystem“ mit aktiver Bremskraftverteilung, ABS und Hinterradabhebeerkennung. Das System ist jedoch nicht für einen autonomen Bremseneingriff ausgelegt. Ergebnis des Projekts ist, dass mit dem gewählten integrierten Ansatz eine verbesserte Sicherheit im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen erreicht werden kann, eine Quantifizierung der Verbesserung oder der Auswirkung der einzelnen Komponenten erfolgt jedoch nicht.

Die eng vernetzten Projekte PISa, MYMOSA und SiM haben gemein, dass sie alle einen integrierten Ansatz aus aktiver und passiver Sicherheit, HMI-Konzepten und teilweise auch Fahrertraining verfolgen. Die konkrete Betrachtung eines einzelnen Systems und Identifikation von dessen Grenzen – wie im hier beschriebenen Projekt angestrebt – wird in keinem der Projekte vorgenommen.

Als weiteres Projekt aus dem gleichen Zeitfenster ist Saferider (PIERINI 2008b; BEKIARIS 2008) zu nennen. Das Projekt beschäftigt sich mit Möglichkeiten, über Telematik die Motorradsicherheit zu verbessern. Da das Ziel des vorliegenden Projekts in erster Linie darin besteht, Grenzen hinsichtlich Stabilität und Auswirkungen der Fahrerreaktion auf

die Fahrdynamik zu identifizieren, sind die Inhalte von Saferider für das Projekt nicht von Relevanz.

Ein Anfang 2018 beendetes Projekt ist MOTORIST (GIORGI u. PIERINI 2014) (Motorcycle Rider Integrated Safety). Auch dieses Projekt verfolgte einen integrierten Ansatz, die Sicherheit von Einspurfahrzeugen zu verbessern. In einem interdisziplinären Team wurde an aktiver und passiver Sicherheit sowie am Fahrerverhalten und Methoden für Fahrertrainings geforscht. Unter anderem wurde hier das Bremsverhalten unterschiedlicher Fahrer beim Bremsen hinsichtlich bestimmter Kennwerte (z. B. Verteilung Vorderrad-/Hinterradbremse, erreichte Verzögerung, Rollwinkel beim Einleiten der Bremsung) untersucht (BALDANZINI et al. 2016). Unter anderem wurde in MOTORIST auf Daten aus dem Projekt 2-BE-SAFE (2-Wheeler Behaviour and Safety) zurückgegriffen. In diesem Projekt wurde das „natürliche“ Verhalten von Zweiradaufsassenden in normalen und kritischen Situationen untersucht (PIERINI 2008a).

Bei den verschiedenen Inhalten der genannten Arbeiten handelt es sich um wichtige Aspekte bei der Entwicklung und Auslegung automatischer Notbremssysteme für Motorräder. Es wurde insbesondere gezeigt, dass Verzögerungen im Bereich bis  $3 \text{ m/s}^2$  für Motorradaufsassenden kontrollierbar sind und die Stabilität des Fahrers in seiner Sitzposition nicht negativ beeinflussen. Zum Zeitpunkt der Bearbeitung des vorliegenden Projekts ist den Autoren jedoch keine Arbeit bekannt, in der die Grenzen der maximalen Verzögerung ermittelt werden, bis zu der die Kontrollierbarkeit sichergestellt ist.

## 1.3 Einordnung des Projekts

### 1.3.1 Kernfrage

Wie zuvor beschrieben, hat in der Vergangenheit bereits Forschung zu vielen Teilaspekten automatischer Notbremssysteme für Motorräder stattgefunden. Als fehlend ist die Identifikation von Grenzen zu sehen, innerhalb derer einschlägige Systeme angewendet werden können. Hierbei geht es weniger um die physikalischen Grenzen, denen bereits mit existierenden Regelsystemen begegnet werden kann, sondern vielmehr um Grenzen, die der Aufsatze der Anwendbarkeit von Notbremssystemen setzt. Ziel des vorliegenden Projekts ist es also, zu identifizieren, innerhalb welcher Grenzen ein Motorradfahrer mit dem Eingriff eines Notbremssystems

<sup>2</sup> HMI = Human Machine Interface, Mensch Maschine Schnittstelle

umgehen kann, ohne die Kontrolle über die Situation zu verlieren, oder gar in eine neue kritische(re) Situation zu geraten.

Anschließend ist zu untersuchen, wie groß der Sicherheitsgewinn ist, der mit einem Notbremssystem innerhalb dieser Grenzen zu erwarten ist.

### 1.3.2 Betrachtete Fälle

In vorliegenden Projekt werden solche Systeme untersucht, die in Phase 2 (Gefahr) und Phase 3 (Kollision unvermeidbar) des ACEA-Modells wirksam sind (KÜHN u. HANNAWALD 2015: S. 66), also Systeme für Situationen, in denen eine Handlung erforderlich ist, um eine Kollision zu verhindern oder abzumildern. Präventive Assistenz (z. B. ACC) ist nicht Teil der Betrachtung. Das Projekt befasst sich mit solchen Szenarien, in denen ein Aufsasse sich bereits in einer kritischen Situation befindet.

### 1.3.3 Untersuchungsschwerpunkte

Das behandelte Projekt gliedert sich in die zwei bereits genannten Hauptthemen:

- Ermittlung der Systemgrenzen von Motorrad-AEB hinsichtlich Nutzbarkeit und Kontrollierbarkeit
- Bewertung der Schutzwirkung von AEB unter Voraussetzung der ermittelten Systemgrenzen

Dazu wurden die folgenden Untersuchungsschwerpunkte abgeleitet.

#### **Einfluss der motorradspezifischen Fahrdynamik auf die Anwendbarkeit von AEB**

Im Pkw-Bereich haben AEB bereits seit vielen Jahren Serienreife erreicht. Umfeldsensorik, Auslöselogik, Regelsysteme, Aktorik, etc. können voraussichtlich mit geringem Adaptierungsaufwand weitgehend auf Motorräder übertragen werden. Dennoch ergeben sich besondere Anforderungen an das Gesamtsystem bspw. durch die einspurfahrzeugspezifische Instabilität oder die Überschlagsneigung – auch in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen (Reibwert etc.).

Die Beherrschung solcher rein fahrzeugbezogenen, fahrdynamischeren Grenzen kann auf Basis der

Entwicklungsarbeiten bereits existierender Systeme ([kurventaugliche] Antiblockiersysteme, Überschlagsverhinderung etc.) erfolgen. Die sich daraus ergebenden Grenzen (z. B. maximale Bremsdruckgradienten in Abhängigkeit der Fahrzeugschräglage) stellen jedoch lediglich den best Case im Sinne einer aktiven Auslösung von Notbremssystemen dar. Der hohe Einfluss des Fahrers auf die Fahrzeugdynamik erfordert weiteren Untersuchungsaufwand.

#### **Einfluss der Fahrerfertigkeit auf die Kontrollierbarkeit aktiver, (kritischer) Fahrszenarien**

Vor allem in Schreck- und Gefahrensituationen, aber selbst im alltäglichen Straßenverkehr sind Motorradfahrer häufig nicht in der Lage, das fahrdynamische Potenzial ihres Fahrzeuges vollständig auszunutzen. Ein Assistenzsystem, das wie in hier betrachteten Situationen ggf. plötzliche Zustandsänderungen vornimmt, stellt besondere Herausforderungen an den Fahrzeugaufassen. Somit ist zu untersuchen, in welchem Maße bestimmte Fahrerfertigkeiten Auswirkungen auf die Kontrollierbarkeit auf AEB im Motorrad haben.

#### **Einfluss der Fahreraufmerksamkeit auf die Kontrollierbarkeit von AEB**

Ausgehend von den zuvor erläuterten Untersuchungen hinsichtlich der fahrerfertigkeitabhängigen Kontrollierbarkeit, gilt es, den Einfluss der Aufmerksamkeit des Fahrers zu ermitteln. Da das Eintreten einer Notsituation häufig auf Unaufmerksamkeit des Fahrers zurückzuführen ist, muss davon ausgegangen werden, dass die Auslösung von AEB für die Aufsassen überraschend auftreten wird.

#### **Möglichkeiten, den Aufsassen zu warnen und ggf. Handlungsanweisungen zu geben**

Es ist zu erwarten, dass ein aufmerksamer Fahrer eine Gefahrensituation besser kontrollieren kann als ein unaufmerksamer Fahrer. Das einzige derzeit serienmäßig erhältliche Warnsystem im Motorradsektor ist der Totwinkelassistent, der 2016 von BOSCH und BMW präsentiert wurde (BOSCH 2016). Dabei wurde das warnende Anzeigeelement analog zu den aus Pkw bekannten Systemen in den Rückspiegel integriert, was angesichts der offen-

sichtlichen Abbiegeabsicht des Fahrers sinnvoll erscheint.

Die Warnung des Fahrers vor einem drohenden Aufprall kann hingegen mit keiner bestimmten Komponente (Rückspiegel, Anzeigedisplay) intuitiv in Verbindung gebracht werden. Vielmehr gilt es zu ermitteln, welcher visuelle, auditive oder haptische Reiz zur Fahrerwarnung geeignet ist und ob sogar zusätzliche Informationen (bspw. Aufprall von links) vermittelt werden können.

### Fahrerakzeptanz

Grenzen aus Fahrersicht treten nicht nur hinsichtlich seiner Fähigkeiten und Aufmerksamkeit auf, sondern auch hinsichtlich seiner Akzeptanz gegenüber dem Assistenzsystem. So ist zu untersuchen, inwiefern sich Fahrer von Eingriffen oder gar Fehlfunktionen von AEB gestört fühlen und ob dadurch ein Abschalten des Systems provoziert werden könnte.

### Anwendbarkeit eines dynamischen Motorrad-Fahrsimulators

Eine Besonderheit des vorliegenden Projekts ist die Verwendung des DESMORI-Simulators (PLEß et al. 2016) zur Untersuchung der fahrerbezogenen Fragestellungen. Im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstellen und insbesondere hinsichtlich der warnenden Systeme bietet sich der Simulator als gefahrungsfreies Untersuchungswerkzeug an.

Der Simulator stellt aktuell das High-End der Dynamiksimulation für Motorräder dar. Er ist in der Lage, in mittleren Geschwindigkeitsbereichen (z. B. Landstraßenfahrt) die Motorradfahrtdynamik realgetreu abzubilden.

## 1.4 Potenzial

Das Potenzial  $POT$  von AEB wird im Folgenden als das Produkt aus Anwendbarkeit  $p_A$  und Wirksamkeit  $p_W$  betrachtet.

$$p_A \cdot p_W = POT \text{ mit } p_A, p_W \in [0,1]$$

Ein Schutzpotenzial von AEB kann sich nur dann entwickeln, wenn unter gegebenen Randbedingungen eine Anwendbarkeit des Systems gegeben ist.

Befindet sich eine Menge dieser Randbedingungen außerhalb eines zulässigen Wertebereichs, reduziert sich die Anwendbarkeit. Damit verringert sich auch das Schutzpotenzial. Ist ein AEB in einer bestimmten Situation nicht anwendbar, bietet es also auch kein Schutzpotenzial, unabhängig von der Wirksamkeit des Systems. Nur wenn  $p_A > 0$ , kann eine Notbremsung ein Schutzpotenzial bieten. Parameter, auf die die Anwendbarkeit sensitiv ist, sind

- Umwelteinflüsse
  - Reibwert
- Szenario
  - Unfalltyp (UTYP) nach (GDV 2016)
  - Sichtbarkeit
- Beherrschbarkeit
  - Fahrgeschwindigkeit
  - Rollwinkel

Ist eine Anwendbarkeit gegeben, erhöht sich das Schutzpotenzial von AEB in Abhängigkeit der Wirksamkeit.

Bei der Versuchsdurchführung mit dem Untersuchungswerkzeug EVITA, das in den Fahrversuchen eingesetzt werden soll (Erläuterung in Kapitel 3.4.2), wird die Verringerung der Geschwindigkeit des Egofahrzeuges (hier:  $\Delta v_{ego}$ ) als Maß der Wirksamkeit eines Antikollisionssystems herangezogen. Je höher die Verringerung der Geschwindigkeit, desto wirksamer ist das Antikollisionssystem (FECHER et al. 2015: S. 201). Je größer der Geschwindigkeitsabbau des Egofahrzeuges ist, desto kleiner ist die Relativgeschwindigkeit  $v_{rel}^{imp}$  bei einem (gedachten) Aufprall mit einem vorausfahrenden Fahrzeug.

$v_{rel}^{imp}$  steht wiederum in quadratischem Zusammenhang mit der Aufprallenergie, die im Hinblick auf die Unfallfolgenminderung zu minimieren ist. Die Relativgeschwindigkeit beim Aufprall kann also indirekt als Maß zur Bewertung der Unfallfolgenminderung herangezogen werden.

$\Delta v_{ego}$  kann nur für gleichbleibende Szenarien miteinander verglichen werden und als Maß für die Wirksamkeit von AEB herangezogen werden. Unterschiedliche Szenarien sind voneinander getrennt zu bewerten.

Der erreichbare Geschwindigkeitsabbau im Betrachtungszeitraum<sup>3</sup> ist abhängig von der Verzögerungskaskade, die definiert wird durch

- Verzögerungsstärke über der Zeit,
- Eingriffszeitpunkt,
- Warnmodalitäten.

Wie in Kapitel 1.3.1 beschrieben, können Verzögerungsstärke und -gradient nicht an die physikalischen/technischen Möglichkeiten angenähert werden, ohne den Aufsassen zusätzlich zur eigentlichen Fahraufgabe zu belasten. Eine solche Belastung ist dann als kritisch anzusehen, wenn sie den Aufsassen subjektiv überlastet oder ihn sogar an seine individuelle Beherrschbarkeitsgrenze bringt.

Für die im vorliegenden Projekt durchgeführten Untersuchungen liegt der Schwerpunkt auf der Ermittlung der Wirksamkeit von AEB. Die Anwendbarkeit wird durch eine geeignete Szenarienwahl und die Festlegung auf nicht einschränkende Umweltbedingungen als gegeben angesehen. Eine Variation der Parameter Fahrgeschwindigkeit und Rollwinkel findet dennoch statt, da sie sich auf die Beherrschbarkeit auswirken könnten.

Zur Ermittlung des Potenzials von AEB werden somit folgende Aussagen gesucht:

- Geschwindigkeitsbereiche, in denen die Beherrschbarkeit gegeben ist,
- Rollwinkelbereiche, in denen die Beherrschbarkeit gegeben ist,
- die Verzögerungskaskade, die den größten Geschwindigkeitsabbau ermöglicht – also die höchste Wirksamkeit besitzt.

---

<sup>3</sup> Als Betrachtungszeitraum wird im vorliegenden Dokument diejenige Zeitspanne definiert, die zwischen dem Auftreten eines (im Versuchsbetrieb fremdausgelösten) Ereignisses, das eine Notbremsung erfordert, und dem Zeitpunkt liegt, zu dem eine maximale Verzögerung gestellt werden kann. Dabei ist es irrelevant, ob diese Verzögerung durch den Aufsassen, oder einen autonomen Eingriff erzeugt wird. Für ein idealisiertes Notbremssystem wird davon ausgegangen, dass mit dem Auftreten des Ereignisses sofort mit einem automatischen Eingriff begonnen wird.

## 1.5 Referenz

AEB im Motorrad können nur dann im Feldeinsatz erfolgreich sein, wenn sie gegenüber der fahrerinduzierten Notbremsung effektiver sind. Dies ist der Fall, wenn der Geschwindigkeitsabbau vor einer Kollision größer ist als üblicherweise vom Aufsassen selbst erreichte Werte. Dieses Ziel kann sowohl durch einen früheren Beginn der Bremsung als auch durch eine höhere mittlere Verzögerung erreicht werden.

### 1.5.1 Ideale Bremsung

Das Ideal einer Notbremsung kann dadurch beschrieben werden, dass nach minimalen Reaktions- und Schwellzeiten die Verzögerung eingestellt wird, die innerhalb der zur Verfügung stehenden Distanz bzw. Zeitlücke die Differenzgeschwindigkeit zwischen Egofahrzeug und Zielfahrzeug so weit wie möglich reduziert. Bild 1-3 zeigt am Beispiel Pkw für eine Vollbremsung, wie durch verschiedene Assistenzsysteme eine Unterstützung des Fahrers erfolgen kann.

Ein Bremsassistent (BA) verstärkt eine vom Fahrer aufgebrauchte Bremskraft auf das Maximum, während durch eine Elektrohydraulische Bremse (EHB) mit BA die Bremsdynamik weiter erhöht werden kann. Ein System mit Umfeldwahrnehmung (im Bild BA+) kann zudem bereits innerhalb der Reaktionszeit des Fahrers agieren und ist nicht auf eine Anregung durch den Fahrer angewiesen. Die gezeigten Systeme können folglich Unaufmerksamkeiten des Fahrers und ggf. nicht ausreichenden Bremsdruckaufbau in Teilen beheben. Zusätzlich ist im Bild ein automatisches Notbremssystem skizziert. Mit der Möglichkeit, die Bremse vollständig fahrerunabhängig zu aktivieren, kann hier schon innerhalb der Reaktionszeit des Fahrers ein hoher Bremsdruck aufgebaut werden.

In der Realfahrt können verschiedene Fehler zu einer Abweichung von einem idealen Bremskraftverlauf führen:

- Die Notsituation wird nicht erkannt.
- Durch Sekundärbelastung oder Unaufmerksamkeit verlängert sich die Reaktionszeit.
- Die Bremsbetätigung ist in Gradient und/oder Amplitude nicht ausreichend.

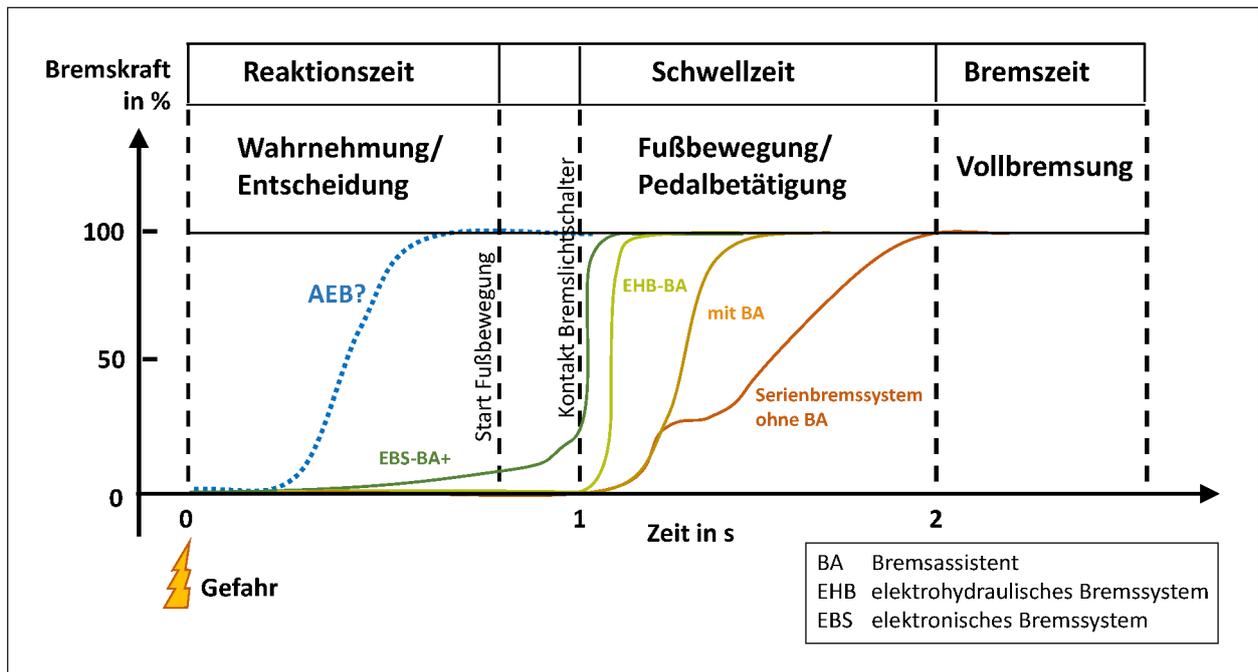


Bild 1-3: Eingriffe von Bremssystemen eigene Darstellung nach (KRAUSE et al. 2007), ergänzt um AEB

- Der Aufsasse ist aufgrund von körperlichen oder Trainingsdefiziten nicht in der Lage, die maximale Fahrzeugverzögerung zu beherrschen.

Während zur Beseitigung der drei erstgenannten Fehlertypen Technologien aus dem Pkw-Sektor weitestgehend übernommen werden können, stellt der letztgenannte Punkt einen Sonderfall im Motorradbereich dar. Der Fahrer wird nicht durch einen Sicherheitsgurt zurückgehalten und muss somit die auf ihn wirkenden Kräfte während einer Bremsung selbst abstützen und gleichzeitig das Fahrzeug stabilisieren. Ist er dazu mental oder physisch nicht in der Lage, kann es zu kritischen Situationen kommen.

### 1.5.2 Reales Bremsverhalten von Motorradfahrern

Das Gefahrenbremsverhalten von Motorradfahrern wurde bereits mehrfach, z. B. durch (LENKEIT et al. 2011) und (GAIL et al. 2009), untersucht. In einer Studie des Instituts für Zweiradsicherheit (IFZ) im Jahr 2016 wurden Versuche mit über 100 Probanden durchgeführt (KUSCHEFSKI et al. 2016), mit dem Ziel, eine Handlungsempfehlung über Brems- und Ausweichstrategien abzugeben.

Darin wird OTTE<sup>4</sup> zitiert, dass innerorts durchschnittlich 1,6 s und außerorts 1,9 s von der Reaktion bis zur Kollision vergehen. Dies umfasst jedoch lediglich diejenigen Fälle, in denen eine Kollision nicht verhindert werden konnte und lässt keine Rückschlüsse auf ein typisches Bremsvermögen von Motorradfahrern zu.

Die in der Studie von den Probanden unter Verwendung von ABS (n = 73) aufgebrachten, mittleren Verzögerungen betragen laut den Autoren zwischen 5,9 m/s<sup>2</sup> (bei 50 km/h) und 7,9 m/s<sup>2</sup> (bei 100 km/h). Die ermittelten Werte basieren jedoch auf einer Messung des Anhaltewegs, der um eine geschätzte Reaktionszeit von 0,21 s korrigiert wurde. Die Reaktionszeit wurde so kurz gewählt, da den Probanden bewusst war, dass sie bei Aufleuchten eines Signals bremsen sollen und sie somit vorkonditioniert waren. Es ist folglich anzunehmen, dass die durch dieses Verfahren bestimmten Fahrzeugverzögerungen tendenziell niedriger als die tatsächlich aufgebrachten Verzögerungen sind. Die Mess-

<sup>4</sup> Persönliche Informationen von Prof. Otte (MHH) zu GIDAS-Auswertungen, 24.05.2016

ergebnisse dienen somit lediglich als grobe Richtwerte für typische Bremsvorgänge.

Die von (LENKEIT et al. 2011) ermittelten Daten basieren auf Simulatorstudien auf einem dynamischen Motorrad-Fahrsimulator. Je nach dargestelltem Szenario ergeben sich Reaktionszeiten von unter 0,5 s bis über 2 s, wobei jeweils sehr große Streuungen auftreten. Sie können somit ebenfalls keiner verlässlichen Referenzbildung dienen.

### 1.5.3 Referenz für Fahrversuch

Für die Bewertung der Fahrversuche im Rahmen des vorliegenden Projekts ist eine eigene Referenz für das explizite Versuchsszenario zu bilden, um einen möglichst aussagekräftigen Vergleich für Versuche mit automatischen Bremsengriffen zu erreichen. Im Versuchsplan sind also Notbremsungen ohne Eingriff des automatischen Bremssystems vorzusehen. Die Versuchsreihenfolge ist so zu randomisieren, dass Einflüsse durch Vorkonditionierung minimiert werden.

## 2 Methodik

### 2.1 Transition

Wie bereits beschrieben, stellt der Aufsasse eines Einspurfahrzeugs im Gegensatz zum Fahrer eines Zweispurfahrzeugs einen wesentlichen Teil des ohne Fahrer instabilen Systems dar. Somit hat sein Zustand im Falle einer Notbremsung einen entscheidenden Einfluss auf die Systemstabilität und damit auf den erfolgreichen Verlauf eines potenziellen Notbremsmanövers. Bei einer unvorhergesehenen Reaktion des Aufsassen könnte das System (bis zum Sturz) destabilisiert und dadurch die Unfallfolgen sogar verschlimmert werden.

Um ein automatisches Notbremsmanöver mit höchstmöglicher Verzögerungsstärke einleiten zu können, muss also sichergestellt sein, dass der Aufsasse sich in einem bremsbereiten Zustand befindet, in dem keine Destabilisierung zu erwarten ist. Ist das nicht der Fall, ist dafür zu sorgen, dass ein solcher Zustand hergestellt wird. Den Übergang von einem beliebigen Aufsassen-Zustand in den bremsbereiten Zustand wird im Folgenden als Transition bezeichnet. Der Abschluss der Transition zeichnet sich dadurch aus, dass der Aufsasse im

sowohl physisch (stabile Körperhaltung, beide Hände am Lenker etc.) als auch mental (Bewusstsein über Bremsung) auf das anschließende Manöver vorbereitet ist. Die Transition ist spätestens dann abgeschlossen, wenn der Aufsasse selbst die Bremse betätigt.

### Transitionsdauer

Als Transition wird der Übergang von einem nicht weiter definierten Zustand bei Beginn eines Ereignisses (für ein idealisiertes System gleichzeitig Auslösezeitpunkt des Notbremsengriffs) in einen körperlich und mental bremsbereiten Zustand bezeichnet. Die für diesen Übergang benötigte Dauer wird als Transitionsdauer bezeichnet und im Folgenden als Kriterium zur Bewertung von Motorrad-AEB verwendet. Um möglichst früh möglichst stark verzögern zu können, sollte der Fahrer zu einer möglichst schnellen Transition animiert werden. Dazu sind geeignete Reize (z. B. Warnung) zu definieren.

## 2.2 Kriterien

Zur Bewertung der Anwendbarkeit und Wirksamkeit von Motorrad-AEB sowie der Transition werden neben objektiven auch subjektive Kriterien herangezogen. Das Fahrerempfinden ist Teil der Gesamtbewertung, da eine erfolgreiche Einführung einschlägiger Systeme nur gelingen kann, wenn es durch den Motorradfahrer akzeptiert wird. Selbst ABS im Motorrad wird bis heute von einigen Motorradfahrern nach wie vor als unnötig oder gar störend empfunden.

Im Folgenden werden die Kriterien beschrieben, nach denen in den Realfahr- und Simulatorstudien eine Bewertung von AEB erfolgt.

### 2.2.1 Objektive Kriterien

#### Abgebaute Geschwindigkeit

Wie bereits in Kapitel 1.3.3 erläutert, bietet sich innerhalb gleichbleibender Szenarien und Randbedingungen eine Auswertung der während der Transitionphase abgebauten Geschwindigkeit an, da diese direkt mit der Aufprallenergie bei einer Kollision zusammenhängt. Je größer die abgebaute Geschwindigkeit, desto besser ist der Eingriff zu bewerten.

### Mittlere Verzögerung

Um szenarienunabhängig eine Bewertung vornehmen zu können, eignet sich die Ermittlung der mittleren Verzögerung im Betrachtungszeitraum. Dabei sollte der Mittelwert über den zurückgelegten Bremsweg berechnet werden (Alternative: Mitteilung über die Zeit). Dadurch werden Verzögerungen, die bei hohen Fahrgeschwindigkeiten erreicht werden, höher gewichtet als solche, die im weiteren Verlauf der Bremsung bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten erreicht werden. Der Zielwert entspricht der physikalisch maximal erreichbaren Verzögerung, bevor es zu Radblockade oder Überschlag kommt.

### Transitionsdauer

Der grundlegenden Hypothese dieses Berichtes (siehe Kapitel 2.1) folgend kann die Zeitspanne, die vom Auftreten eines Ereignisses bis zur körperlichen Bremsbereitschaft vergeht, durch geeignete Reize (z. B. Warnung) verkürzt werden. Eine kurze Transitionszeit erhöht durch die frühere Möglichkeit der maximalen Verzögerung die Wirksamkeit der Bremsung. Als Referenz dient die Reaktionszeit des Fahrers bei einer Notbremsung ohne automatischen Eingriff. Während der Zeitpunkt eines künstlich erzeugten Ereignisses im Versuch klar erfasst werden kann, besteht die Herausforderung darin, das Transitionsende messbar zu machen, wenn keine manuelle Bremsbetätigung erfolgt. Dazu bieten sich zwei Messgrößen besonders an: Die Kraft auf die Lenkerenden und die Oberkörperbewegung des Fahrers.

### Kraft auf Lenkerenden

Das Erfassen des Abschlusses der Transition stellt eine besondere Herausforderung dar. Eine Möglichkeit, sie messbar zu machen, stellen die an der Lenkstange aufgebrachten Kräfte dar. Das Aufbringen von Abstützkräften durch den Fahrer stellt ein Indiz für seine Bremsbereitschaft dar. Bauen sich diese Kräfte nicht auf, kann davon ausgegangen werden, dass der Fahrer nicht (ausreichend) an den Lenker angebunden ist. Die Abstützung der Kräfte über den Sitz am Tank und die Muskelspannung im Oberkörper des Aufsassen (wie mitunter in Fahrtrainings gelehrt) können diesen Messwert stark beeinflussen. Daher werden hier keine Absolutwerte, sondern vielmehr Zeitverläufe (z. B. Auftreten von Spitzen, Gradienten) betrachtet.

### Oberkörperbeschleunigungsdifferenz

Als zweites Indiz für die Bremsbereitschaft des Fahrers kann die Differenz zwischen Fahrzeug- und Oberkörperbeschleunigung herangezogen werden. Diese ist ein indirektes Maß für die Körperspannung, die für eine sichere Bremsung benötigt wird. Eine Differenz der Beschleunigung bedeutet eine Vorverlagerung des Oberkörpers aufgrund fehlender Abstützung. Nähert sich das Verhältnis von Fahrzeug- zu Oberkörperbeschleunigung an eins an, wird von der Bremsbereitschaft – und damit dem Ende der Transition – ausgegangen werden.

### Fahrstabilität

Höchste Wichtigkeit bei der Durchführung einer automatischen Notbremsung hat die Einhaltung der Fahrstabilität. Neben einer Subjektivbewertung über das Stabilitätsempfinden durch den Probanden können auch objektive Messwerte herangezogen werden. Als Kenngrößen zur Bezifferung der Fahrstabilität dienen bspw. Rollwinkel und Rollrate sowie Lenkwinkel und -geschwindigkeit, die bei der Geradeausbremsung nur geringen Abweichungen von der Nulllage unterliegen sollten. Große Schwankungen dieser Größen sind entsprechend negativ zu werten, wenn sie eine korrigierende Fahrereingabe notwendig machen.

### 2.2.2 Subjektive Kriterien

Die Subjektivbewertung erfolgt mithilfe eines Fragebogens. Dieser ist in Anhang A-2 beigefügt. Die wichtigsten Aspekte werden im Folgenden kurz erläutert:

#### Beherrschbarkeit

Solange es im Versuchsbetrieb nicht zum Sturz eines Probanden kommt, wird grundsätzlich von einer Beherrschbarkeit der Fahraufgabe ausgegangen. Dabei befindet sich der Proband jedoch in einem provozierten Szenario in einer Testumgebung. Eine Projektion der Erlebnisse auf reale Notsituationen im Realverkehr ist mit Unsicherheiten verbunden. Um diese Unsicherheiten zu verringern, soll eine Subjektivbewertung der Beherrschbarkeit durch die Probanden durchgeführt werden.

### Wunsch nach Abschalt-/Überstimbarkeit

Das Auslösen einer Notbremsung findet systembedingt ohne einen Fahrerbefehl statt. Dadurch besteht die Gefahr, dass der Aufsasse den autonomen Eingriff in seiner Ausprägung als untauglich empfindet oder ihn vollständig ablehnt. Sollten den Studien zu Folge der Wunsch einer Abschalt- oder Überstimbarkeit aufkommen, ist das ggf. für die spätere Funktionsentwicklung von Motorrad-AEB zu beachten.

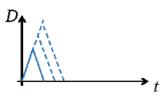
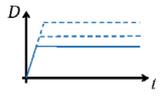
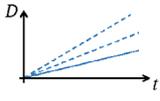
### Gefahr einer Fehlbedienung

Durch die unerwartet auftretenden Verzögerungen ist es denkbar, dass der Aufsasse unvorhergesehene Fahreingaben tätigt. Dies könnte bspw. ein unbeabsichtigtes Betätigen des Gasgriffes oder eine Lenkbewegung sein. Da beides auch bewusste Fahreingaben sein könnten (z. B. durch o. g. Wunsch nach Überstimbarkeit) wird der Proband auch zur Klärung dieser Absicht befragt.

## 3 Versuchsdesign

Um die Einsetzbarkeit von AEB im Motorrad zu untersuchen und eine Potenzialabschätzung vorzunehmen, wird eine Studie durchgeführt, die sich in Realfahrversuche auf dem Versuchsgelände der Technischen Universität Darmstadt und Simulatorversuche mit dem dynamischen DESMORI Motorrad-Fahrsimulator am Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW) aufteilt.

Für die Studien wird angenommen, dass der Fahrer eines motorisierten Zweirads sich im zuvor beschriebenen (körperlich und mental) bremsbereiten Zustand befinden muss, um eine maximal mögliche Verzögerung durch ein automatisiertes System abstützen zu können. Um den Fahrer in diesen Zustand zu versetzen, sollen Teilbremsungen mit niedrigen Verzögerungswerten bzw. -gradienten eingesetzt werden. Durch diese Warnbremsung soll der Fahrer zur Einnahme des bremsbereiten Zustands stimuliert werden. Ist der bremsbereite Zustand erreicht, kann mit der der vorgesehenen maximalen möglichen Verzögerung (Erläuterung in Kapitel 3.1) gebremst werden. Der Übergang vom Zustand vor der Bremsung in den bremsbereiten Zustand wird gemäß Kapitel 2.1 als Transition bezeichnet. Das Maß für die Wirksamkeit einer Warnbremsung ist

Strategien	Varierte Parameter	
Bremsruck	Höhe der Verzögerung	
Bremsblock	Höhe der Verzögerung	
Bremsrampe	Gradient	

Tab. 3-1: Untersuchte Bremsseingriffe

also die Transitionsdauer. Je kürzer die Transitionsdauer ist, desto wirksamer ist Maßnahme.

Als Warnbremsung zur Transitionsinitiierung werden drei verschiedenen Bremsprofile genutzt: ein Bremsruck (Impuls), eine konstante leichte Verzögerung (Bremsblock) und ein langsamer Verzögerungsaufbau (Bremsrampe). Die Profile sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Im Rahmen der Fahrversuchsstudie mit Probanden soll ermittelt werden, welches Bremsprofil als Transitionsinitiator am wirksamsten ist, also am schnellsten dazu führt, dass der Fahrer den bremsbereiten Zustand erreicht und mit der maximal möglichen Verzögerung gebremst werden kann. Um eine bestmögliche Schutzwirkung zu erreichen, ist außerdem anzustreben, bereits vor Abschluss der Transition möglichst viel Geschwindigkeit, und damit kinetische Energie, abzubauen. Dazu ist die vorbereitende Teilbremsung (Impuls, Block, Rampe) so zu gestalten, dass die Verzögerung bzw. der Gradient des Verzögerungsaufbaus so hoch wie möglich gewählt wird, aber nur so hoch, dass ein Fahrer, der gegebenenfalls von dem Eingriff überrascht wird, das Fahrzeug noch beherrschen kann.

Aus Sicherheitsgründen kann diese Grenze nicht im Probandenversuch ermittelt werden. Um die Kontrollierbarkeitsgrenze trotzdem zu ermitteln und somit Parameter festzulegen, die im Probandenversuch gefahrlos genutzt werden können, wird zunächst eine vorbereitende Studie mit Experten durchgeführt. Bei diesen Experten handelt es sich um Fahrlehrer- bzw. Fahrtrainer, die große Fahrferigkeiten besitzen und gleichzeitig sehr geübt darin sind, die Fähigkeiten weniger geübter Fahrer einzuschätzen. Mit diesen Fahrern werden Verzögerungen bzw. Verzögerungsgradienten ausgehend von

niedrigen Werten immer weiter gesteigert, bis die Experten sie als für den durchschnittlichen Fahrer als nicht mehr zumutbar bewerten. Mithilfe der Ergebnisse werden die Brems Eingriffe für die anschließende Probandenstudie parametrisiert.

Mit den Experten werden die verschiedenen Bremsprofile außerdem bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und in Kurvenfahrt untersucht, um die Auswirkungen dieser fahrdynamischen Größen auf die Kontrollierbarkeit von automatischen Brems Eingriffen zu untersuchen. Das Vorgehen bei der Expertenstudie wird in Kapitel 3.1 beschrieben.

An die Expertenstudie schließt sich eine Probandenstudie mit Normalfahrern an. Hier soll mithilfe der zuvor ermittelten Verzögerungsgrenzen untersucht werden, wie lange die Probanden ab dem Eingriffszeitpunkt der verschiedenen vorbereiteten Teilbremsungen brauchen, um den bremsbereiten Zustand einzunehmen. Die Studie soll Aussagen über die Wirksamkeit der Eingriffsprofile Impuls, Block und Rampe ermöglichen.

Aus Sicherheitsgründen finden Brems Eingriffe während der Probandenversuche nur in Geradeausfahrt statt. Die Probanden erhalten keine ablenkenden Nebenaufgaben und sind während des Versuchs voll auf die Fahraufgabe konzentriert. Details zur Probandenstudie können Kapitel 3.2 entnommen werden.

Für die Untersuchung kritischerer Szenarien (Ablenkung, ein-/freihändige Fahrt) wird auf dem dynamischen Motorrad-Fahrsimulator am Würzburger Insitut für Verkehrswissenschaften zurückgegriffen. Hier erhalten die Probanden während der Versuchsfahrt ablenkende Aufgaben. Hier wird beispielsweise untersucht, wie sich Warnungen vor dem Brems eingriff auf die Fahrerreaktion auswirken. Die Simulatorstudie wird in Kapitel 3.3 näher erläutert.

## 3.1 Expertenstudie

### 3.1.1 Zumutbarkeit von Verzögerungen

Hauptziel der Expertenstudie ist es, die Grenzen für die drei Teilbremsprofile Block, Rampe und Impuls zu ermitteln, innerhalb derer automatische Eingriffe für unvorbereitete Normalfahrer zumutbar sind, ohne dass die Gefahr besteht, dass das Fahrer-Fahrzeug-System ungewollt destabilisiert wird.

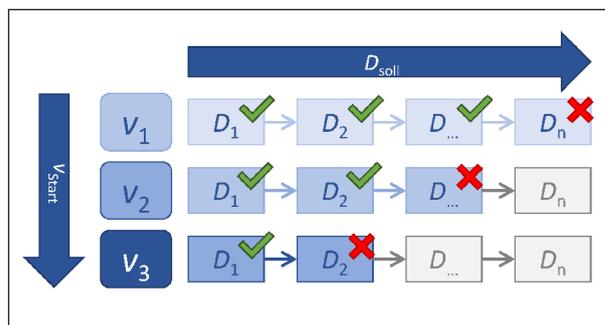


Bild 3-1: Schema Expertenstudie

Die Experten fahren dabei mit einer vorgegebenen Versuchsgeschwindigkeit und werden – zunächst mit einer niedrigen Verzögerung (bzw. mit einem niedrigen Verzögerungsgradienten) – ferngesteuert gebremst. Bewertet der Experte die Bremsung als auch für unvorbereitete Normalfahrer zumutbar, wird bei der nächsten Bremsung die Verzögerung (bzw. der Verzögerungsgradient) gesteigert. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis der Experte die Bremsung als für den unvorbereiteten Normalfahrer nicht mehr zumutbar einordnet. Das Versuchsschema ist in Bild 3-1 dargestellt. Es wird mit jedem Experten für jedes Bremsprofil durchgeführt.

In Anlehnung an die bereits in Kapitel 1.2.3 beschriebene Studie von (SAVINO et al. 2010), bei der Verzögerungen von  $2,8 \text{ m/s}^2$  von Probanden als problemlos kontrollierbar bewertet wurden, wird die untere Grenze der Verzögerungen auf  $3 \text{ m/s}^2$  festgelegt. Wird eine Verzögerung als zumutbar bewertet, erfolgt für die nächste Bremsung eine Steigerung um  $1 \text{ m/s}^2$ . Die Steigung der ersten Rampe beträgt  $3 \text{ m/s}^3$ , was näherungsweise dem Aufbau der zuvor genannten niedrigsten Verzögerung von  $3 \text{ m/s}^2$  in der mittleren Reaktionszeit eines Fahrers ( $1 \text{ s}$ )<sup>5</sup> entspricht.

### Sicherheitsvorkehrungen

Insbesondere im späteren Probandenversuch muss gewährleistet werden, dass auch im Falle eines

<sup>5</sup> 0,7 bis 0,75 s für erwartete Ereignisse, 1,25 s für unerwartete, aber übliche Ereignisse (z. B. aufleuchtende Bremslichter des Vorfahrenden) nach GREEN (2000: S. 213).

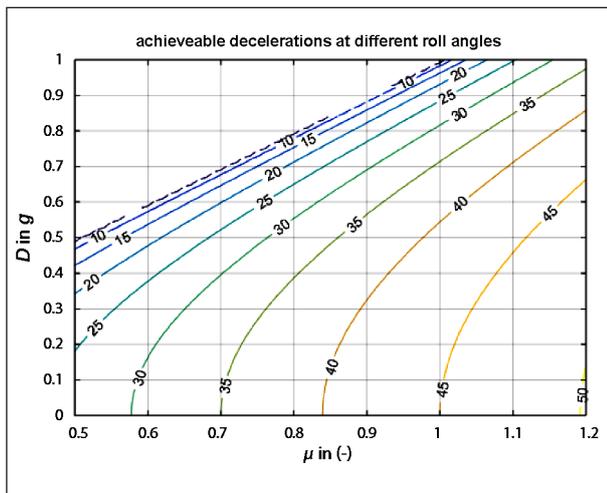


Bild 3-2: Verzugungspotenzial unter Rollwinkel

unerwarteten Ausweichmanövers<sup>6</sup> die in Kapitel 1.2.2 beschriebenen Schlupfgrenzen nicht überschritten werden, da sonst die Gefahr eines Sturzes besteht. Um Ausweichmanöver zu ermöglichen, werden die Verzögerungen im Expertenversuch entsprechend nicht bis in den ABS-Regelbereich gesteigert.

GIOVANNINI et al. beschreiben für typische Ausweichmanöver Fahrzeugrollwinkel von bis zu  $\varphi_{serve} = 30^\circ$  (GIOVANNINI et al. 2013: S. 177). Für die Studien im vorliegenden Projekt wird eine maximale Verzögerung von  $0,7 g$  angenommen. Damit sind solche Rollwinkel noch bei Reibwerten von  $\mu = 0,9$  befahrbar, ohne dass das Querschluftpotenzial überschritten wird (siehe Bild 3-2<sup>7</sup>).

Für eine spätere potenzielle Funktionsentwicklung ist zu überprüfen, welche Geschwindigkeiten und Zeitlücken welche Querbeschleunigungen und Rollwinkel zum Befahren einer Ausweichtrajektorie erfordern, um damit und unter sinnvoller Abschätzung eines aktuellen Reibwertes eine Maximalverzögerung zu ermitteln.

Um zu verhindern, dass durch eine gegebenenfalls unbewusste Reaktion des Fahrers auf die automatische Bremsung ungewollt beschleunigt wird, wird

während einer Auslösung der Bremsprofile Block und Rampe außerdem die Kupplung geöffnet. Dadurch ist sichergestellt, dass das Fahrzeug nach der Auslösung zum Stehen kommt. Das ist insbesondere auch später im Probandenversuch wichtig, um den Probanden im Anschluss an die Bremsung befragen zu können. Zusätzlich wird durch das Öffnen der Kupplung verhindert, dass es beim Bremsen in den Stillstand zu einem Abwürgen des Motors kommt, wodurch die Energieversorgung der Messtechnik unterbrochen würde.

### 3.1.2 Geschwindigkeitseinfluss

Während in der späteren Probandenstudie alle Versuche mit der gleichen Geschwindigkeit durchgeführt werden, findet in den Expertenversuchen eine Variation der Fahrgeschwindigkeit vor dem Eingriff statt. So soll untersucht werden, ob sich die Fahrgeschwindigkeit auf die maximal zumutbare Verzögerung bzw. den maximal zumutbaren Verzögerungsgradienten auswirkt. So sollen erste Hinweise auf die Abhängigkeit der Eingriffsstrategie von der Fahrsituation erlangt werden. Als Versuchsgeschwindigkeiten sind für die Expertenstudie zunächst  $45 \text{ km/h}$ ,  $70 \text{ km/h}$  und  $90 \text{ km/h}$  vorgesehen.

### 3.1.3 Kurvenfahrt

Ein weiterer Aspekt der Fahrsituation sind eventuell auftretende Rollwinkel. Während automatische Bremsengriffe während einer Kurvenfahrt für die Probandenversuche als zu kritisch eingeschätzt werden, werden mit den Experten auch Bremsungen in Kurven durchgeführt, um eine erste Einschätzung treffen zu können, wie sich verschiedene Rollwinkel auf die Zumutbarkeit von automatischen Bremsengriffen auswirken.

Dazu werden die Experten in einer ausgewählten Kurve auf dem Testgelände (Kurvenradius ca.  $25 \text{ m}$ ) ferngesteuert gebremst. Das Vorgehen ist analog zu den Versuchen in Geradeausfahrt. Der Experte bewertet die Bremsung hinsichtlich ihrer Zumutbarkeit. Im Falle einer positiven Bewertung wird beim nächsten Versuch eine höhere Verzögerung gewählt.

Die Versuche in Kurvenfahrt werden ausschließlich mit dem Blockprofil durchgeführt. Die Versuchsgeschwindigkeiten sind hier  $30 \text{ km/h}$  und  $50 \text{ km/h}$ , wodurch eine Variation des Rollwinkels (bei gleichem Kurvenradius) erreicht wird.

<sup>6</sup> Die Probandenversuche werden lediglich in Geradeausfahrt durchgeführt. Eine unerwartete Reaktion des Probanden in Form eines Ausweichmanövers kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

<sup>7</sup> Kurvenschaar:  $\mu g = \sqrt{D^2 + (g \tan \varphi_{serve})^2}$

## 3.2 Probandenstudie Realfahrt

Die Probandenstudie dient der Überprüfung, inwiefern die Bremsprofile Block, Rampe und Impuls als vorbereitende Teilbremsung geeignet sind, um den Fahrer zur Transition in den bremsbereiten Zustand zu animieren. Hierbei ist es einerseits wichtig, den Fahrer möglichst schnell in die Bremsbereitschaft zu bringen, andererseits soll aber auch schon während der Transitionsphase möglichst viel Geschwindigkeit abgebaut werden. Dazu wird analysiert, wieviel Geschwindigkeit durch die einzelnen Bremsprofile im gleichen Betrachtungszeitraum abgebaut wird.

Bild 3-3 zeigt beispielhaft, wie ein Vergleich der verschiedenen Bremsprofile vorgenommen wird. Zu

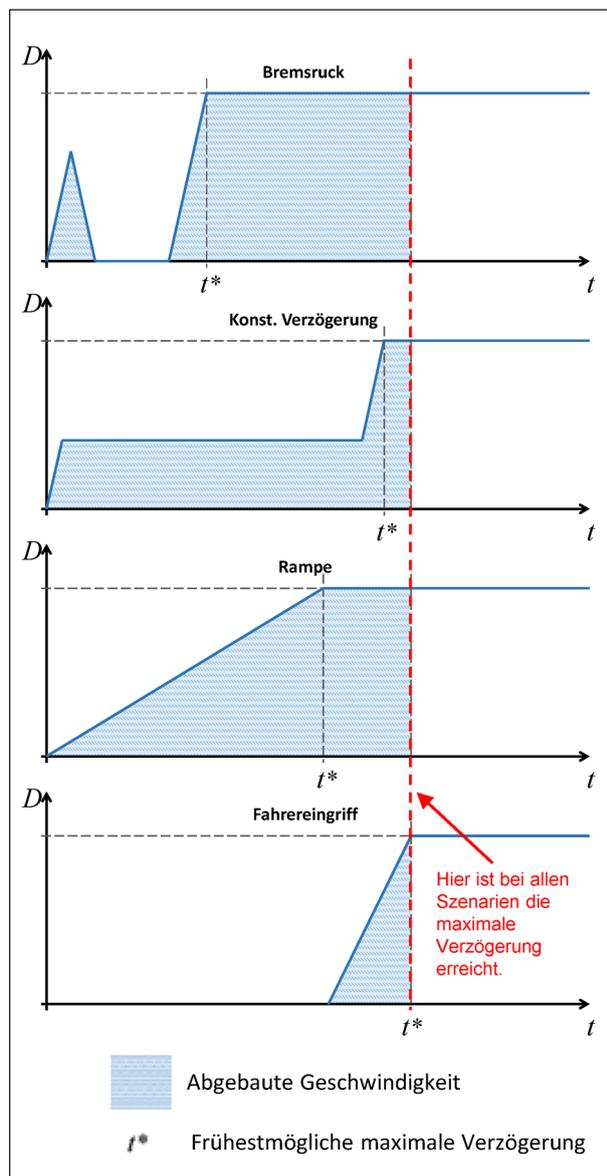


Bild 3-3: Vergleich der Bremsprofile

Beginn findet ein Ereignis statt, das eine Bremsung erfordert. In den ersten drei Diagrammen sind die vorbereitenden Teilbremsungen dargestellt.  $t^*$  markiert den Zeitpunkt, zu dem die Bremsbereitschaft beim Fahrer hergestellt ist und die maximale Verzögerung eingestellt werden kann. Es ist davon auszugehen, dass sich die Bremsprofile unterschiedlich auswirken und sich der Zeitpunkt, ab dem Bremsbereitschaft herrscht, je nach Art der Teilbremsung unterscheidet. Die längste Dauer bis zur Herstellung der Bremsbereitschaft wird erwartet, wenn keine vorbereitende Teilbremsung stattfindet (viertes Diagramm in Bild 3-3).

Neben dem Vergleich von  $t^*$  wird ein Betrachtungszeitraum festgelegt, in dem die abgebaute Geschwindigkeit verglichen wird. Hierzu wird das größte  $t^*$  herangezogen (in Bild 3-3  $t^*$  für den Fahreingriff). Die abgebaute Geschwindigkeit im betrachteten Zeitraum ist in Bild 3-3 durch eine blau schraffierte Fläche dargestellt. Der Bremseneingriff mit der größten abgebauten Geschwindigkeit (und damit auch kinetischen Energie) wird als am vielversprechendsten bewertet.

### 3.2.1 Szenario im Fahrversuch

Die Bremsung des Versuchsfahrzeugs erfolgt im Probandenversuch wie auch im Expertenversuch ferngesteuert. Um dem Probanden trotzdem ein realistisches Szenario zu bieten, folgt er während der Versuchsfahrt einem Vorderfahrzeug, das gleichzeitig mit der ferngesteuert ausgelösten Bremsung des Probandenfahrzeugs bremst. Ein Abbremsen des Probanden in freier Fahrt würde dem Testen von sogenannten false positives entsprechen, was insbesondere in der Subjektivbewertung die Akzeptanz beeinflussen kann. Durch das bremsende Vorderfahrzeug wird der Eingriff für den Probanden plausibel.

Bei dem Vorderfahrzeug handelt es sich um das Untersuchungswerkzeug EVITA (FECHER et al. 2015). Es handelt sich dabei um ein Dummy Target, das eingesetzt wird, um Auffahrsituationen zu simulieren, ohne den Probanden einem realen Kollisionsrisiko auszusetzen. Auf den Einsatz von EVITA im Rahmen der Studie wird in Kapitel 3.4.2 näher eingegangen.

### 3.2.2 Ablauf des Fahrversuchs

Zunächst erhält der Proband einen kurzen Fragebogen zur Erfassung der demografischen Daten und zu den Fahrgewohnheiten (Fragebogen Teil I – Allgemeine Informationen siehe Anhang A-2). Anschließend wird ihm die Aufgabe erklärt: Gefordert wird eine Folgefahrt hinter EVITA, bei der ein vorgegebener Abstand möglichst konstant eingehalten werden soll. Der Abstand wird dem Probanden dabei über ein Ampelsystem angezeigt (siehe Kapitel 3.4.2). Durch die vom Vorderfahrzeug vorgegebene Geschwindigkeit und den festgelegten Abstand wird sichergestellt, dass die Randbedingungen bei Auslösung der Bremsung für alle Probanden möglichst gleich sind. Die Versuche werden bei 70 km/h durchgeführt. Der geforderte Abstand liegt bei 30 m, was einer Zeittücke von ca. 1,5 s entspricht.

Der Proband erhält zunächst einige Runden zur Gewöhnung an die Aufgabe. Sobald er in der Lage ist, den korrekten Abstand konstant einzuhalten, erfolgt die erste ferngesteuerte Auslösung einer Bremsung. Unmittelbar nachdem der Proband zum stehen gekommen ist, wird er vom Versuchsleiter zum Eingriff befragt. Hierbei wird die Kontrollierbarkeit nach der Skala zur Bewertbarkeit der Kritikalität nach (NEUKUM et al. 2008) angewendet, die in Bild 3-4 dargestellt ist. Diese Skala ermöglicht es, zunächst eine grobe Einordnung in fünf Kategorien vorzunehmen (linke Seite in Bild 3-4), um anschließend eine feinere Einstufung innerhalb der Kategorien zu ermöglichen (rechte Seite in Bild 3-4). Die Skala basiert auf der Störungsbewertungsskala nach (NEUKUM u. KRÜGER 2003).

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
nichts bemerkt	1
	0

Bild 3-4: Skala zur Bewertung der Kritikalität nach (NEUKUM et al. 2008: S. 144)

Neben der Bewertung der Kontrollierbarkeit wird der Proband gebeten, allgemein zu beschreiben, wie er die Bremsung wahrgenommen hat. Die Befragung orientiert sich an folgenden Leitfragen (siehe Fragebogen Teil II – Fahrversuch in Anhang A-2):

- Beschreiben Sie bitte kurz die Notbremssituation. Gab es besondere Auswirkungen auf die Stabilität oder die Kontrolle des Motorrads? Wie haben sie reagiert? Was war die größte Herausforderung?
- Wie sind Sie auf die Notbremsung des Motorrads aufmerksam geworden?

Im Anschluss an die Befragung wird eine zweite Versuchsfahrt nach dem gleichen Schema durchgeführt. Nach einigen Fahrten ohne Auslösung wird eine zweite Bremsung ausgelöst. Hierbei wird ein anderes Bremsprofil als beim ersten Versuch gewählt. Auch hier wird der Proband nach der Bremsung nach dem zuvor erläuterten Schema befragt. Bei der Auswertung ist zu beachten, dass der Proband beim zweiten Versuch weniger unvoreingenommen als beim ersten Versuch ist. Die Daten von Erstkonfrontationen sind entsprechend höher zu gewichten.

Nach der Befragung zur zweiten Versuchsfahrt ist der praktische Teil des Fahrversuchs beendet. Abschließend bewertet der Proband in einem weiteren Fragebogen die erlebten Bremseingriffe. Außerdem wird er zu seiner allgemeinen Einstellung zu Assistenzsystemen im Motorrad befragt. Dieser Teil des Fragebogens ist ebenfalls in Anhang A-2 (Fragebogen Teil III – Abschließende Beurteilung) beigefügt.

### 3.3 Probandenstudie Simulator

Um kritischere Szenarien zu untersuchen werden zusätzlich zu den Fahrversuchen in Realfahrt Probandenversuche auf dem dynamischen DESMORI Motorrad-Fahrsimulator am Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften durchgeführt. Hier können Situationen untersucht werden, in denen der Proband nicht vollständig auf die Fahraufgabe fokussiert ist, sondern z. B. durch Nebenaufgaben abgelenkt wird.

Die Simulatorfahrten finden in einer simulierten Autobahnumgebung mit zwei Fahrstreifen in Fahrtrichtung statt. Die grundsätzliche Fahraufgabe besteht somit analog zu den Realfahrversuchen in



Bild 3-5: Folgefahrszenario mit Zielfahrzeug (weißer Pkw) im eigenen Fahrstreifen

der Folgefahrt zu einem Zielfahrzeug. Abweichend von den Realfahrversuchen (ca. 70 km/h) beträgt die Geschwindigkeit in der Fahrsimulatorstudie 100 km/h. In unregelmäßigen Abständen wird während der Durchführung der Fahraufgabe die Auffahrt auf ein verdecktes Stauende abgebildet, die das Zielfahrzeug zu einer Bremsung motiviert. Zeitgleich mit der Bremsung des Zielfahrzeuges wird auch die Bremsung des simulierten Motorrades eingeleitet. Dadurch wird – wie in den Realversuchen – verhindert, dass der Fahrer selbst die Bremsung beginnt. So wird gewährleistet, dass es sich stets um eine überraschende Bremsung handelt. Die maximale Verzögerung beträgt  $6 \text{ m/s}^2$ .

### 3.3.1 Ablenkung

#### Beidhändige Fahrt: Bedienaufgabe Display

Zur Simulation einer Ablenkung durch Fahrzeugbedienung, wie bspw. der Umstellung des Fahrmodus etc., wird der sog. Surrogate Reference Task (SuRT) gemäß ISO/TS 14198:2012 (ISO 2012) verwendet. Die Fahrzeugbedienung ist charakterisiert durch einen visuellen (z. B. Überprüfung des Systemstatus im Cockpit) und einen manuellen Anteil (z. B. Nutzereingaben an Bedienelementen). Der SuRT simuliert diese Beanspruchung unter kontrollierten Bedingungen. Ziel ist es, ein sog. Target (größerer Kreis) unter mehreren Distraktoren (kleinere Kreise) zu entdecken und zu markieren. Die Fahrer müssen dazu mittels zweier Tasten am Lenker einen Cursor (grauer Balken) in diskreten Stufen über das Target bewegen und mittels einer dritten Taste am Lenker bestätigen, dass sich das Target zu mehr als 50 % innerhalb des Balkens befindet (siehe Bild 3-6). Die Darstellung erfolgt im Cockpit des Motorrades.

Diese Nebenaufgabe wurde bereits in anderen Studien der Motorradforschung verwendet. Im Fokus stand hierbei die Absicherung von Anzeige Konzep-

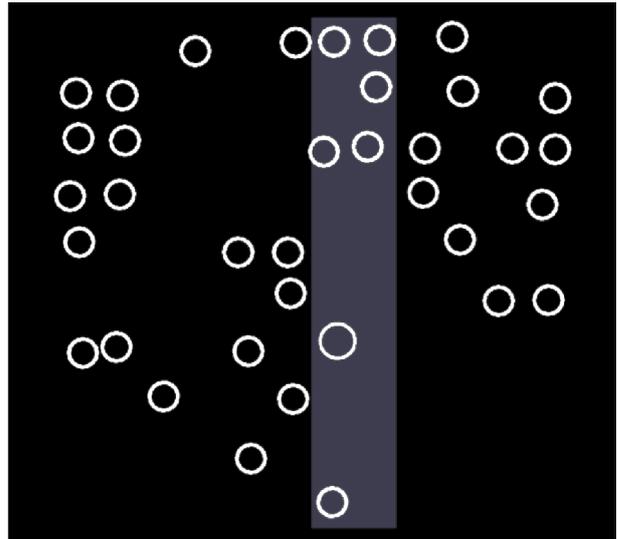


Bild 3-6: Surrogate Reference Task

ten zur Darstellung fahrfremder Informationen (GUTH 2017). Vorteil des Surrogate Reference Tasks ist die kontrollierbar veränderliche Schwierigkeit des visuellen Verarbeitungsprozesses durch Anzahl und Größe der Distraktoren bzw. des Targets. Diese Parameter zur Definition der Schwierigkeit wurden durch Vorversuche am Motorrad-Fahrsimulator in Abgleich mit der Beanspruchung von Bedieneingaben an drei Serienmotorrädern erarbeitet.

#### Einhändige Fahrt: Bedienung eines Navigationssystems

Das einhändige Fahren eines Motorrades birgt ein hohes Risiko bei automatisch ausgelösten Notbremsungen, da infolge der Bremsung unmittelbar Lenkbewegungen auf das Fahrzeug aufgebracht werden. Die Simulation einer Ablenkung mit einhändiger Fahrt wird durch Bedienung eines Anbaunavigationsgeräts erreicht. Der Proband wird dazu aufgefordert eine manuelle Zieleingabe am Gerät durchzuführen.

#### Freihandfahrt

Bei freihändiger Fahrt hat der Aufsasse eines Motorrades keine Möglichkeit auftretende Verzögerungskräfte über die Arme am Lenker abzustützen. Es ist somit davon auszugehen, dass hierbei im Falle einer starken Bremsung heftige Fahrerreaktionen auftreten werden. Die Probanden besitzen am Simulator die Möglichkeit einen Abstandsregeltem-pomaten zu aktivieren, der eine gleichbleibende Zeitlücke zum Zielfahrzeug einhält. Somit muss der

Aufsasse keine Bedienung des Gasgriffes mehr übernehmen, wodurch das freihändige Fahren über längere Streckenabschnitte ermöglicht wird.

### 3.3.2 Versuchsplan

Aus ökonomischer Sicht ist es nicht sinnvoll möglich einen Probanden nur ein einziges Mal in die zu untersuchende Notbremsituation zu bringen. Mehrfachauslösungen können jedoch zu einem Trainingseffekt führen, sodass der Proband bereits eine Auslösung der Notbremsung erwartet und nicht von dieser überrascht wird. Um die Auswirkungen dieses Effektes zu reduzieren, ist es notwendig, zwischen den Auslösungen mehrere Füllszenarien zu fahren – also das Bewältigen der Fahraufgabe ohne Betätigung der Notbremse. Hierbei ist es wichtig, dass keine Muster für den Probanden erkennbar sind (bspw. jeder dritte Test ist eine Notbremsung). Dazu wird für alle Probanden die Reihenfolge der zu testenden Szenarien randomisiert. Damit jede der möglichen Variationen – Bedienaufgabe Display Ablenkung (A), Bedienung Navigationssystem (B), Freihandfahrt (F), entweder mit (1) oder ohne (0) Warnung – bei einer Erstauslösung vorkommen kann, ergeben sich mit den Füllszenarien (f) sechs verschiedene Permutationen, die jeweils mit einer falsch-positiv Auslösung enden. Die randomisierten Versuchsabläufe sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Neben der Unvorhersehbarkeit von Testbedingungen durch Randomisierung, wird als Zielfahrzeug

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
#1	A0	Bf	Af	B1	F0	Af	Ff	Bf	F1	Ff	A1	Bf	B0	Af	Ff	BX
#2	A1	B1	Ff	Ff	Bf	F0	Af	B0	Bf	Af	A0	Ff	Af	F1	Bf	BX
#3	B0	Af	A1	Bf	Ff	B1	Af	F0	Bf	Af	Ff	A0	Bf	F1	Ff	BX
#4	B1	Ff	Af	F1	Bf	Af	B0	Ff	Af	Bf	A1	Ff	F0	Bf	A0	BX
#5	F0	Af	A1	Bf	Ff	Bf	B1	Ff	Af	F1	Ff	Bf	A0	Af	B0	BX
#6	F1	Bf	Ff	A0	B1	Bf	Af	F0	Ff	A1	Bf	Af	Ff	B0	Af	BX

Tab. 3-2: Randomisierter Versuchsplan

Phase	Dauer [min]
Einführung	10
Fahrsimulator Gewöhnungsphase	15
Training Nebenaufgaben	15
Testfahrt	40
Nachbefragung	10
<b>Gesamt</b>	<b>90</b>

Tab. 3-3: Simulatorstudienablauf

ein „Wilder Bremsen“ genutzt, der im gesamten Versuchsablauf teils hohe Verzögerungen – wenngleich keine Notbremsungen in den Stillstand – aufbringt. Damit bleibt es für den Probanden unvorhersehbar, wann nun tatsächlich eine Notbremsung auftritt. So kann unnatürlich übervorsichtiges Verhalten der Probanden minimiert werden.

Die Testfahrten gemäß den oben genannten Permutationen stellen den Hauptteil der Simulatorstudie dar. Je Proband ergibt sich inklusive Vor- und Nachbereitung der Testfahrt ein 90-minütiges Studienprogramm.

Die Vorbereitung enthält dabei einen Block, in dem die Probanden Gelegenheit haben, die nachfolgend erläuterten Nebenaufgaben zu erlernen, sodass während der eigentlichen Testfahrt ein stets besseres Abschneiden durch Lerneffekte reduziert werden kann.

### 3.3.3 Messinstrumente und Auswertung

Zur Analyse der Fahrer-Fahrzeugreaktion stehen alle Fahrereingaben (bspw. Lenkwinkel) sowie Fahrzeugdaten (z. B. Geschwindigkeit) zur Verfügung. Im Rahmen der Simulatorstudie wurde die subjektive Einschätzung der Probanden zu mehreren Zeitpunkten erhoben. Die Befragung lässt sich dabei in die Online-Befragung (Befragung während des Versuchs nach jedem Bremsenriff) und die Abschlussbefragung einteilen.

Im Rahmen der Online-Befragung wurde die Einschätzung der Probanden auf einer Skala zur Bewertung der Kritikalität (vgl. Bild 3-4), zur Bewertung des Eingriffs und zur Bewertung der erlebten Situation herangezogen. Im Falle von Bremsenriffen, die durch eine Warnung angekündigt wurden, wurden die Fahrer bezüglich des erlebten Nutzens der Warnung befragt. Im Falle von Bremsenriffen, die nicht durch eine Warnung angekündigt wurden, wurden die Fahrer bezüglich des hypothetischen Nutzens einer Warnung befragt. In beiden Fällen wurde hierfür die 5 x 3-stufige Kategorien-Unterteilungs-Skala mit zusätzlicher Nullkategorie herangezogen, siehe Bild 3-7 (HELLER 1985).

Nach Ende der Simulatorfahrt wurde eine Nachbefragung durchgeführt. In dieser wurden die Probanden hinsichtlich ihrer Beurteilung des Systems und der Warnung befragt (siehe A-5 Fragebogen Simulatorstudie).

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			stark			sehr stark		

Bild 3-7: Kategorien-Unteilungs-Skala (HELLER, 1985)



Bild 3-8: Versuchsfahrzeug Honda NC700X

### 3.4 Messwerkzeuge

#### 3.4.1 Messfahrzeug

Beim für die Fahrversuche eingesetzten Messfahrzeug handelt es sich um ein Motorrad des Modells NC700X der Marke Honda. Das Fahrzeug ist mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, die bereits erfolgreich in Probandenstudien erprobt wurde. Gemessen werden Fahrereingaben (Gasgriffstellung, Kupplungsweg, Bremsdrücke, Lenkwinkel- und Momente) und Fahrzeugbewegungszustände (6-Achsen-Inertialmesseinheit, Federwege, Raddrehzahlen, Motordrehzal, GPS).

Die für den Versuchsbetrieb besonders relevante Komponenten Brems- und Kupplungsaktor sowie die zusätzliche Messtechnik, die zur Erfassung der Transitionsdauer herangezogen werden soll, werden nachfolgend beschrieben.

#### Bremsaktor

Um ferngesteuert Bremsungen auslösen zu können, ist das Versuchsfahrzeug mit einem Bremsaktor ausgestattet, mit dem es möglich ist, die Hinterradbremse zu betätigen. Dazu greift ein Schrittmotor über eine Seilwinde am Fußbremshebel an. Durch das im Fahrzeug verbaute Combined Brake System (CBS) erfolgt gleichzeitig eine Teilbrem-



Bild 3-9: Bremsaktor

sung am Vorderrad. Mit diesem Aufbau ist sichergestellt, dass die ABS-Funktion erhalten bleibt und es dem Fahrer jederzeit möglich ist, unabhängig vom Aktor die Fußbremse zu betätigen.

Bild 3-9 zeigt den an der Soziusfußrastenhalterung montierten Aktor.

Der verbaute Schrittmotor liefert über ein Planetengetriebe der Übersetzung  $i = 5$  Haltemomente von bis zu 12,5 Nm und ist damit in der Lage, Bremsdrücke bis ca. 35 bar am Hauptbremszylinder der Hinterradbremse zu stellen. Diese erzeugen unter Verwendung des CBS auf trockener Fahrbahn Fahrzeugverzögerungen bis zu 0,7 g, womit der in Kapitel 3.1 beschriebene Versuchsablauf abgedeckt ist. Die bisherige Auslegung des Aktors in vorangegangenen Projekten verlangte eine weniger hohe Dynamik und niedrigere Bremsdrücke. Für die Anwendung im hier beschriebenen Projekt wurden Überarbeitungen hinsichtlich der Motoransteuerung durchgeführt, um die vorgesehenen Bremsprofile zu realisieren. Ein neu verbauter 12/48V DCDC-Wandler ermöglicht höhere Drehmomente im Vergleich zur Spannungsversorgung über das Bordnetz. Eine Neukonstruktion der Motorhalterung reduziert innere Reibung durch eine zusätzliche Wel-

lenlagerung. Zudem wird es durch einen Endschalter ermöglicht, den Leerweg des Aktors vor Bremsbeginn zu reduzieren.

Die Motorsteuerung kann über die Entwicklungsumgebung LabVIEW mit dem am Motorrad installierten Messsystem kommunizieren. In LabVIEW sind die verschiedenen Bremsstrategien (Ruck, Rampe, Block) programmiert und können im laufenden Betrieb ausgewählt und parametrisiert werden. Als Stellgröße für die Regelung des Drucks im Hauptbremszylinder wird eine Anzahl an Motorschritten verwendet. Dabei wird auf eine Positionierung relativ zur Istposition des Bremsaktors zurückgegriffen, da diese im Gegensatz zu einer absoluten Positionierung aus einer festgelegten Referenzposition nicht anfällig gegen Schrittverluste ist.

### Kupplungsaktor

Wie in Kapitel 3.1 erläutert, wird während der Durchführung einer automatisierten Bremsung die Kupplung getrennt, um eine bessere Bremswirkung zu erzielen und einen ungewollten Energieeintrag ins Fahrzeug durch unbeabsichtigte Eingaben am Gasgriff zu verhindern. Der Zustand der geöffneten Kupplung beschreibt für den Versuch einen „sicheren Zustand“, da keine Zugkraft mehr übertragen werden kann. Dieser sichere Zustand ist konsequenterweise im Fehlerfall sowie im stromlosen Zustand zu erreichen. Des Weiteren wird beim Abbremsen bis in den Stillstand durch ein automatisches Öffnen der Kupplung sichergestellt, dass der Motor weiterläuft und somit die Spannungsversorgung der Messtechnik durchgehend sichergestellt ist.

Im Rahmen des Projekts wurde ein entsprechender Kupplungsaktor entwickelt. Die Konstruktion besitzt als Energiespeicher eine vorgespannte Feder, die durch zwei Elektromagnete gehalten wird. Sind die Magnete stromlos, entspannt sich die Feder und betätigt über ein Drahtseil den Ausdrückbolzen der Kupplung. Im bestromten/vorgespannten Zustand hängt das Drahtseil spannungsfrei zwischen Aktor und Ausdrückbolzen, sodass die manuelle Betätigung der Kupplung störungsfrei möglich ist. So ist es Probanden möglich vor einer Auslösung der Bremsung normal zu beschleunigen und zu schalten. Erst nach einer automatisierten Betätigung von Bremse und Kupplung ist keine Fahrerbetätigung mehr möglich. Der Aktor und seine Funktionsweise sind in Bild 3-10 dargestellt.

Bild 3-11 zeigt den Aktor in eingebautem Zustand.

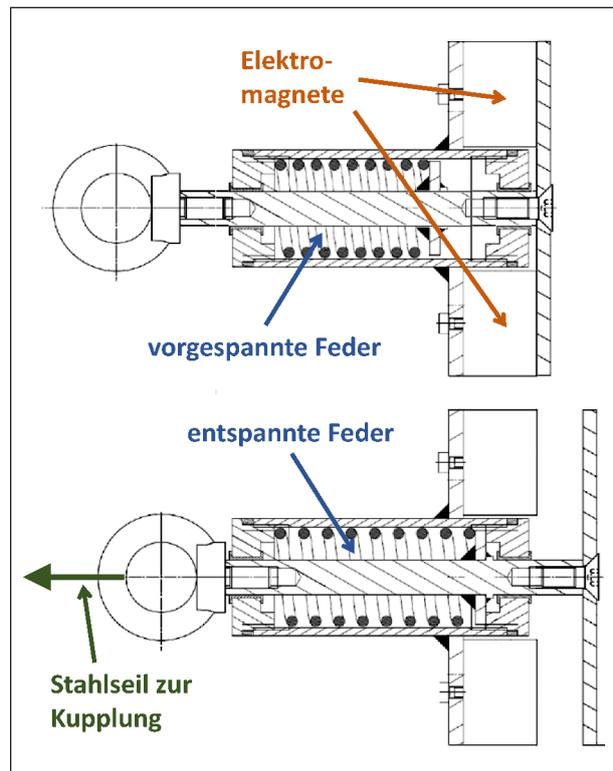


Bild 3-10: Aufbau des Bremsaktors

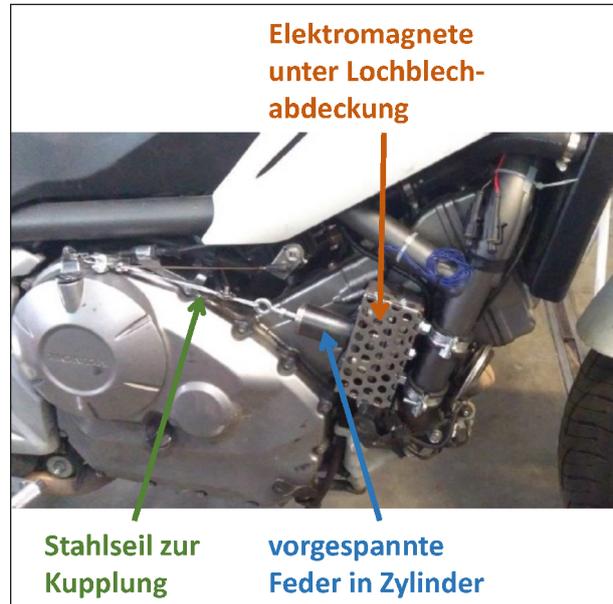


Bild 3-11: Bremsaktor im eingebauten Zustand

### Weitere Sensorik

#### Lenkerabstützkraft

Das Messmotorrad ist bereits mit Dehnmessstreifen zur Lenkmomentenmessung ausgerüstet. Diese messen die Dehnung der Lenkstange senkrecht zur Lenkachse in Fahrtrichtung positiv ( $F_{\text{Lenk}}$  in Bild

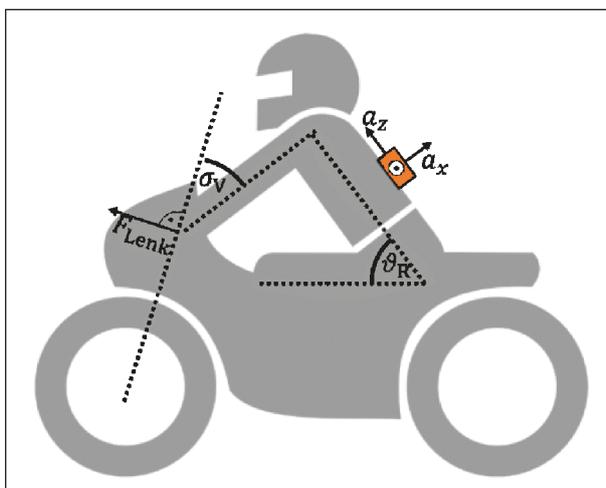


Bild 3-12: Geometrische Größen

3-12) und nahe der Einspannung an der oberen Gabelbrücke. Durch vorzeichenverkehrte Addition der gemessenen Spannungen am linken und rechten Lenkerende wird anstelle des Lenkmomentes der senkrecht zur Lenkachse stehende Anteil der Abstützkraft des Fahrers ermittelt. Für die im vorliegenden Projekt angestrebten Ergebnisse wird eine Kenntnis über die erreichte Maximalkraft in den Armen des Probanden nicht zwingend benötigt. Stattdessen wird das dynamische Verhalten des Kraftanstiegs, der auf eine unvorhergesehene Verzögerung folgt, betrachtet. Zur Bestimmung von Tot- und Schwellzeiten kann auf eine Korrektur um den Abstützwinkel ( $\sigma_V$  in Bild 3-12) verzichtet werden.

### Fahreroberkörperbeschleunigung

Neben der Abstützung des Fahrers am Lenker wird eine Bewegungsgröße des Fahreroberkörpers zur Bewertung des Fahrerhaltens herangezogen. Von der Nutzung von Seilzugpotenziometern wurde abgesehen, um eine Anbindung des Fahrers an das Fahrzeug und eine damit verbundene Irritation des Fahrers durch Zugkräfte zu vermeiden. Optische Messsysteme (Stereokamera von hinten, oder Monokamera von der Seite) sind anfällig gegenüber Schwingungen in der Kameralagerung und erfordern u. a. einen hohen Aufwand zur Kalibration. Daher wird auf einen Beschleunigungssensor zur Erfassung der Fahrerbewegung zurückgegriffen.

Ein dreiachsiger, analoger Beschleunigungssensor mit einem Messbereich von  $\pm 1,5 g$  wird über eine magnetische Halteplatte auf einem über die der Schutzkleidung getragenen Rückenprotector montiert, sodass keine feste Anbindung des Fahrers am



Bild 3-13: Rückenprotector mit Beschleunigungssensor

Motorrad erzeugt wird (Bild 3-13). Unter Annahme eines konstanten Fahrerbeugungswinkels ( $\vartheta_R$  in Bild 3-12) errechnet sich die Fahrerlängsbeschleunigung  $a_{x,R,V}$  im Fahrzeugkoordinatensystem zu

$$a_{x,R,V} = [a_{x,R,R} + g \cdot \cos(\vartheta_R - \vartheta_V)] \cdot \sin(\vartheta_V) + [a_{z,R,R} + g \cdot \sin(\vartheta_R - \vartheta_V)] \cdot \cos(\vartheta_R)$$

Mit den Beschleunigungen des Sensors im Fahrerkoordinatensystem  $a_{i,R,R}$  und dem Fahrzeugnickenwinkel  $\vartheta_V$ . Durch die gewählte Transformation in das Fahrzeugkoordinatensystem ist eine direkte Vergleichbarkeit der Fahrer- und Fahrzeuglängsbeschleunigung gegeben.

Mithilfe der gemessenen Oberkörperbeschleunigung kann ermittelt werden, wie sich der Fahrer relativ zum Fahrzeug bewegt. Als Referenzwert dient die Beschleunigung (Verzögerung) des Fahrzeugs aus der Inertialsensorik. Es ist zu erwarten, dass die Oberkörperbeschleunigung des Fahrers der des Fahrzeugs umso direkter folgt, je besser er sich am Fahrzeug abstützen kann (durch Abstützung über die Arme sowie über Knieschluss und Rumpfmuskulatur). Bei einer (theoretisch) starren Sitzhaltung würde die Oberkörperverzögerung der Verzögerung des Fahrzeugs entsprechen.

### 3.4.2 EVITA

#### Funktionweise von EVITA

Bei EVITA handelt es sich um ein Dummy Target in Form eines Anhängers, der über eine Seilwinde an ein Zugfahrzeug gekoppelt ist (Bild 3-14). Der Proband folgt dem Gespann mit einem vorgegebenen Abstand. Der Abstand wird mittels Radar gemessen und dem Probanden mithilfe einer Ampel angezeigt, die am Anhänger angebracht ist. Bei einer Auslösung wird die Seilwinde geöffnet und der Anhänger



Bild 3-14: EVITA mit Zugfahrzeug

abgebremst. Dabei bleibt das Dummy Target über das abgerollte Seil stets mit dem Zugfahrzeug verbunden, während das Zugfahrzeug sich mit der Anfangsgeschwindigkeit (bei Auslösung) weiterbewegt.

Wird während des Abbremsens des Anhängers eine definierte TTC (Time-to-Collision) – durch ausbleibenden oder zu geringen/zu späten Bremseneingriff des folgenden Fahrzeugs – unterschritten, wird die Seilwinde geschlossen und das Dummy Target wird wieder auf die Geschwindigkeit des Zugfahrzeugs beschleunigt und vom Probandenfahrzeug weggezogen, ohne dass eine kritische Situation entsteht.

### Einsatz von EVITA im Rahmen der Probandenstudien

Im Rahmen der Probandenstudie im vorliegenden Projekt soll EVITA nicht genutzt werden, um eine Notbremsung hervorzurufen. Das Versuchsfahrzeug ist nicht mit einem automatischen Notbremsystem ausgestattet und es ist nicht erwünscht, dass der Proband selbst eine Bremsung durchführt. Vielmehr soll untersucht werden, wie ein Motorrad auf eine unerwartete, aber berechtigt erscheinende Bremsung des Fahrzeugs reagiert. Somit darf die Bremsung von EVITA nicht vor der Bremsaktuierung am Fahrzeug erfolgen. Der Proband soll nicht die Gelegenheit haben, auf das Abbremsen von EVITA zu reagieren. Trotzdem ist der Einsatz des Dummy Targets für die Versuche wichtig. Das Fahrzeug eines frei fahrenden Probanden ferngesteuert abzubremesen, würde ein Testen von falsch positiven Auslösungen darstellen. Wird das Probandenfahrzeug unerwartet abgebremst und der Proband stellt fest, dass das vorausfahrende Fahrzeug auch gebremst hat, erscheint ihm die Bremsung des eigenen Fahrzeugs berechtigt. Au-

ßerdem liefert EVITA in den Versuchen die Aufgabe für die Probanden. Sie werden angewiesen, dem Anhänger in einem vorgegebenen Abstand zu folgen und sollen diesen so gut wie möglich einhalten. Erst bei der Erstauslösung der Bremsung nach einigen Wiederholungen der Abstandsaufgabe wird somit der tatsächliche Grund für die Studie ersichtlich.

Bei EVITA handelt es sich um ein in sich abgeschlossenes und jahrelang bewährtes System. Um für die synchrone Auslösung von EVITA und der Bremsung des Motorrades keine Änderungen an der Systemarchitektur vornehmen zu müssen, wird die Bremsung am Messmotorrad durch einen zusätzlich an EVITA installierten Taster samt Funkfernbedienung getriggert. Der Taster ist so montiert, dass er bei ungebremseter Fahrt gedrückt gehalten wird. Wird die Bremse von EVITA schließlich betätigt, wird der Taster gelöst. Das damit ausgelöste Funk-signal wird über einen Funkempfänger in das am Motorrad verbaute Messsystem gespeist. Weitere Schnittstellen werden nicht benötigt.

### 3.4.3 Gesamtsystem

Der Gesamtaufbau des Messmotorrads ist dem Bild 3-15 dargestellten Plan zu entnehmen. Die abgebildete Messkarte vereint sämtliche Analog- und Digitalkanäle. Der angeschlossene Funkempfänger reagiert auf die beiden Fernbedienungen, die wahlweise in EVITA verbaut sind oder manuell betätigt werden können. Die Messkarte wird ebenso wie der Inertialsensor (MTiG) und die Motorsteuerung (SMCI 35) vom Messrechner über die Entwicklungsumgebung LabVIEW bedient. Darin sind sämtliche Regler, Steuerungslogiken, sowie die Datenaufzeichnung integriert.

### 3.4.4 Simulator

Der DESMORI Motorrad-Fahrsimulator dient zur Untersuchung von Notbremsszenarien, bei denen der Anfangszustand bei Auslösung der Bremsung vom Ideal (Aufmerksamkeit des Fahrers voll der Fahraufgabe gewidmet, beidarmige Anbindung an den Lenker) abweicht. Diese Abweichungen werden im Versuch durch drei unterschiedliche Szenarien (Ablenkung, Bedienung, Freihandfahren) erzeugt. Dabei wird wiederum zwischen Bremsungen mit und ohne vorhergehende Warnung unterschieden.

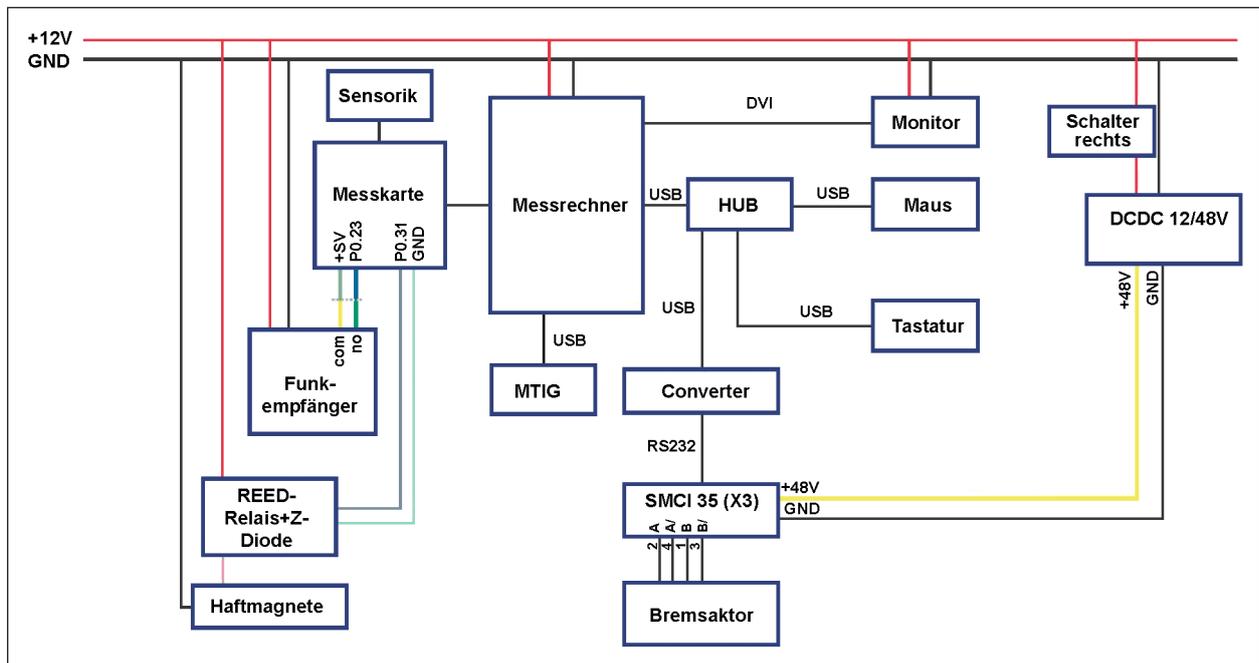


Bild 3-15: Anschlussplan

## Aufbau

Die visuelle Darstellung der simulierten Umgebung im DESMORI Motorrad-Fahrsimulator erfolgt über eine zylindrische Projektion (220° horizontaler Sichtwinkel, 3 m Höhe). Die Darbietung akustischer Reize übernehmen im Helm verbaute Lautsprecher. Der Fahrsimulator verfügt zudem über eine 6-Achsen-Bewegungsplattform (Hexapod), die unter anderem der Darstellung von Roll-, Nick- und Gierbewegungen dient. Ergänzend zur Bewegungsdarstellung durch den Hexapoden erhält der Proband eine Rückmeldung zu Beschleunigungen und Verzögerungen des simulierten Fahrzeugs. Diese erfolgt über ein Seilzugsystem, das Zugkräfte von bis zu 300 N in positive und negative Längsrichtung aufbringen kann. Dadurch ist der Simulator in der Lage, auch über mehrere Sekunden andauernde Beschleunigungen und Verzögerungen mit einer hohen Immersion abzubilden. Dies ermöglicht es, trotz eingeschränkter Längsbewegung des Hexapoden, auch Notbremsmanöver auf dem Simulator darzustellen.

Die Steuerung des Simulators erfolgt durch Lenk- und Lehneingaben. Über eine Rollmomentenerfassung ist der Proband in der Lage, das virtuelle Fahrzeug auch freihändig durch Gewichtsverlagerung zu kontrollieren.

Als Cockpit wird ein TFT-Display mit einer Bildschirmdiagonale von 10" verwendet. Auf diesem



Bild 3-16: DESMORI Motorrad-Fahrsimulator

können dem Fahrer Nebenaufgaben dargeboten werden, die als Ablenkung von der Fahraufgabe dienen. Eine Bedienung durch den Fahrer findet dabei über vorhandene Lenkerschalter und -taster statt.

Des Weiteren ist am Lenker ein Navigationsgerät aus dem Motorradzubehör montiert, das den Fahrer

zwingt, eine Hand vom Lenker zu lösen, um Eingaben am Gerät durchführen zu können.

Durch die Längskraftsimulation mittels Seilzugsystem, die Freihandsteuerung mittels Rollmoment-erfassung sowie die verbauten Mensch-Maschine-Schnittstellen ist der Simulator hardwareseitig in der Lage, automatische Notbremsungen in den zuvor genannten Szenarien abzubilden.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Expertenstudie<sup>8</sup>

Die Expertenstudie wurde mit fünf Testpersonen auf dem Testgelände der TU Darmstadt auf dem August-Euler-Flugplatz in Griesheim durchgeführt. Es handelt sich bei den Teilnehmern um Fahrlehrer und Fahrtrainer, von denen drei schwerpunktmäßig in Fahrschulen tätig sind, also Fahranfänger unterrichten, während zwei hauptsächlich Trainings (Sicherheits-, Kurven-, Rennstreckentraining) anbieten. So ist sichergestellt, dass die Experten ein breites Spektrum an Fahrern kennen und einschätzen können. Jeder Proband durchlief Versuche mit allen drei Bremsprofilen bei 45 km/h, 70 km/h und 90 km/h. Die Probanden wurden nach jeder einzelnen Bremsung zu ihrer subjektiven Bewertung der Bremsung sowie zu ihrer Einschätzung bezüglich der Kontrollierbarkeit für Normalfahrer befragt.

#### 4.1.1 Kontrollierbarkeit für Normalfahrer

Die Bewertung der Kontrollierbarkeit für Normalfahrer erfolgte durch eine Befragung im direkten Anschluss nach jeder einzelnen Bremsung, um möglichst unverfälschte Eindrücke des Experten zu erhalten. Die Bewertungsmöglichkeiten waren hierbei zumutbar und nicht zumutbar. Sie werden im Folgenden durch die Symbole „✓“ (zumutbar) und „✗“ (nicht zumutbar) repräsentiert. An einigen Stellen zeigte sich, dass die Experten Bremsungen als noch zumutbar, aber nah an der Grenze einstufen. Diese Einstufung wird bei der Auswertung weiter als zumutbar gewertet, wird in der Darstellung jedoch als „(✓)“ gekennzeichnet.

<sup>8</sup> Die Ergebnisse bis einschließlich Kapitel 4.1.3. wurden erstmals im Rahmen der Konferenz des Instituts für Zweiradsicherheit am 01./02.10.2018 in Köln veröffentlicht: MERKEL et al. (2018).

Die Kontrollierbarkeit für Normalfahrer wurde bei einer Startgeschwindigkeit von 70 km/h bewertet, da diese Geschwindigkeit auch als Versuchsgeschwindigkeit für die Probandenstudie vorgesehen ist. Die Startgeschwindigkeit wird von den Expertenfahrern nach Tachoanzeige eingestellt. Durch die Tachosabweichung liegen die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten bei ca. 62 bis 63 km/h.

### Blockbremsung

Bei der Blockbremsung wird der Bremsdruck mit der maximal durch den Bremsaktor realisierbaren Geschwindigkeit aufgebaut. Der Aufbau von 30 bar Bremsdruck am hinteren Hauptbremszylinder geschieht in ca. 0,2 s. Die Kupplungsbetätigung erfolgt 0,1 s vor Bremsdruckaufbau. Der Bremsdruck wird bis zum Stillstand des Fahrzeugs aufrechterhalten. Ein Beispiel für eine Zielverzögerung von  $5 \text{ m/s}^2$  aus (nominellen) 70 km/h ist in Bild 4-1 dargestellt.

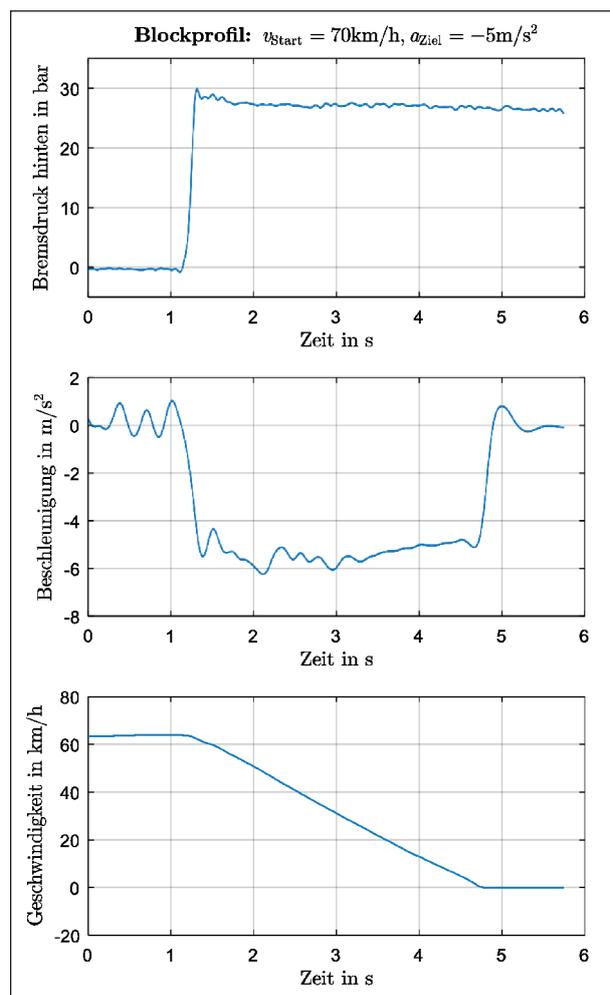


Bild 4-1: Verzögerung Profil „Bremsblock“ mit  $5 \text{ m/s}^2$  aus Zielgeschwindigkeit 70 km/h

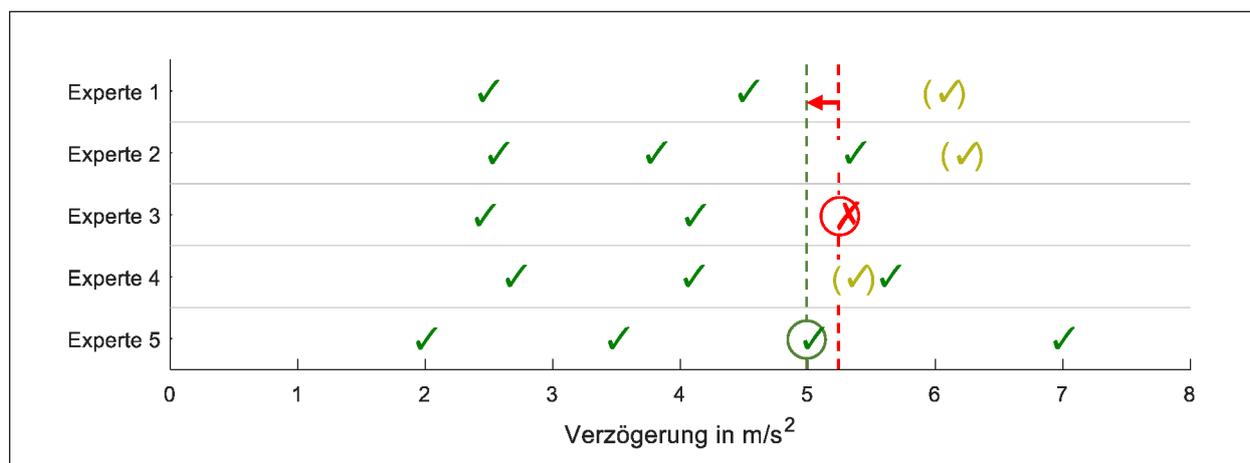


Bild 4-2: Zumutbarkeitsbewertung des Blockprofils bei 70 km/h (Tachoanzeige)

Ausgehend von einer Verzögerung von 2 bis 2,5 m/s<sup>2</sup> wurden die Experten Bremsungen ausgesetzt, die sie im direkten Anschluss mit zumutbar und nicht zumutbar bewerteten. Die Bewertung bezieht sich hierbei immer auf einen unvorbereiteten Normalfahrer, der vom Eingriff überrascht wird. Es wurden von Bremsung zu Bremsung höhere Verzögerungen eingestellt. Die Zumutbarkeitsbewertung für das Blockprofil für eine Ausgangsgeschwindigkeit von 70 km/h kann Bild 4-2 entnommen werden.

Um die Grenze für zumutbare Verzögerungen für Normalfahrer festzulegen, wird zunächst die kleinste als nicht zumutbar bewertete Verzögerung ermittelt. Ausgehend von dieser Verzögerung wird die nächstkleinere als zumutbar bewertete Verzögerung identifiziert. Diese stellt die maximal für unvorbereitete Fahrer zumutbare Verzögerung dar. Für das Blockprofil ergibt sich eine maximal zumutbare Verzögerung von 5 m/s<sup>2</sup>. Das Vorgehen ist in Bild 4-2 skizziert.

Zusätzlich zur Bewertung der Zumutbarkeit hatten die Experten die Möglichkeit, eine Subjektivbewertung zu jeder Bremsung abzugeben. Hierbei sollten keine zusätzlichen Erkenntnisse bezüglich der Zumutbarkeit generiert werden, vielmehr dient die Subjektivbewertung der Dokumentation zusätzlicher Effekte, die einen positiven oder negativen Einfluss auf das Erreichen der Bremsbereitschaft beim Fahrer haben. Bei der Blockbremsung zeigte sich insbesondere, dass bereits das Öffnen der Kupplung und das damit einhergehende Wegfallen der Zugkraft die Aufmerksamkeit des Aufsassen fördert. Der Effekt wird durch das Hochschnellen der Motordrehzahl, das aus der noch nicht zurückgestellten Gasgriffstellung resultiert, verstärkt. Es wurde außerdem geäußert, dass die beginnende Ver-

zögerung ein reflexartiges Greifen zu Kupplungs- und Bremshebel hervorruft. Die beschriebenen subjektiven Eindrücke der Experten weisen darauf hin, dass die Blockbremsung helfen kann, Bremsbereitschaft beim Aufsassen herzustellen. Ob der Effekt für unvorbereitete Normalfahrer in gleicher Weise zutrifft, bleibt im Rahmen der anschließenden Probandenstudie mit einem größeren Teilnehmerkollektiv nachzuweisen.

Weiterhin stellte sich heraus, dass von manchen Experten stärkere Bremsungen sogar als angenehmer wahrgenommen wurden, da hier die Aufforderung an den Fahrer zu bremsen deutlicher wird.

### Bremsrampe

Zur Bewertung des Profils Bremsrampe wird eine Zielverzögerung von 5,5 m/s<sup>2</sup> mit verschiedenen Gradienten aufgebaut und hinsichtlich der Zumutbarkeit für unvorbereitete Normalfahrer bewertet. Analog zur Blockbremsung wird auch hier die Kupplung 0,1 s vor Bremsdruckaufbau geöffnet. Bild 4-3 zeigt eine Bremsung des Profils Rampe einer Zielgeschwindigkeit von 90 km/h mit einem Gradienten von 3 m/s<sup>3</sup>. Systembedingt zeigt der Bremsdruck ein progressives Verhalten beim Anstieg. Der Effekt wird insbesondere bei niedrigen Gradienten deutlich, wie dem Bremsdruckverlauf in Bild 4-3 (oben) zu entnehmen ist.

Auch hier erfolgt die Bewertung nach zumutbar und nicht zumutbar. Wie Bild 4-4 zeigt, wurde im Fall des Profils Rampe keine Bremsung als nicht zumutbar eingeordnet, obwohl die maximal erreichte Verzögerung auf dem Plateau im Mittel mit 5,5 bis 6 m/s<sup>2</sup> höher liegt, als die maximal zumutbare Verzögerung beim Blockprofil. Die Geschwindigkeit

des Verzögerungsaufbaus scheint also einen messbaren Einfluss auf die maximal als zumutbar eingestuftes Verzögerungen zu haben.

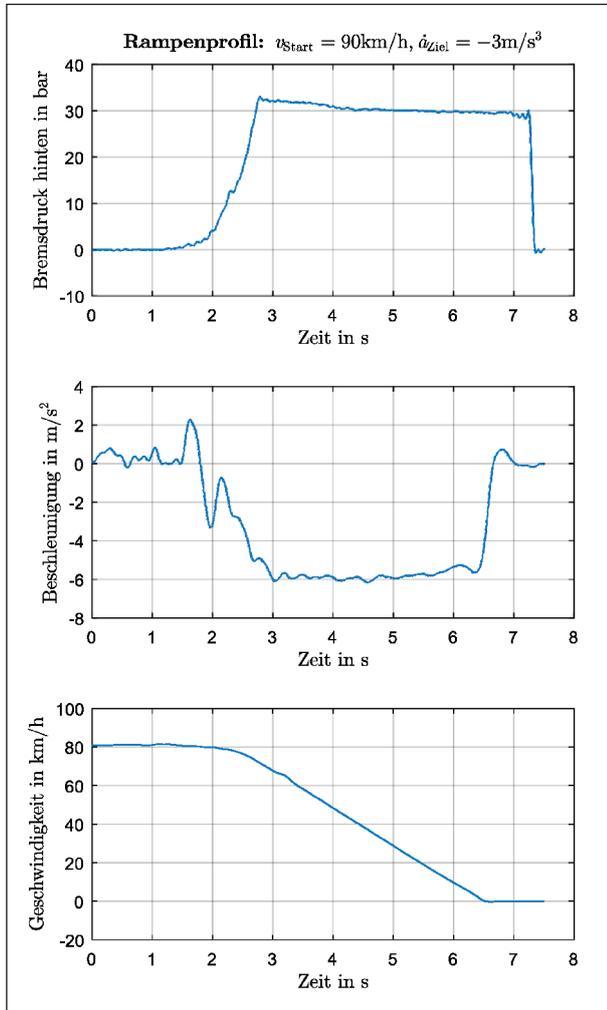


Bild 4-3: Verzögerung Profil Rampe mit Gradient 3  $\text{m/s}^3$  aus Zielgeschwindigkeit 90  $\text{km/h}$

Die Experten schätzten Verzögerungsgradienten zwischen 2,7 und 11,6  $\text{m/s}^3$  durchweg als für unvorbereitete Normalfahrer zumutbar ein. Davon ausgehend, dass also alle Gradienten in diesem Bereich zumutbar sind, ist vor dem Hintergrund, dass mit einem Notbremsystem ein möglichst großer Geschwindigkeitsabbau angestrebt wird, ein großer Gradient für die Probandenstudie zu wählen. Da es sich bei den 11,6  $\text{m/s}^3$  bei Experte 5 allerdings um einen systembedingten Ausreißer<sup>9</sup> handelt, der aus den gleichen Einstellungen wie die höchsten Gradienten bei Experte 2 und 4 resultieren, wird für die Probandenstudie der nächstniedrigere Gradient von 9,1  $\text{m/s}^3$  festgelegt.

Die Subjektivbewertung zeigte, dass insbesondere bei niedrigen Gradienten der sehr langsame Bremsdruckanstieg nach Öffnen der Kupplung irritierend ist, da die Zugkraft wegfällt, die Situation aber nicht sofort als Bremsengriff verstanden wird. Zusätzlich negativ wurde bei niedrigen Gradienten der progressive Anstieg des Bremsdrucks wahrgenommen. Hierbei muss der Fahrer die Abstützung seiner Oberkörperbewegung kontinuierlich einem nichtlinearen Verzögerungsverlauf anpassen. Die kürzere Anpassungsphase bei stärkeren Gradienten wurde als einfacher umsetzbar beschrieben. Zusätzlich zum Vorteil des stärkeren Geschwindigkeitsabbaus spricht also auch die Subjektivbewertung für die Anwendung höherer Gradienten für das Rampenprofil.

<sup>9</sup> Der Motor zur Bremsbetätigung stellte sich nach der vorherigen Bremsung nicht korrekt zurück und erreichte dadurch einen höheren Zielwert, als vorgesehen.

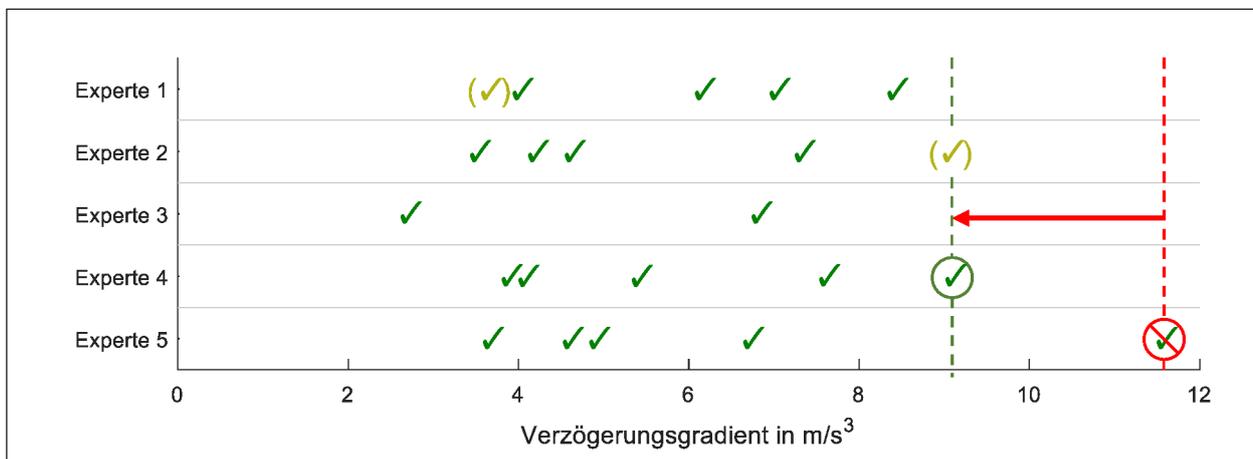


Bild 4-4: Zumutbarkeitsbewertung des Rampenprofils bei 70  $\text{km/h}$  (Tachoanzeige)

Im Vergleich von Block- und Rampenprofil zeigte sich, dass die Experten sich bezüglich einer Präferenz nicht einig wurden. Teilweise wurde die Rampe als besser geeignet bewertet. Argument war hierbei, dass der Fahrer mehr Zeit hat, sich auf die Bremsung einzustellen als beim Blockprofil. Im Gegensatz dazu bewerteten andere Experten die Blockbremsung besser, was damit begründet wurde, dass sofort klar wird, dass das Fahrzeug eigenständig bremst und so schneller reagiert werden kann. Es bleibt abzuwarten, ob sich diese gegensätzlichen Subjektivbewertungen auch im Probandenversuch mit unvorbereiteten Normalfahrern zeigen.

### Bremsimpuls

Beim Bremsimpuls wird der aufgebaute Bremsdruck nicht gehalten, sondern direkt wieder abgebaut. Im Gegensatz zu den beiden zuvor beschriebenen Profilen, wird hierbei die Kupplung nicht geöffnet und es erfolgt keine Verzögerung in den Stand. Wie Bild 4-5 zeigt, ist der Bremsimpuls im Geschwindigkeitsverlauf erkennbar, führt jedoch nicht wie bei den Profilen Block und Rampe zu einem deutlichen Geschwindigkeitsabbau.

Die Bestimmung der Grenze der Zumutbarkeit für unvorbereitete Normalfahrer für das Profil Impuls erfolgt analog zur Blockbremsung. Die niedrigste als nicht zumutbar bewertete Verzögerung liegt bei 5,6 m/s<sup>2</sup>. Die nächstniedrigere als zumutbar bewertete Verzögerung liegt bei 4,7 m/s<sup>2</sup>. Hier liegt somit die maximal zumutbare Verzögerung für den Ruck bei einer Startgeschwindigkeit von 70 km/h.

Die Subjektivbewertung ergab, dass beim Bremsimpuls durch das fehlende Öffnen der Kupplung bei

niedrigen Verzögerungen von 2 bis 3 m/s<sup>2</sup> der Eingriff kaum zuzuordnen war. Mehrere Experten meldeten zurück, dass der Bremsimpuls kaum von einer Bodenwelle zu unterscheiden sei. Stärkere Impulse wurden dahingegen als sehr geeignete War-

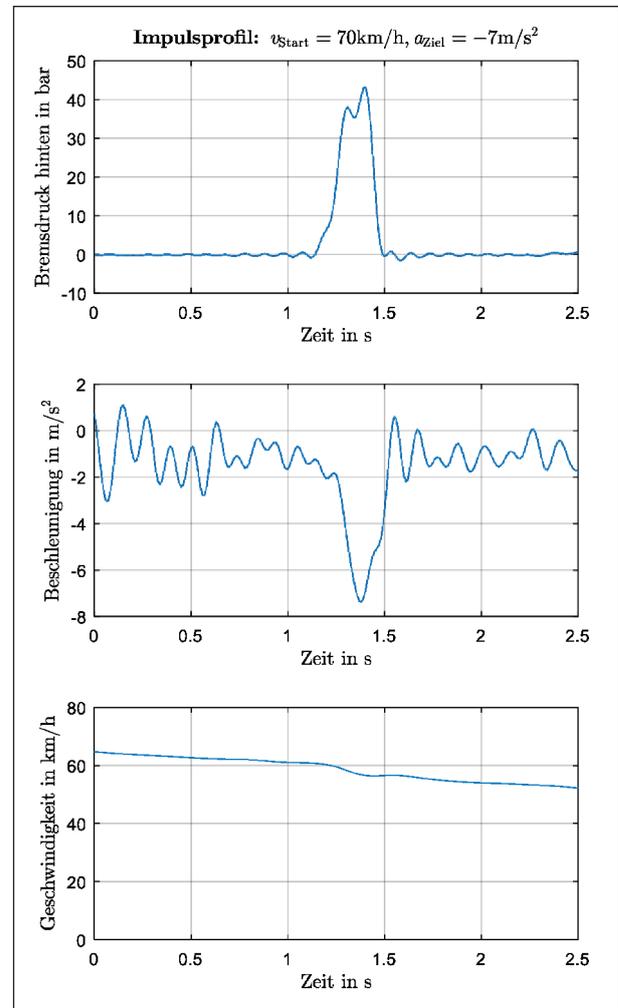


Bild 4-5: Verzögerung Profil Impuls mit 7 m/s<sup>2</sup> aus Zielgeschwindigkeit 70 km/h

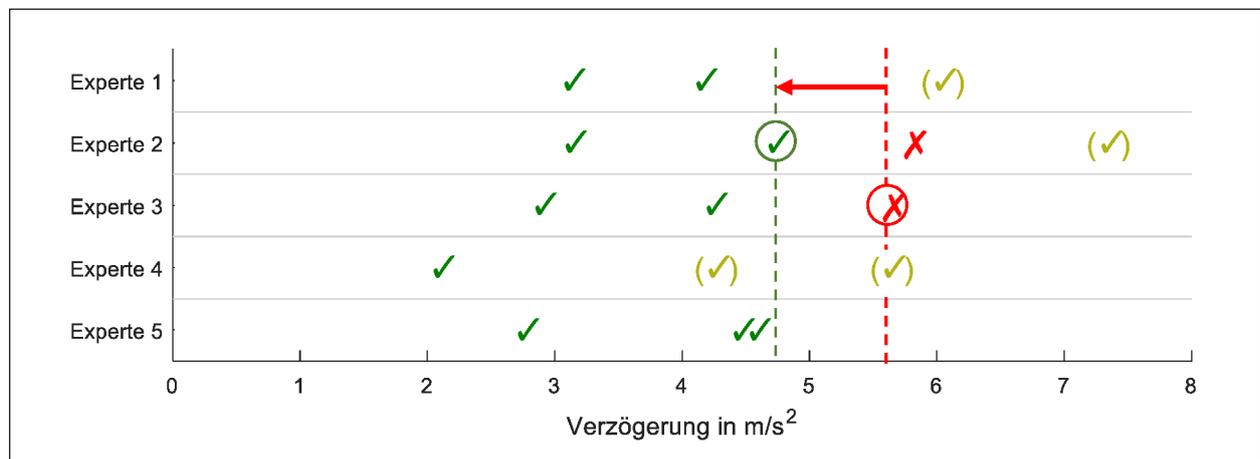


Bild 4-6: Zumutbarkeitsbewertung des Impulsprofils bei 70 km/h (Tachoanzeige)

nung oder Aufforderung zum Bremsen wahrgenommen. Es wurde jedoch auch angemerkt, dass der Impuls den größten Überraschungseffekt hat und damit am meisten Gefahr für eine fehlerhafte Reaktion des Fahrers birgt.

Eine Auffälligkeit, die außerdem beobachtet wurde, besteht in der Oberkörperbewegung. Der Oberkörper wird – wie bei Blockbremsung und Rampe auch – während der Bremsung nach vorne verlagert. Durch das sofort darauffolgende Nachlassen der Bremsung folgt eine Oberkörperbewegung nach hinten relativ zum Fahrzeug. Hier wurde angemerkt, dass diese Rückverlagerung des Oberkörpers insbesondere bei mittleren Verzögerungen genau in dem Moment stattfindet, in dem der Fahrer als Reaktion auf den Eingriff zu Kupplung und Bremse greifen möchte. Diese durchaus gewünschte Reaktion wird dadurch verhindert, dass die Rückverlagerung des Oberkörpers durch Festhalten am Lenker abgefangen werden muss. Bei höheren Verzögerungen wurde der beschriebene Effekt nicht mehr wahrgenommen, da hier eine stärkere Oberkörperverlagerung stattfindet, die genügend Zeit für die gewünschte Reaktion lässt.

In der anschließenden Probandenstudie ist hier ein Augenmerk auf störende Einflüsse durch den Eingriff durch einen Bremsimpuls zu legen.

#### 4.1.2 Parametrierung Probandenstudie

Mit der Zumutbarkeitsbewertung durch die Normalfahrer wurden für die drei Bremsprofile Blockbremsung, Bremsrampe und Bremsimpuls Verzögerungen bzw. Verzögerungsgradienten ermittelt, die einem unvorbereiteten Normalfahrer bei einer nominellen Ausgangsgeschwindigkeit von 70 km/h maximal zugemutet werden können. Die ermittelten Maximalwerte sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Die ermittelten Parameter dienen als Grundlage für eine nachfolgende Probandenstudie (Kapitel 4.2), in der ermittelt werden soll, inwiefern die untersuch-

Bremsprofil	Variierter Parameter	Ermittelter Maximalwert
Blockbremsung	Verzögerung	5 m/s <sup>2</sup>
Bremsrampe	Verzögerungsgradient	9,1 m/s <sup>3</sup>
Bremsimpuls	Verzögerung	4,7 m/s <sup>2</sup>

Tab. 4-1: Zumutbarkeit der verschiedenen Bremsprofile bei 70 km/h

ten Bremsprofile als vorbereitende Teilbremsung geeignet sind. Die zumutbaren Verzögerungen bzw. Verzögerungsgradienten wurden bei einer nominellen Ausgangsgeschwindigkeit von 70 km/h ermittelt und dürfen bei unvorbereiteten Probanden auch nur bei dieser Versuchsgeschwindigkeit angewendet werden, da nicht ausgeschlossen ist, dass die maximal zumutbare Verzögerung von der Ausgangsgeschwindigkeit abhängt. Erste Untersuchungen zum Geschwindigkeitseinfluss auf die Zumutbarkeit von Verzögerungen liefert das folgende Kapitel.

#### 4.1.3 Geschwindigkeitsvariation

Neben der Zumutbarkeit der Bremsungen bei der für den Probandenversuch vorgesehenen Geschwindigkeit von 70 km/h wurde die Zumutbarkeit der verschiedenen Bremsprofile von den Experten auch bei den Zielgeschwindigkeit 45 km/h und 90 km/h bewertet. Das Ziel besteht hierbei darin, zu untersuchen, ob die Ausgangsgeschwindigkeit einen Einfluss auf die maximal zumutbare Verzögerung hat.

Um den Geschwindigkeitseinfluss zu betrachten, wird die Zumutbarkeitsbewertung bei verschiedenen Verzögerungen über den zugehörigen Startgeschwindigkeiten aufgetragen. Bild 4-7 zeigt die Bewertungen für das Blockprofil.

Hier ist zunächst keine Tendenz zu verschiedenen Zumutbarkeitsschwellen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ersichtlich. Für alle getesteten Geschwindigkeitsbereiche werden Verzögerungen ab ca. 5 m/s<sup>2</sup> erstmals als nicht mehr zumutbar bewertet. Zu beachten ist jedoch, dass mit allen Experten zuerst die Versuche bei 70 km/h durchgeführt wurden, um für die Parametrierung der Probandenversuche eine möglichst unvoreingenommene Bewertung sicherzustellen. Somit ist nicht auszuschließen, dass sich bei den späteren Versuchen bei niedrigeren und höheren Geschwindigkeiten Gewöhnungseffekte zeigen. Um den Geschwindigkeitseinfluss detaillierter zu untersuchen, sind weitere Versuche mit unvoreingenommenen Experten durchzuführen. Die ermittelte maximal zumutbare Verzögerung gilt zunächst nur bei einer nominellen Versuchsgeschwindigkeit von 70 km/h.

Für das Rampenprofil zeigte sich bereits bei der Zumutbarkeitsbewertung bei 70 km/h in Kapitel 4.1.1 dass die Rampe im Vergleich zu den anderen Bremsprofilen als unkritischer eingeschätzt wird. Im Rahmen der Untersuchung der Geschwindigkeits-

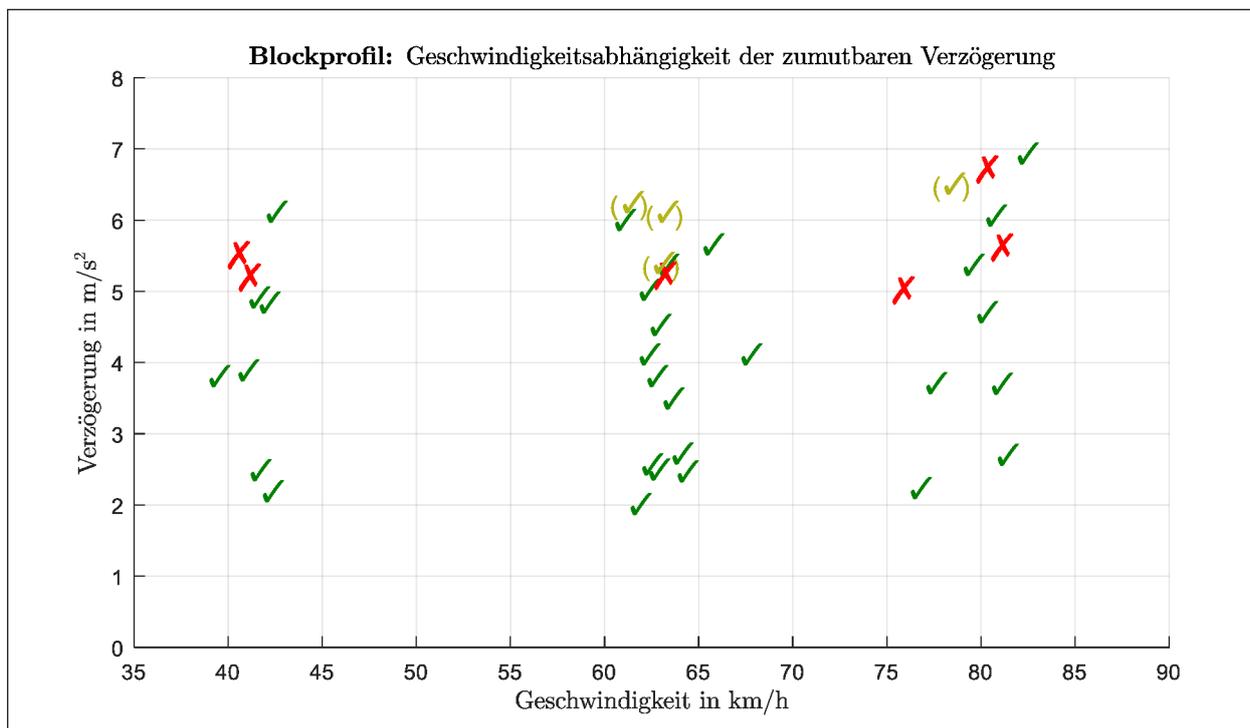


Bild 4-7: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Zumutbarkeit beim Blockprofil

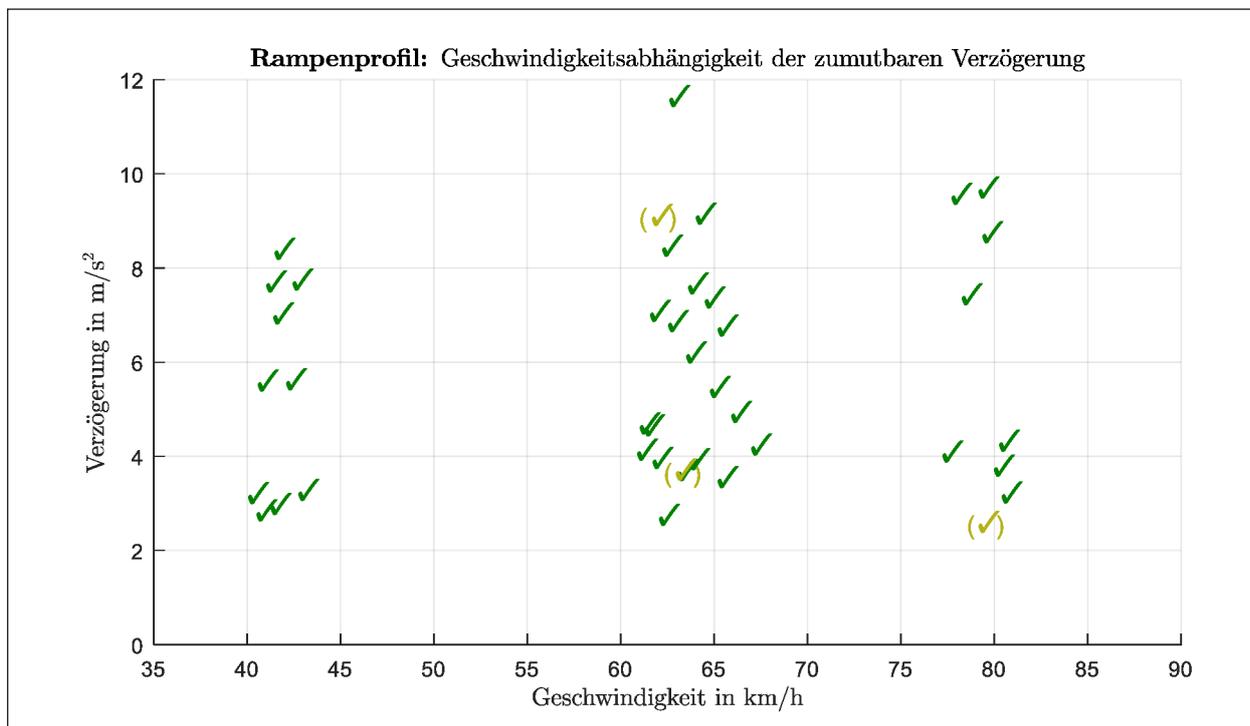


Bild 4-8: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Zumutbarkeit beim Rampenprofil

abhängigkeit zeigt sich, dass das Rampenprofil auch für die anderen Versuchsgeschwindigkeiten für alle getesteten Gradienten als zumutbar bewertet wird (siehe Bild 4-8). Es ist also davon auszugehen, dass innerhalb der betrachteten Geschwindigkeitsspanne (nominelle Versuchsgeschwindigkei-

ten 45 bis 90 km/h) Rampenprofile mit dem genannten Gradienten angewendet werden können. Wie für das Blockprofil gilt jedoch auch hier, dass Gewöhnungseffekte nicht ausgeschlossen werden können und daher die Anwendung des ermittelten maximal zumutbaren Verzögerungsgradienten von



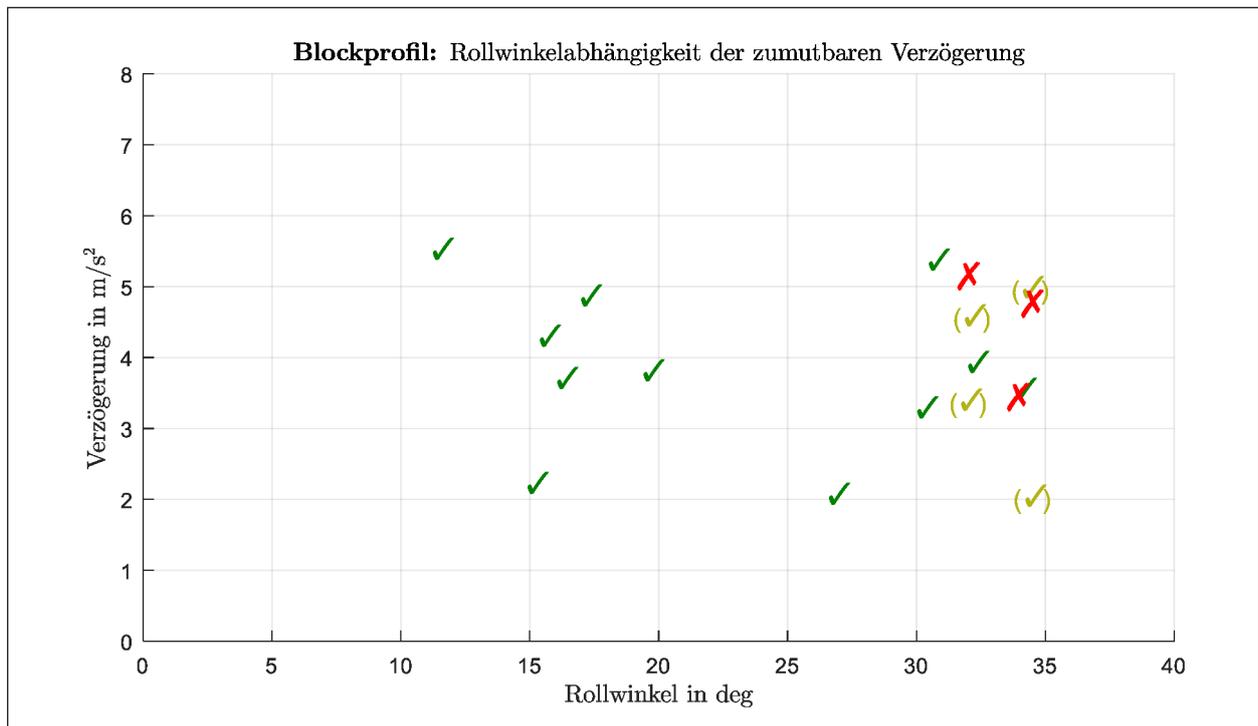


Bild 4-10: Rollwinkelabhängigkeit der Zumutbarkeit von Verzögerungen in Kurvenfahrt

Versuchsdesign (nur ein Kurvenradius, aus Sicherheitsgründen begrenzte Geschwindigkeit) kann jedoch nicht geklärt werden, ob sich die Zumutbarkeitsgrenze bei gleichen Rollwinkeln bei größeren Geschwindigkeiten (also größeren Kurvenradien) verschiebt.

Des Weiteren handelt es sich beim Versuchsfahrzeug nach Aussage der Experten um ein sehr kurvenstabiles Fahrzeug. Hier sind zukünftig weitere Fahrzeuggeometrien zu untersuchen, um zu analysieren, inwieweit sich unterschiedliche Fahrzeugtypen auf die Zumutbarkeit von automatischen Verzögerungen in Kurvenfahrt auswirken.

## 4.2 Probandenstudie Realfahrt

In den Realfahrstudien mit Probanden sollte im Anschluss an die Expertenstudie ermittelt werden, wie schnell die Teilbremsprofile Block, Rampe und Impuls den Fahrer dazu veranlassen, den bremsbereiten Zustand einzunehmen und wie viel Geschwindigkeit bereits während dieser Transitionsphase abgebaut werden kann. Dazu wurde gemäß der Beschreibung in Kapitel 3.2 mithilfe des Dummy Targets EVITA eine Notbremssituation nachgestellt.

Zum Auslösezeitpunkt  $t = 0$  erfolgt die Verzögerung von EVITA. Gleichzeitig beginnt der automatische

Bremsdruckaufbau am Motorrad, um das jeweilige Verzögerungsprofil darzustellen. Bild 4-11 zeigt beispielhaft den idealen Verzögerungsverlauf für das Teilbremsprofil Block. Der Verzögerungsaufbau erfolgt bis zu der im Expertenversuch ermittelten Grenze  $D_{\text{Block}}$ , bei der die Zumutbarkeit für unvorbereitete Fahrer noch gegeben ist. Durch die Teilbremsung wird der Fahrer dazu veranlasst, den bremsbereiten Zustand einzunehmen. Sobald der Fahrer diesen Zustand erreicht hat (= Ende der Transitionsphase), erhöht er im Idealfall selbst durch Bremsbetätigung die Verzögerung auf ein maximal mögliches Niveau  $D_{\text{max}}$ . Alternativ könnte diese Maximierung der Verzögerung auch durch das Notbremssystem erfolgen, um einen idealen Verzögerungsaufbau zu ermöglichen.

In den Versuchen im vorliegenden Projekt wurde nur die Phase bis zum Erreichen der Transition dargestellt, da hiermit das Versuchsziel erreicht war. Ein anschließendes Erhöhen der Verzögerung erfolgte nicht. Die Verzögerung wurde im Fall des Block- bzw. Rampenprofils anschließend bis zum Stillstand auf einem konstanten Niveau gehalten. Bei Impulsbremsung bzw. Referenzbremsungen wurde der Proband durch den Versuchsleiter zum Anhalten veranlasst.

Die Realfahrstudien wurden auf dem Testgelände der TU Darmstadt auf dem August-Euler-Flugplatz

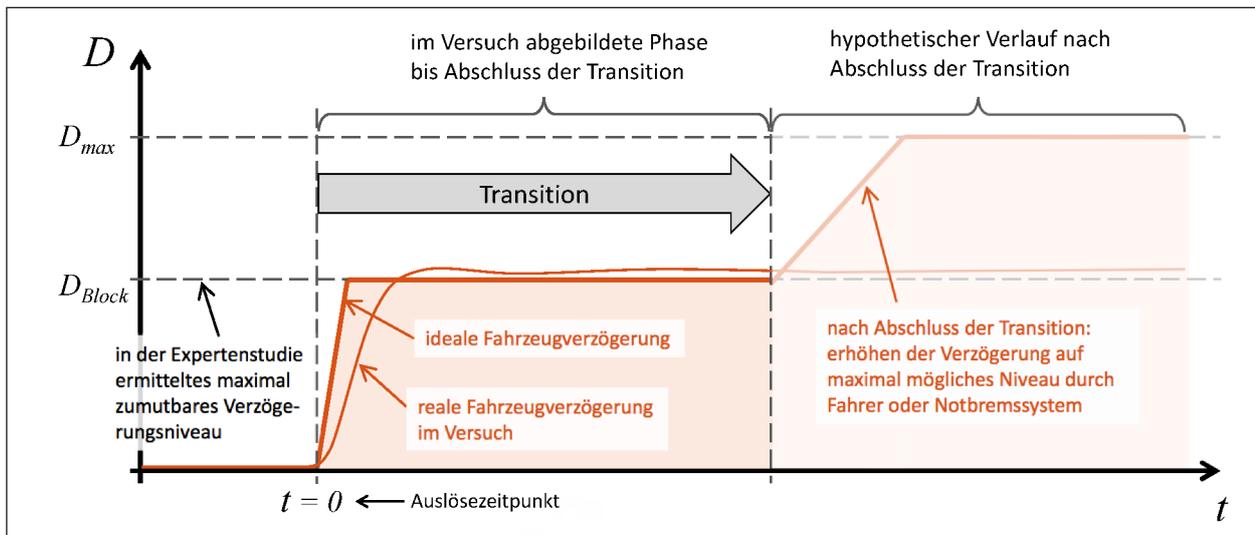


Bild 4-11: Schematischer Ablauf des Versuchs am Beispiel einer Blockbremsung

in Griesheim durchgeführt. Bei den 18 Probanden handelte es sich um Personen aus dem am Fachgebiet Fahrzeugtechnik geführten Probandenpool sowie um Personen aus dem studentischen Umfeld des Fachgebiets.

Bei zwei Bremsversuchen pro Proband (siehe Kapitel 3.2) bleiben nach Abzug der ungültigen Versuche 19 auswertbare Bremsungen übrig, die sich wie folgt verteilen:

- 5x Blockbremsung
- 5x Bremsrampe
- 5x Impuls
- 4x Referenzbremsung ohne automatischen Eingriff

#### 4.2.1 Messdatenauswertung Probandenstudie

Die Messdaten für die Probanden-Fahrversuche werden im Folgenden für alle Bremsprofile in der gleichen Form (siehe Beispiel in Bild 4-12) dargestellt. Im oberen Diagramm wird jeweils der Fahrzeugzustand gezeigt. Hierzu zählt neben der aus dem GPS-Signal bestimmten Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und der Fahrzeugbeschleunigung  $a_{vx}$  der durch den Bremsaktor erzeugte Bremsdruck am hinteren Hauptbremszylinder  $p_{HBZ,Fuß}$ .

Das untere Diagramm zeigt die Fahrerreaktion auf die Fahrzeugverzögerung  $a_{vx}$ . Zur Fahrerreaktion zählen die Fahreroberkörperbeschleunigung  $a_{Rx}$ , die Kraft  $F_{Lenker}$ , mit der der Fahrer sich an der Lenk-

stange abstützt sowie der über den Handbremshebel erzeugte Bremsdruck  $p_{HBZ,Hand}$  am vorderen Hauptbremszylinder. Für Impuls- und Referenzbremsungen wird außerdem die Kupplungsbetätigung dargestellt. Für Block- und Rampe wird auf die Darstellung der Kupplungsbetätigung verzichtet, da diese bereits direkt nach der Auslösung durch den Kupplungsaktor stattfindet.

Der Nullpunkt auf der Zeitachse repräsentiert den Zeitpunkt der Auslösung von EVITA und ggf. des Bremsengriffs. Auf die Rohdaten der Beschleunigungen wird für alle Messreihen ein Tiefpassfilter<sup>10</sup> angewendet. Der Übersichtlichkeit halber wird in den Diagrammen in diesem Kapitel auf die Darstellung der ungefilterten Beschleunigungssignale verzichtet. Ein beispielhaftes Diagramm inklusive der ungefilterten Beschleunigungsdaten befindet sich in Anhang A-3.

Wie zu Beginn von Kapitel 3.2 beschrieben, erfolgte in den Versuchen die Bremsung auf konstantem Verzögerungsniveau bis in den Stillstand (siehe Beispiel in Bild 4-12). In allen weiteren Darstellungen in diesem Kapitel wird nur der Beginn der Bremsung (bis  $t = 2,5$ ) gezeigt, da es sich dabei um den für die Transition relevanten Zeitabschnitt des Versuchs handelt.

<sup>10</sup> IIR-Filter, Butterworth, 1. Ordnung, Grenzfrequenz 2 Hz, durch Anwendung von `filtfilt` erhöht sich die Ordnung auf 2

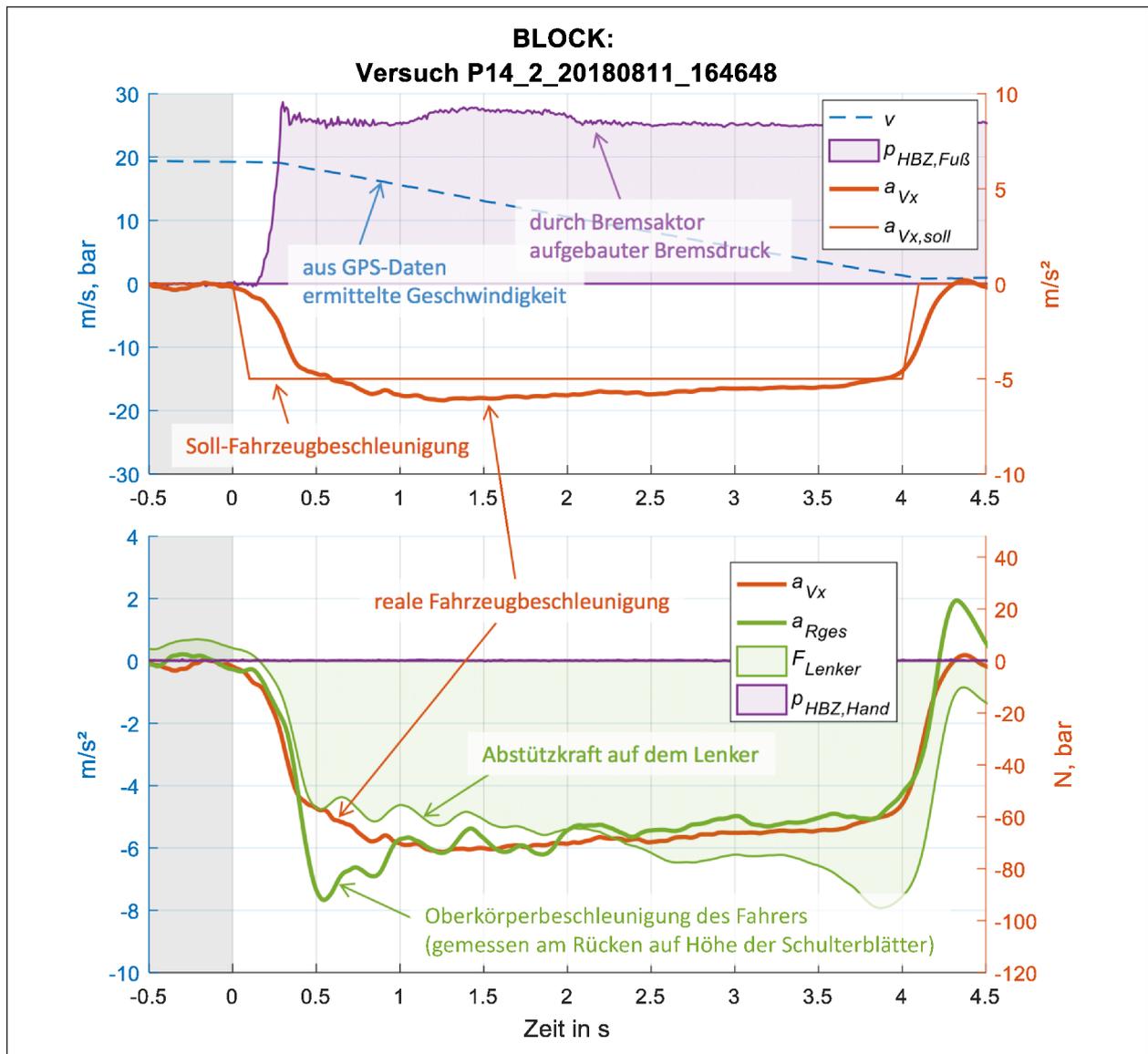


Bild 4-12: Beispielhafte Darstellung einer Blockbremsung

Für alle Bremsungen wird ermittelt, wann der Proband sich auf die durch den Bremsingriff auftretende Beschleunigung eingestellt hat. Dieser Zeitpunkt stellt die abgeschlossene Transition dar. Welche Kennwerte dazu herangezogen werden, wird im Folgenden für die einzelnen Bremsprofile erläutert.

Da in den Verläufen der Kennwerte keine signifikanten Unterschiede zwischen erster und zweiter Bremsung der jeweiligen Probanden auftraten, wird im Folgenden keine Unterscheidung zwischen Erst- und Zweitkontakt vorgenommen.

### Block

Bild 4-13 zeigt die Messdaten für eine durchgeführte Blockbremsung. Bei Blockbremsungen erfolgt

der Aufbau des Zielbremsdrucks ab Auslösung in weniger als 0,3 s. Alle weiteren Datensätze für die Blockbremsungen können Anhang A-3 entnommen werden. Für alle Blockbremsungen wird ermittelt, wann die Transition abgeschlossen ist. Die Messdaten zeigen, dass zunächst die Fahrzeugverzögerung aufgebaut wird, die Verzögerung des Fahrer-oberkörpers folgt mit leichtem Zeitverzug. Das ist darin begründet, dass der Fahrer-oberkörper durch die unerwartete Verzögerung zunächst vorverlagert wird. Durch Abstützen am Lenker und Wiederaufrichten des Oberkörpers wird die Fahrer-oberkörperverzögerung der Fahrzeugverzögerung angepasst. Die Transition gilt dann als abgeschlossen, wenn die Lenkerkraft nicht mehr weiter zunimmt bzw. die Fahrer-oberkörperverzögerung nicht mehr ansteigt. Der früher eintretende der beiden Zeitpunkte wird als Ab-

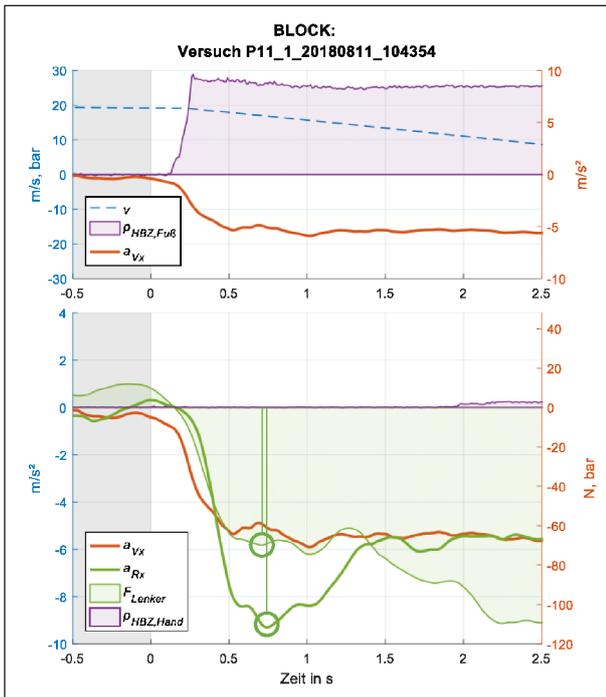


Bild 4-13: Auswertung Blockbremsung

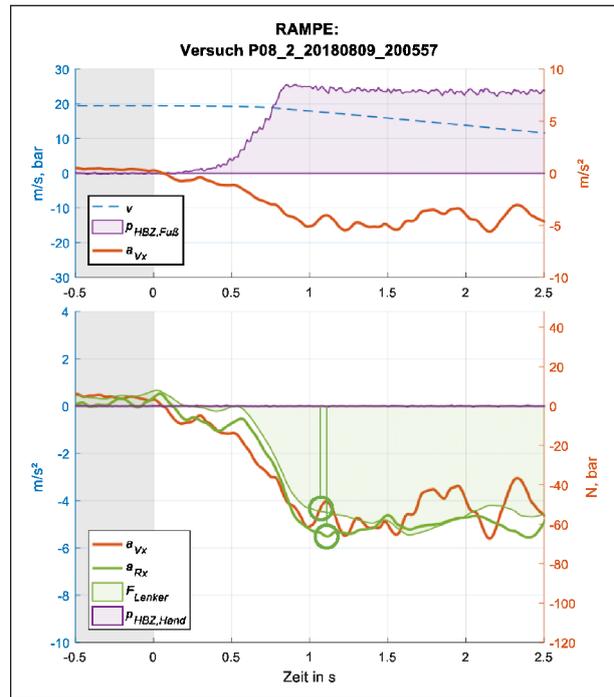


Bild 4-14: Auswertung Bremsrampe

Versuch	Transitionsdauer	Abgebaute Geschwindigkeit
P01_2	0,65 s	1,58 m/s
P10_1	0,52 s	1,26 m/s
P11_1	0,71 s	2,13 m/s
P14_2	0,52 s	1,38 m/s
P17_2	0,46 s	1,07 m/s

Tab. 4-2: Transitionsdauer Blockbremsung

Versuch	Transitionsdauer	Abgebaute Geschwindigkeit
P04_1	0,96 s	1,29 m/s
P07_1	1,09 s	1,86 m/s
P08_2	1,06 s	1,81 m/s
P12_1	1,04 s	1,68 m/s
P18_2	1,03 s	1,81 m/s

Tab. 4-3: Transitionsdauer Bremsrampe

schluss der Transition gewertet. Die ermittelten Transitionsdauern sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Es ergibt sich eine durchschnittliche Transitionszeit von 0,57 s. In dieser Zeit werden durchschnittlich 1,48 m/s abgebaut.

### Rampe

Im Vergleich zur Blockbremsung wird der Bremsdruck bei der Bremsrampe langsamer aufgebaut. Der Druckaufbau beginnt nach ca. 0,3 s mit einem niedrigen Gradienten und steigt dann progressiv an, bis nach etwa 0,8 s das Zielverzögerungsniveau von 5 m/s<sup>2</sup> erreicht ist.

Die Auswertung der abgeschlossenen Transition erfolgt analog zur Blockbremsung. Ein beispielhafter

Datensatz ist in Bild 4-14 dargestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst.

Die Transitionsdauer für die Bremsrampe beträgt durchschnittlich 1,04 s und ist damit deutlich länger als für die Blockbremsung. Im Vergleich zur Blockbremsung wird jedoch durch den langsameren Bremsdruckaufbau in dieser Zeit jedoch nur geringfügig mehr Geschwindigkeit abgebaut. Die abgebaute Geschwindigkeit beträgt durchschnittlich 1,69 m/s. Damit ist gezeigt, dass die Blockbremsung als Transitionsinitiator wirksamer erscheint, wobei zu bedenken ist, dass die Transitionszeit über die Definition der Maximumlage prinzipiell die Rampenform verlängert, da die Fahrzeugbeschleunigung selbst noch bis ca. 0,8 s ansteigt. Aber wie in Bild 4-14 zu sehen, kann eine frühere Transition abgeschlossen werden, da die Maximumlage nicht mit dem Beginn des Verzögerungsmaximums des

Fahrzeugs zusammenfällt, was sich ereignen müsste, wenn schon eine „feste“ Anbindung an das Motorrad erreicht wurde. Der Hauptgewinn der Blockbremsung gegenüber der Rampe liegt aber im höheren Geschwindigkeitsabbau im gleichen Zeitraum.

## Impuls

Im Gegensatz zur Blockbremsung und zur Bremsrampe findet beim Bremsimpuls nur eine kurze automatische Verzögerung ohne Kupplungsbetätigung statt. Durch das schnelle Aufbauen und Nachlassen der Fahrzeugverzögerung und die daraus resultierende Nickbewegung wird der Fahrer zu einer zum Fahrzeug phasenverschobenen Oberkörperbewegung angeregt (siehe Bild 4-15). Die Lenkerkraft bzw. das nicht weiter Ansteigen der Fahrer-

verzögerung kann beim Impuls nicht als Kennwert für die abgeschlossene Transition angenommen werden, da durch den Wiederabbau der Verzögerung der Oberkörper zurückschwingt, was sogar dazu führt, dass der Fahrer diese Bewegung durch Festhalten am Lenker abfangen muss (Vorzeichenwechsel in der Lenkerkraft in den Messdaten. Beim Impuls wird die Transition erst dann als abgeschlossen angesehen, wenn der Fahrer, motiviert durch den Bremsimpuls, selbst einen Bremsengriff vornimmt. Dieser kann durch Aufbau von Bremsdruck ( $p \geq 0,5$  bar an Fuß- oder Handbremshebel) oder Betätigen der Kupplung (Kupplungskennwert übersteigt 0,1; Skala: 0 = Kupplung geschlossen, 1 = Kupplung geöffnet) angezeigt werden. Der früheste der genannten Zeitpunkte wird als Abschluss der Transition interpretiert. Die Transitionsdauern und abgebaute Geschwindigkeiten für den Bremsimpuls sind in Tabelle 4-4 zusammengefasst. Hier kann es vorkommen, dass der Geschwindigkeitsabbau negativ ist, was daraus resultiert, dass bei Auslösung des Bremsimpulses die Kupplung nicht geöffnet wird, der Fahrer das Fahrzeug also nach wie vor beschleunigen kann.

Die Transitionsdauer beträgt für den Bremsimpuls durchschnittlich 1,37 s und ist damit länger als für Bremsrampe und Blockbremsung. Dadurch, dass die Verzögerung nicht gehalten wird und auch die Kupplung nicht automatisch geöffnet wird, ist der Geschwindigkeitsabbau trotz der längeren Dauer mit nur 0,77 m/s deutlich geringer.

## Referenzbremsungen

Um eine Referenz für die automatischen Bremsengriffe zu haben, werden Referenzbremsungen durchgeführt, um zu überprüfen, wie lange der Fahrer nach Eintreten des Ereignisses (hier: Auslösung von EVITA zum Zeitpunkt  $t = 0$ ) braucht, um selbst eine Bremsung einzuleiten. Die hierfür verwendeten Kennwerte für den Abschluss der Transition entsprechen der bereits für den Bremsimpuls beschriebenen Auswertung des Bremsdrucks am Hand- oder Fußbremshebel sowie der Kupplungsbetätigung. Ein beispielhafter Verlauf einer Referenzbremsung ist in Bild 4-16 dargestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst.

Beim Versuch P12\_2 handelt es sich augenscheinlich um einen Ausreißer. Es ist davon auszugehen, dass der Proband nahezu zeitgleich zur EVITA-Auslösung eine Bremsung vornahm, um den gefor-

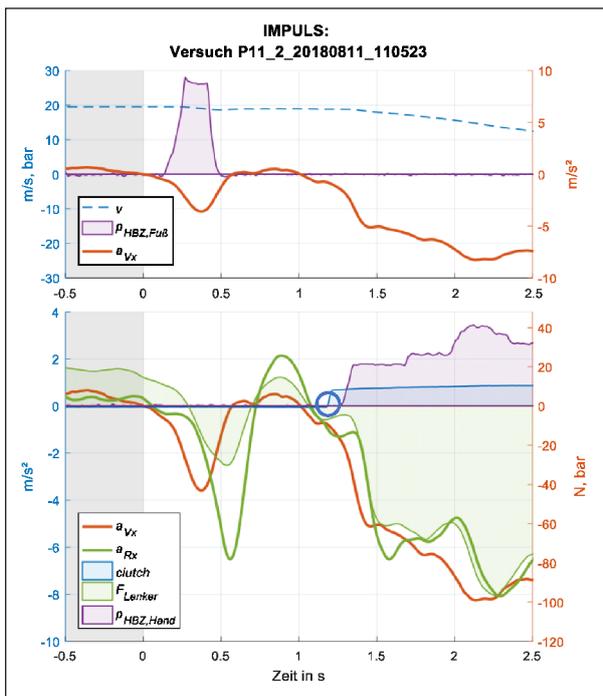


Bild 4-15: Auswertung Bremsimpuls

Versuch	Transitionsdauer	Abgebaute Geschwindigkeit
P03_1	0,92 s	1,21 m/s
P06_1	1,53 s	-0,57 m/s
P09_1	1,84 s	0,27 m/s
P11_2	1,19 s	0,75 m/s
P15_02	1,39 s	2,17 m/s

Tab. 4-4: Transitionsdauer Bremsimpuls

derten Versuchsabstand einzuhalten. Selbst für vorhersehbare Ereignisse werden in der Literatur für sehr geübte Fahrer 0,75 s Reaktionszeit angegeben (GREEN 2000: S. 213), somit sind 0,32 s als Reaktionszeit auf die EVITA-Bremmung nicht plausibel. Der Wert für P12\_2 wird folglich hier als Ausreißer vernachlässigt.

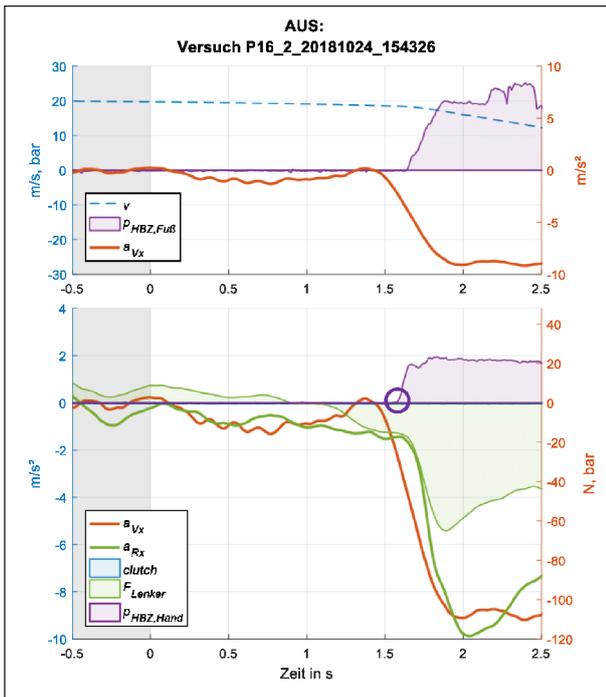


Bild 4-16: Auswertung Referenzbremsung

Versuch	Transitionsdauer	Abgebaute Geschwindigkeit
P08_1	1,87 s	0,34 m/s
P10_2	1,5 s	0,05 m/s
P12_2	0,32 s	0,44 m/s
P16_2	1,59 s	1,33 m/s

Tab. 4-5: Transitionsdauer Referenzbremsungen

Profil	Durchschnittliche Transitionsdauer	Innerhalb der Transitionszeit durchschnittl. abgebaute Geschwindigkeit	In 1,65 s abgebaute Geschwindigkeit
Block	0,57 s	1,48 m/s	9,04 m/s
Rampe	1,04 s	1,69 m/s	5,96 m/s
Impuls	1,37 s	0,77 m/s	2,73 m/s
Referenz	1,65 s	0,57 m/s	0,57 m/s

Tab. 4-6: Zusammenfassung Probandenversuche Realfahrt

So ergibt sich aus den drei verbliebenen Transitionsdauern für Referenzbremsungen ein Durchschnitt von 1,65 s. Bis dahin werden durchschnittlich 0,57 m/s abgebaut. Der geringe Geschwindigkeitsabbau ergibt sich aus der Tatsache, dass bis hierhin im Vergleich zu den automatischen Bremsengriffen keinerlei Bremsdruck aufgebaut wird. Gegebenenfalls auftretende Verzögerungen resultieren hier aus Schließen des Gasgriffs.

Da nur drei gültige Referenzmessungen vorliegen, sind die entsprechenden Werte nur als Tendenz anzusehen. Um größeres Vertrauen in die ermittelten Werte zu erzeugen, ist eine größere Datenbasis nötig.

### Zusammenfassung Probandenversuche Realfahrt

Die Probandenversuche zeigen, dass die Blockbremsung als Transitionsinitiator am vielversprechendsten ist. Sie führt zur schnellsten Transition, gleichzeitig erlaubt sie innerhalb der Transitionszeit für den Referenzversuch den größten Geschwindigkeitsabbau. Für die Profile Rampe und Impuls ergeben sich deutlich höhere Transitionsdauern, während die abgebaute Geschwindigkeit für die Rampe nur geringfügig höher, für den Impuls wesentlich geringer wird.

Davon ausgehend, dass nach Abschluss der Transition die in Kapitel 3.1 erläuterte maximale Verzögerung von 7 m/s<sup>2</sup> aufgebracht werden kann, gilt für die Blockbremsung, dass bei Beginn der durch den Fahrer eingeleiteten Bremsung nach durchschnittlich 1,65 s mit einem automatischen Eingriff bereits 9,04 m/s abgebaut gewesen sein könnten (1,48 m/s in den ersten 0,57 s, weitere 7,56 m/s bei 7 m/s<sup>2</sup> Verzögerung in den restlichen 1,08 s). Im Versuch entspricht das 47 % der Anfangsgeschwindigkeit von 19,44 m/s (70 km/h).

#### 4.2.2 Subjektivbewertung

Neben der Analyse der Messdaten wurde auch eine Subjektivbewertung der Bremsengriffe durch die Probanden vorgenommen. Anhand der in Kapitel 3.2.2 erläuterten Skala werden die Eingriffe hinsichtlich ihrer Kontrollierbarkeit beurteilt. Hierbei stehen Bewertungen zwischen 1 und 3 für eine Einordnung als harmlos, zwischen 4 und 6 als unangenehm und zwischen 7 und 9 als gefährlich. Das obere Ende der Skala liegt bei 10. Diese Bewertung bedeutet, dass der Eingriff als nicht mehr kontrollierbar empfunden wird.

Erwartungsgemäß wird der eigene Bremsengriff (Referenzbremsung) am wenigsten kritisch bewertet. Hier werden die durchgeführten Bremsungen meist am unteren Ende der Skala im harmlosen Bereich eingeordnet. Auch für die Blockbremsung werden bis auf eine Ausnahme alle Eingriffe als harmlos eingestuft. Der Durchschnitt liegt mit 2,8 jedoch etwas höher als bei der Referenzbremsung (2,67).

Im Durchschnitt wird auch die Bremsrampe als noch harmlos eingeordnet (3,4). Hierbei ist allerdings die Streuung größer, wobei es auch zu Bewertungen im unangenehmen Bereich kommt. Am kritischsten wird der Bremsimpuls bewertet. Die Durchschnittsbewertung im unteren unangenehmen Bereich (4). Aber auch hier kommt es durch die

Streuung zu Bewertungen im sowohl im harmlosen als auch im unangenehmen Bereich.

Die Blockbremsung schneidet folglich nicht nur hinsichtlich ihrer Transitionsdauer und der abgebauten Geschwindigkeit (objektive Kriterien), sondern auch bei der subjektiven Empfindung der Kontrollierbarkeit am besten ab.

#### 4.2.3 Fragebogenauswertung

Im Anschluss an die Fahrversuche füllten die Probanden einen Fragebogen zur erlebten Versuchsfahrt und zur allgemeinen Akzeptanz von Assistenzsystemen im Motorrad aus. Der Fragebogen enthält 12 Fragen, die auf der Skala (Tabelle 4-7) eingeordnet werden.

Der Fragebogen ist dem BERICHT in Anhang A-2 (Fragebogen Teil III – Abschließende Beurteilung) beigelegt. Bild 4-18 zeigt die Fragebogenauswertung für 19 Probanden.

Die Befragung zeigt, dass die Probanden Assistenzsysteme grundsätzlich sinnvoll und wichtig finden und ihnen einen Sicherheitsgewinn zuschreiben. Trotzdem bleibt etwas Skepsis: Der Möglichkeit, dass Notbremssysteme auch gefährliche Situationen hervorrufen können, wird nur schwach widersprochen. Aufgrund der Tatsache, dass ein Notbremssystem nicht in das reguläre Fahrgeschehen eingreift, sondern nur in einer kritischen Situation zum Einsatz kommt, beeinträchtigt es den Fahrspaß nach Meinung der Befragten nicht. Ein Gewinn an Fahrspaß wird aus gleichen Gründen auch eher nicht erwartet.

Die Fahrer würden einem Notbremssystem grundsätzlich vertrauen, allerdings erhält das Vertrauen in das System noch nicht die volle Zustimmung. Ähnliches gilt für ein Notbremssystem als Kriterium bei der Kaufentscheidung für ein Motorrad. Bei der Frage nach Abschaltbarkeit des Systems geht die Tendenz zu dem Wunsch, das System deaktivieren zu können.

Die Befragten geben an, vor einem automatischen Eingriff durch das System gewarnt werden zu wollen. Außerdem sind die meisten Probanden der Meinung, sie hätten besser mit dem automatischen

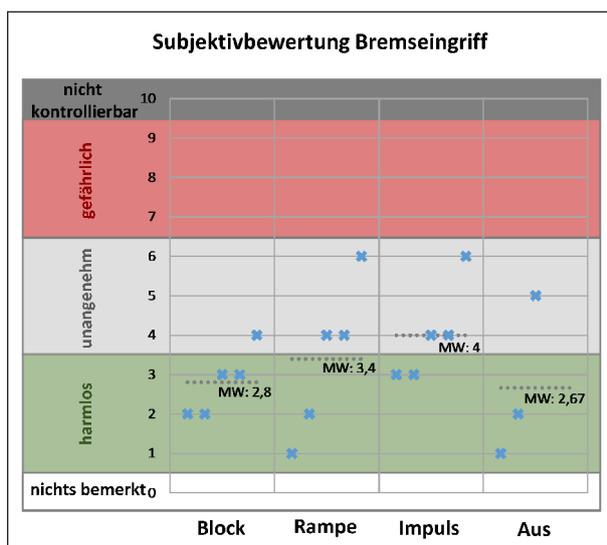


Bild 4-17: Zusammenfassung Subjektivbewertung Bremsengriff

Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Tab. 4-7: Fragebogenskala

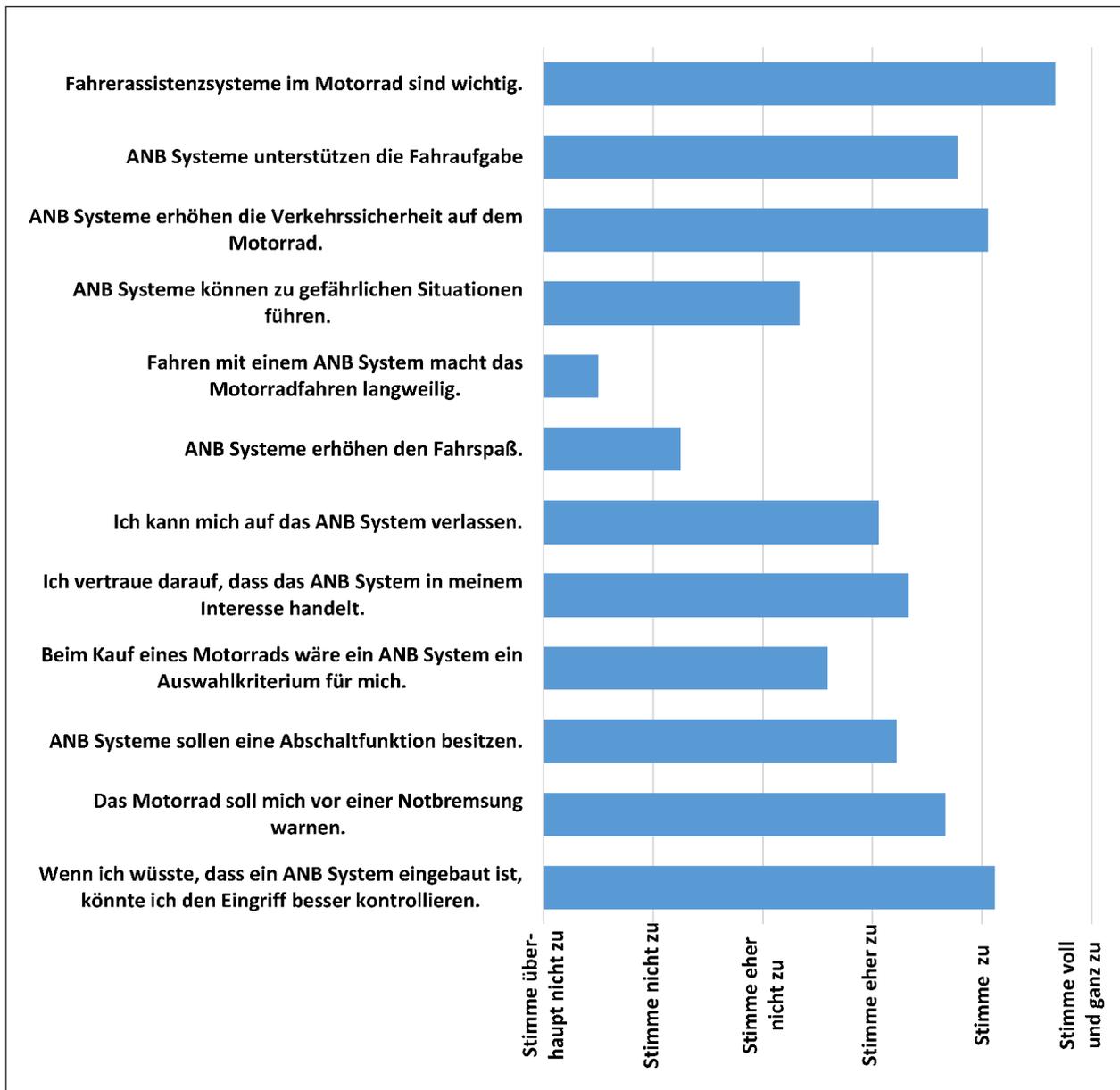


Bild 4-18: Zusammenfassung Fragebogenauswertung

Bremseingriff umgehen können, wenn sie gewusst hätten, dass das Fahrzeug automatische Notbremsungen durchführen kann.

#### 4.2.4 Zusammenfassung Probandenstudie Realfahrt

Die Probandenstudie auf dem Testgelände der TU Darmstadt zeigt, dass die Blockbremsung am besten als vorbereitende Teilbremsung vor einer automatischen Notbremsung geeignet ist. Mit 0,72 s erzeugt sie die schnellste Transition und ermöglicht aufgrund des schnellen Bremsdruckaufbaus bereits

während der Transitionsphase einen vergleichsweise großen Geschwindigkeitsabbau.

Auch bei der subjektiven Bewertung der Kontrollierbarkeit schneidet das Bremsprofil Block besser ab als die Profile Rampe und Impuls. Die Blockbremsung wird von allen Probanden als harmlos eingestuft.

Die Auswertung der Fragebogen zeigt, dass die Einstellung der Probanden zu FAS im Motorrad grundsätzlich positiv ist und dass einem Notbremsystem für Motorräder ein Sicherheitsgewinn zugesprochen wird.

Hinsichtlich der Aussagekraft gelten ähnliche Einschränkungen wie für die Expertenversuche: Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Reaktion des Fahrers auf einen Bremseneingriff von der Fahrzeuggeometrie (und damit Sitzposition/Ergonomie) abhängt. Die in den Versuchen erzielten Ergebnisse sind also nur für die genutzte Fahrzeuggeometrie gültig. Die Ergebnisse gelten nur für den getesteten Fall der Geradeausfahrt mit beiden Händen am Lenker und für die untersuchte Ausgangsgeschwindigkeit von ca. 70 km/h.

Für jedes Bremsprofil konnten vier Versuche ausgewertet werden. Für eine absolute Bewertung sollten die Ergebnisse zukünftig durch Studien mit größerem Umfang abgesichert werden, wobei sich die Versuche sich dann auf die favorisierte Bremsform konzentrieren können.

### 4.3 Probandenstudie Simulator

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Probandenstudie dargestellt, die am dynamischen Motorrad-Fahrsimulator DESMORI am Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW) durchgeführt wurden. Wie zuvor erwähnt, wurde die Motorradfahrsimulation als Methode zur Untersuchung zweier zusätzlicher Fragestellungen herangezogen:

1. Der Einfluss einer Warnung auf das Verhalten und die Akzeptanz des Fahrers und
2. Der Einfluss beid-, ein- oder freihändiger Fahrzeugführung auf das Fahrverhalten und die Fahrerakzeptanz. Entsprechend nehmen alle folgenden Betrachtungen Bezug auf beide Faktoren.

Eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens findet sich in Kapitel 3.3.

#### 4.3.1 Fahrdaten

Um die Auswirkungen eines Eingriffs des Notbremsassistenten auf das Fahrverhalten genauer zu betrachten wurde wie folgt vorgegangen. Zunächst wird geprüft, ob der Fahrer in Folge des Eingriffs selbst die Bremse oder Kupplung betätigt. Finden sich entsprechende Hinweise in den Daten, deutet dies darauf hin, dass der Fahrer den Eingriff des Notbremsassistenten (oder das Bremsen des vor-

ausfahrenden Fahrzeugs) bemerkt hat und entsprechende Verhaltenweisen zeigt, die auch bei gewöhnlichen Bremsungen zu beobachten sind. Die Reaktionszeit ist insbesondere bei Fahrten mit manueller Ablenkung zusätzlich ein Hinweis darauf, wie schnell der Fahrer wieder die Hände an den Lenker nimmt und kontrollierende Maßnahmen ergreifen kann. Zusätzlich wurde analysiert, inwiefern sich der Eingriff des Notbremsassistenten auf die Querführung des Motorrads auswirkt. Im Vordergrund steht hierbei die Frage, ob die unterschiedlichen Handhaltungen in Folge der Nebenaufgaben sich auf die Lenkeingaben während des Notbremseneingriffs auswirken. Dazu wurden sowohl der zeitliche Verlauf des Lenkwinkels als auch des Lenkmoments betrachtet.

Auf Ebene des Fahrerhaltens werden Bremsungen am Vorderrad, Bremsungen am Hinterrad und die Betätigung der Kupplung betrachtet. Zunächst wird die Häufigkeit des Bremsens an Vorderrad bzw. Hinterrad untersucht. Zusätzliche Bremsungen am Vorderrad werden von etwas über 50 % der Probanden durchgeführt. Dieses Ergebnis erscheint stabil über alle drei Bedingungen (Bild 4-19). Deskriptiv betrachtet wird in der Bedingung Navi tendenziell mehr zusätzlich gebremst. Dies könnte der Fall sein, weil die größere Instabilität bei einhändiger Fahrt und Notbremsung zu einer größeren Schreckreaktion und damit zusätzlicher Bremsung, um möglichst schnell Energie aus dem System zu nehmen, führt.

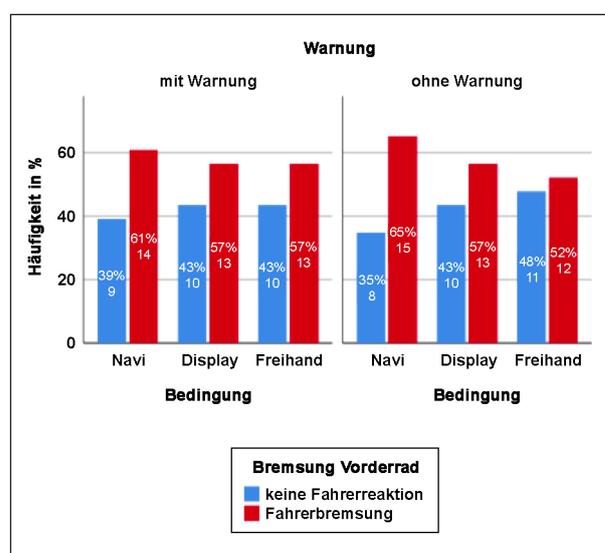


Bild 4-19: Prozentualer Anteil der fahrerinduzierten Bremsungen am Vorderrad nach Eingriff des Notbremsassistenten.

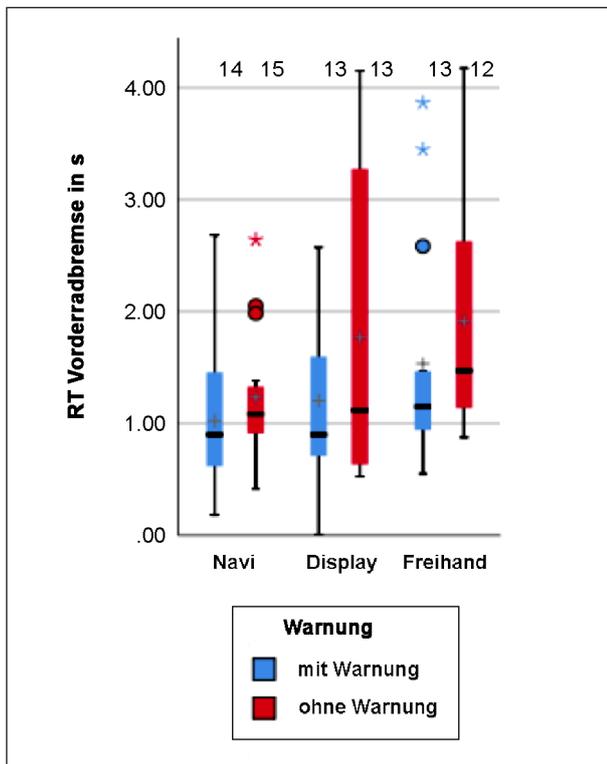


Bild 4-20: Bremsreaktionszeiten (Vorderradbremse) nach Eingriff des Notbremsassistenten.

Hinsichtlich des Zeitpunkts der Bremsung zeigt sich ein sehr heterogenes Bild (Bild 4-20). Insgesamt streut der Zeitpunkt der fahrerseitigen Bremsung stark. Einige Fahrer zeigen bereits kurz nach der systeminitiierten Bremsung (Zeitpunkt  $t = 0$ ) eine zusätzliche Bremsreaktion, während andere erst sehr spät, d. h. kurz vor Stillstand des Fahrzeugs (Stillstand bei etwa  $t = 4$  s), mit einer zusätzlichen Bremsung reagieren. Dies ist für die Bedingungen Display und Freihand stärker ausgeprägt, als es für die Bedingung Navi der Fall ist. Außerdem zeigt sich mit Ausnahme der Bedingung Navi ein kleinerer Streubereich im Falle eines Notbremseingriffs mit vorangegangener Warnung. Die Mediane (schwarze horizontale Linie in den einzelnen Boxen) liegen insgesamt auf einem ähnlichen Niveau, tendenziell jedoch marginal niedriger bei vorliegender Warnung. Zusätzlich fällt die Streuung mit Warnung über alle Bedingungen betrachtet tendenziell geringer aus.

Betrachtet man die Häufigkeit der Bremsungen am Hinterrad, zeigt sich insgesamt eine seltenere Reaktion des Fahrers, als es bei Bremsungen am Vorderrad der Fall war (Bild 4-21). Während für die Bedingungen Navi und Display keine systematischen Unterschiede erkennbar sind und auch kein Einfluss in Abhängigkeit des Vorhandenseins einer

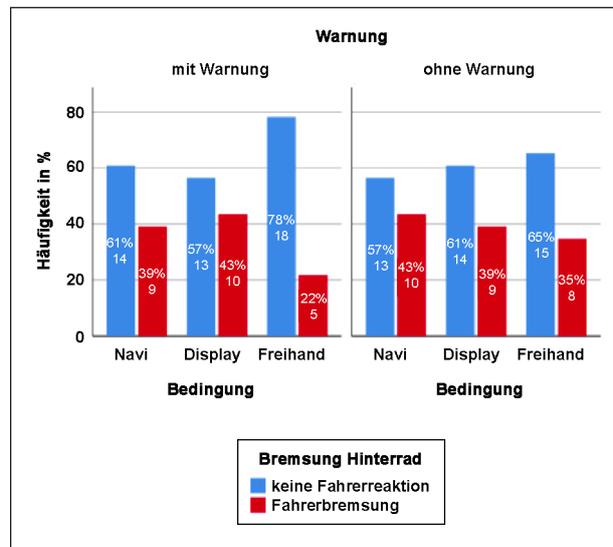


Bild 4-21: Prozentualer Anteil der fahrerinduzierten Bremsungen am Hinterrad nach Eingriff des Notbremsassistenten.

Warnung vorliegt, treten in der Bedingung Freihand mit Warnung weniger Bremsungen am Hinterrad auf, als es ohne Warnung der Fall ist. Dieses Verhalten ist zunächst nicht erwartungskonform, da die Warnung zur Aufmerksamkeitsausrichtung und Bremsung führen sollte. Vermutlich sind die Fahrer bei freihändiger Fahrt so stark mit der Stabilisierung beschäftigt, dass bei einer eingeleiteten Notbremsung zunächst ein stabiler Zustand beibehalten wird (Hände an den Lenker), aber keine weitere eigene Verzögerung eingeleitet wird. Prinzipiell wird über die Vorderradbremse häufiger verzögert (trainiertes Verhalten), da diese aufgrund der dynamischen Radlastverschiebung eine stärkere Verzögerung zulässt.

Wird analog zu den Bremsungen am Vorderrad der Zeitpunkt der Bremsung am Hinterrad untersucht (Bild 4-22), zeigt sich abermals eine große Streuung des Zeitpunkts des Fahrereingriffs nach Eingriff des Notbremssystem. In den Bedingungen Navi und Freihand zeigen sich niedrigere Mediane in der Bedingung mit Warnung. Es muss jedoch angemerkt werden, dass nur wenige Probanden die Hinterradbremse in der Bedingung Freihand mit Warnung betätigt haben, weswegen von einer Interpretation des Ergebnisses abgesehen wird.

Einen weiteren Indikator für die Fahrerreaktion stellt die Betätigung der Kupplung dar. Betrachtet man zunächst wieder die Häufigkeit einer Fahrerreaktion (Bild 4-23), zeigt sich ein heterogenes Bild. Während in den Bedingungen Display und Navi ohne Warnung über Zweidrittel der Fahrer die Kupplung

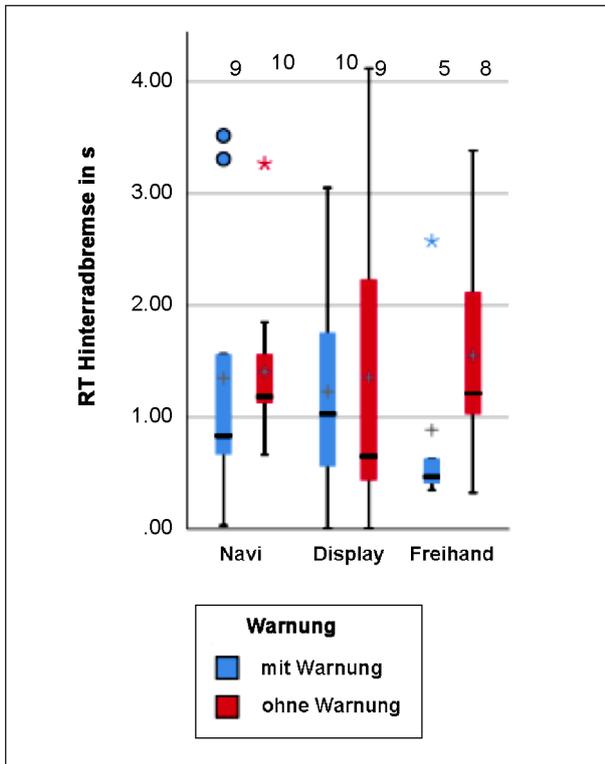


Bild 4-22: Bremsreaktionszeiten (Hinterradbremse) nach Eingriff des Notbremsassistenten.

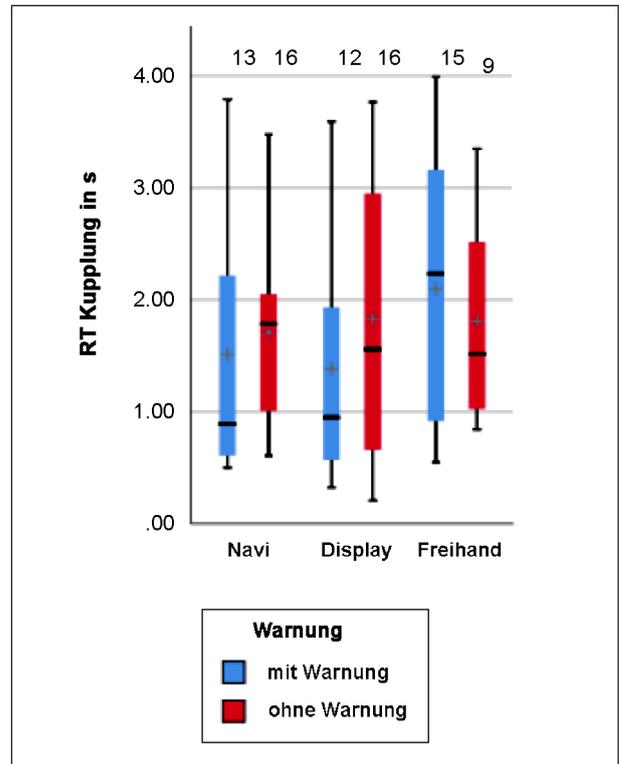


Bild 4-24: Zeitpunkt der Kupplungsbetätigung nach Eingriff des Notbremsassistenten.

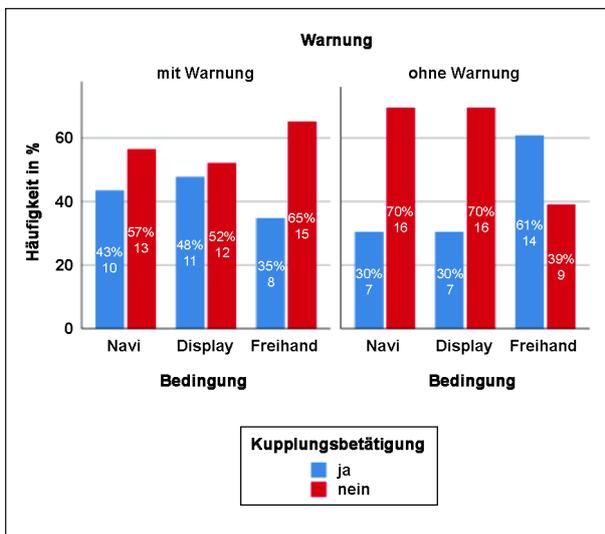


Bild 4-23: Prozentualer Anteil der fahrerinduzierten Kupplungs- betätigungen nach Eingriff des Notbremsassistenten.

betätigen, tut dies nur ca. die Hälfte der Fahrer mit Warnung. Ein gegensätzliches Ergebnis zeigt sich für die Bedingung Freihand. Während ohne Warnung ca. 60 % der Probanden die Kupplung betätigen, ist dies bei ca. Zweidrittel der Fahrer mit Warnung nicht der Fall. Dieses Ergebnis entspricht nicht den Erwartungen, da eigentlich davon ausgegangen wurde, dass die zusätzliche Warnung den Fah-

ren mehr Zeit verschafft, um entsprechend zu reagieren.

Betrachtet man den Zeitpunkt der Kupplungsbetätigung nach Eingriff des Notbremsassistenten (Bild 4-24), zeigt sich abermals eine sehr große Streuung. Während die Probanden im Falle der Bedingungen Display und Navi früher mit einer Betätigung der Kupplung reagieren, wenn sie eine Warnung erhalten, zeigt sich ein umgekehrter Effekt in der Bedingung Freihand. Da jedoch mehr als die Hälfte der Probanden in der Freihand Bedingung ohne Warnung keine entsprechende Reaktion zeigte, ist dieser Unterschied nicht sinnvoll zu interpretieren.

Nach den direkten Fahrerreaktionen werden zusätzlich die Auswirkungen des Notbremseingriffs hinsichtlich des Fahrzeugverhaltens untersucht. Hierfür werden die beiden Größen Lenkwinkel und Lenkmoment betrachtet. Sowohl Lenkwinkel als auch Lenkmoment werden dabei als Verlauf über die Zeit dargestellt.

Bei Betrachtung der Lenkwinkel über die Zeit (Bild 4-25) zeigen sich charakteristische Unterschiede in Abhängigkeit der Bedingung. Während sich in den Bedingungen Display und Freihand überwiegend

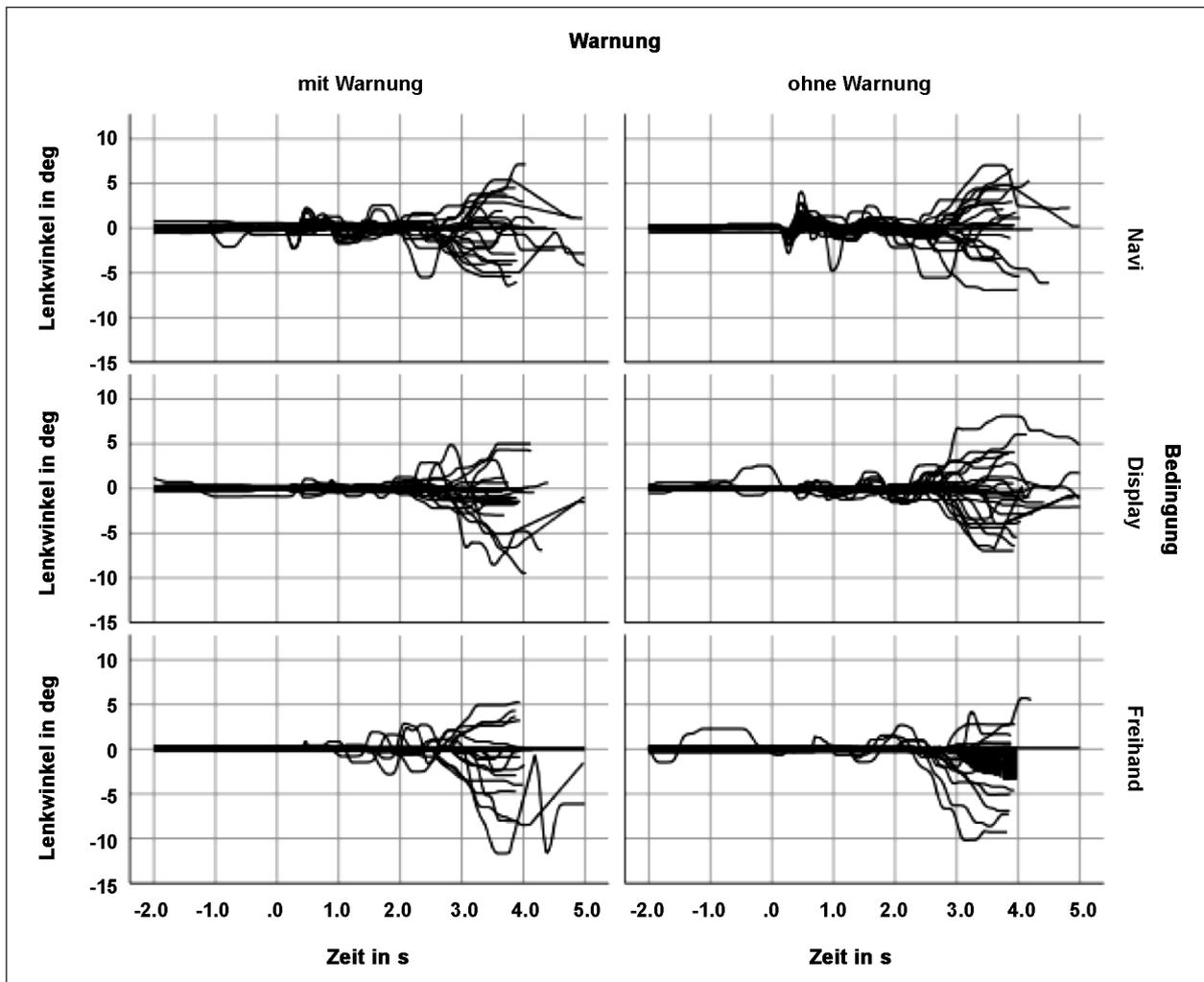


Bild 4-25: Darstellung des Lenkwinkels über die Zeit in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe mit und ohne Warnung.

keine eindeutigen Muster unmittelbar nach Auslösung der Notbremsung (zum Zeitpunkt  $t = 0$ ) finden, lassen sich in der Bedingung Navi Hinweise identifizieren, dass sich die Notbremsung auf das Lenkverhalten auswirkt. Diese treten zeitlich kurz nach Auslösung der Notbremsung auf und äußern sich in einem schnellen Aufbau eines negativen Lenkwinkels. Ein negativer Lenkwinkel bedeutet eine Auslenkung entgegen des Uhrzeigersinns. Dies ergibt sich aus der Nebenaufgabe, bei der die Bedienung des Navis mit der linken Hand ausgeführt wird und damit die Abstützung der Verzögerung am Lenker mit der rechten Hand erfolgt. Ähnliche Verläufe zeigen sich zwar vereinzelt auch in den anderen Bedingungen, allerdings sind diese in der Bedingung Navi deutlicher ausgeprägt.

Bestätigt wird dies bei der Betrachtung des Betrags der Lenkwinkelextrema (Bild 4-26). Hierbei ist zu erkennen, dass sich die Bedingung Navi von den Be-

dingungen Display und Freihand unterscheidet. Sowohl mit als auch ohne Warnung fallen die Lenkwinkelextrema in der Bedingung Navi im Mittel höher aus. Besonders deutlich wird dies im Zeitschritt 0,5 s für Eingriffe ohne Warnung (Bild 4-27), allerdings zeigt sich dies tendenziell über alle Zeitschritte hinweg.

Eine genauere Betrachtung des Betrags der Lenkmomentextrema über die Zeit für die ersten 1,5 Sekunden, verdeutlicht auch hier den Unterschied der Bedingung Navi im Vergleich zu den Bedingungen Display und Freihand (Bild 4-29). Insbesondere bei Beginn der Notbremsung bzw. kurz danach fallen die Lenkwinkelextrema im Mittel höher aus als in den anderen beiden Bedingungen (Zeitschritt 0 Sekunden bzw. 0,5 Sekunden). Besonders deutlich zeigt sich dies für Eingriffe ohne vorherige Warnung (Bild 4-30). Bereits kurz darauf fällt der Unterschied wieder geringer aus, sodass bereits 1,5 Sekunden

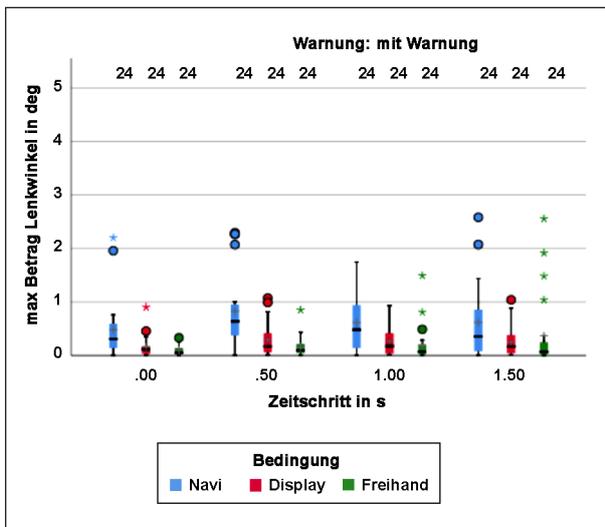


Bild 4-26: Darstellung des maximalen Lenkwinkels (Betrag) pro Zeitschritt in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe mit Warnung. Der schwarze Balken kennzeichnet den Median, das Plus den Mittelwert. Kreise kennzeichnen milde Ausreißer, Sterne extreme Ausreißer.

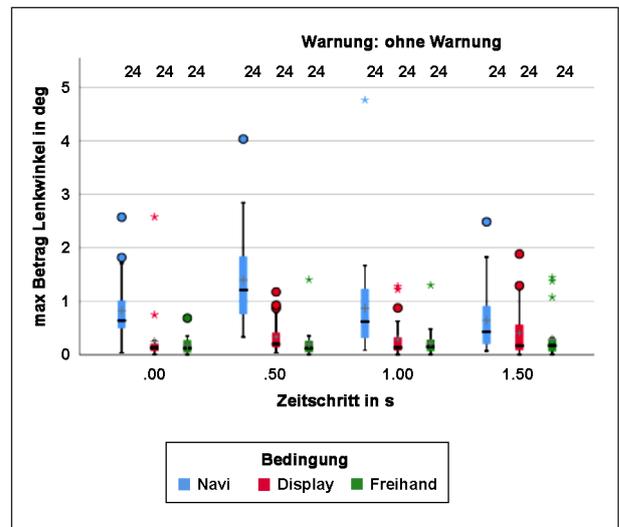


Bild 4-27: Darstellung des maximalen Lenkwinkels (Betrag) pro Zeitschritt in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe ohne Warnung. Der schwarze Balken kennzeichnet den Median, das Plus den Mittelwert. Kreise kennzeichnen milde Ausreißer, Sterne extreme Ausreißer.

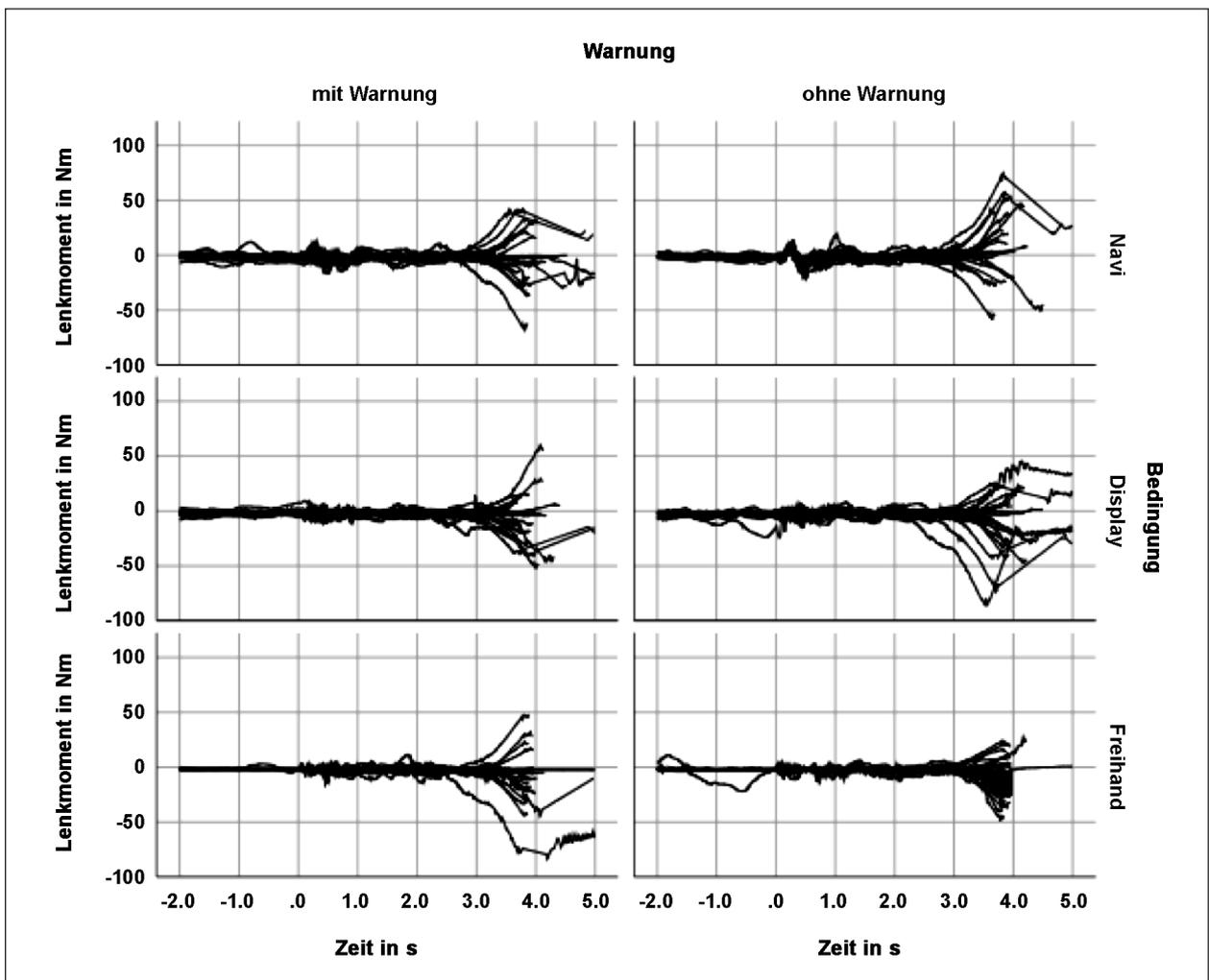


Bild 4-28: Darstellung des Lenkmoments über die Zeit in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe mit und ohne Warnung.

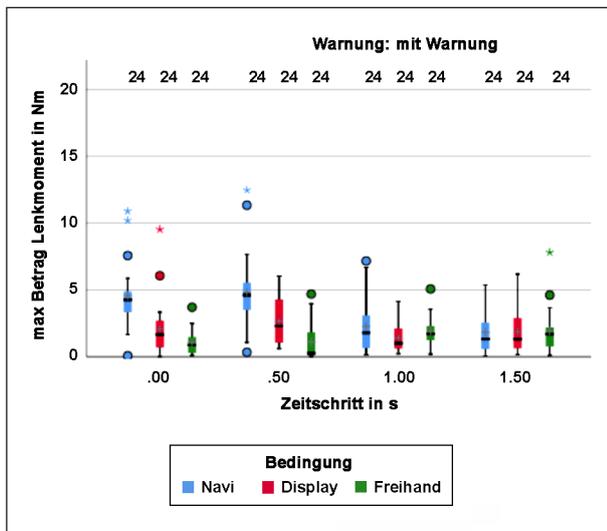


Bild 4-29: Darstellung des maximalen Lenkmoments (Betrag) pro Zeitschritt in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe mit Warnung. Der schwarze Balken kennzeichnet den Median, das Plus den Mittelwert. Kreise kennzeichnen milde Ausreißer, Sterne extreme Ausreißer.

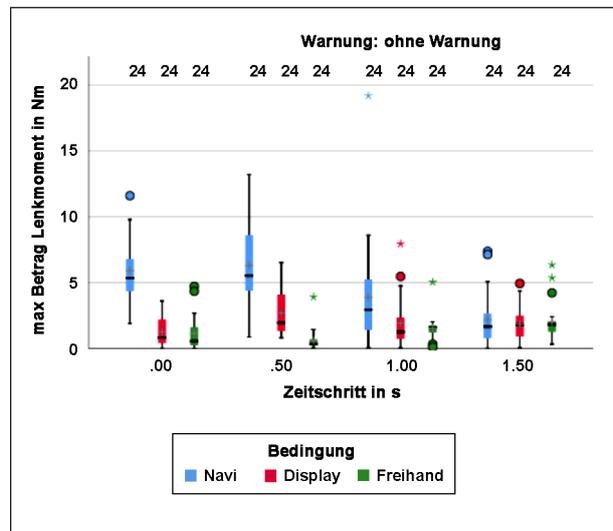


Bild 4-30: Darstellung des maximalen Lenkmoments (Betrag) pro Zeitschritt in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe ohne Warnung. Der schwarze Balken kennzeichnet den Median, das Plus den Mittelwert. Kreise kennzeichnen milde Ausreißer, Sterne extreme Ausreißer.

nach Beginn des Eingriffs keine deutlichen Unterschiede anhand der Lenkmomentextrema zu erkennen sind.

Insgesamt sind anhand der objektiven Fahrdaten nur geringfügige Unterschiede zwischen den Bedingungen zu erkennen. Anhand der Häufigkeiten und Reaktionszeiten für zusätzliche Brems- oder Kuppelungsaktivierungen seitens der Fahrer, ist tendenziell ein Vorteil der Notbremseingriffe mit Warnung zu erkennen. Zusätzlich lassen sich Hinweise darauf identifizieren, dass die Nebenaufgabe zumindest kurzzeitig Auswirkungen auf das Lenkverhalten nach Beginn des Notbremseingriffs hat. Allerdings sind in Folge keine Stürze aufgetreten und es wurden keine starken Auswirkungen auf den Querver-satz beobachtet, sodass dies nicht zu kritischen Situationen führte. Inwiefern dieses Ergebnis auf das reale Motorrad übertragen werden kann, sollte jedoch, wenn möglich, überprüft werden. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, dass dies in der Realität aufgrund einer besseren Rückmeldung von Quer- und Längsbeschleunigung, Rollwinkel und anderer fahrdynamischer Größen weniger stark ausgeprägt ist, da die Fahrer schneller reagieren. Gleichzeitig besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass Überkompensationen auftreten, welche sich negativ auf die Querverführung und die Stabilität des Motorrads auswirken. Auffällig ist zudem, dass bei einhändiger Betätigung der Nebenaufgabe (Bedingung Navi) anhand von Lenkwinkel und Lenkoment

Anzeichen für einen Lenkimpuls als Folge des Notbremseingriffs zu beobachten sind. Dies zeigt sich besonders deutlich, wenn keine Warnung vor Beginn des Notbremseingriffs erfolgte. Jedoch scheint dies keine längerfristigen Auswirkungen zu haben, da entsprechende Kennwerte bereits innerhalb der ersten 1.5 Sekunden wieder vergleichbar ausfallen.

#### 4.3.2 Subjektivbewertung

Im Rahmen der Simulatoruntersuchung wurde nach jedem Eingriff des Systems eine Befragung durchgeführt. Hierbei wurden die Probanden nach jeder Notbremssituation gefragt, wie sie den Eingriff wahrgenommen haben, wie sie die Situation bewerteten und wie hilfreich die Warnung in der Situation war, bzw. wie hilfreich eine Warnung in der Situation gewesen wäre.

Betrachtet man zunächst die Bewertung des Eingriffs, zeigt sich eine tendenziell positivere Bewertung in Notbremssituationen, in denen eine Warnung ausgegeben wurde. Es ist jedoch anzumerken, dass die Beurteilungen über nahezu den gesamten Skalenbereich streuen. Dennoch ergibt sich über alle Bedingungen ein signifikanter Effekt der Warnung ( $F(1,120) = 8.99, p = .003$ ). Entsprechend beurteilten die Probanden Eingriffe ohne Warnung signifikant kritischer als Eingriffe mit vorangehender Warnung (siehe Bild 4-31).

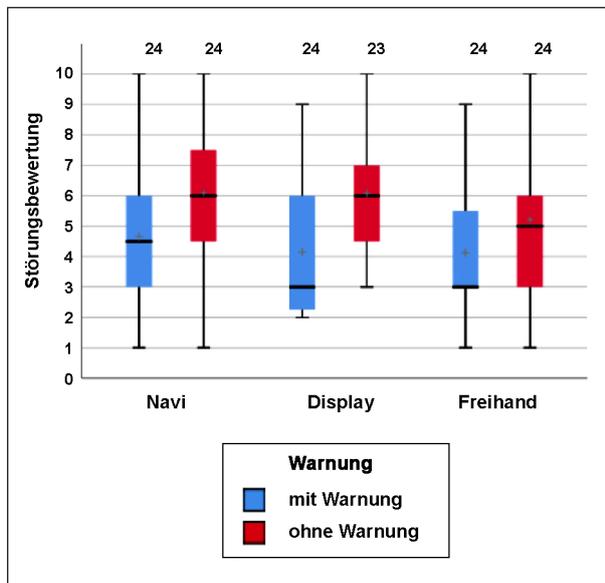


Bild 4-31: Störungsbewertung in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar).

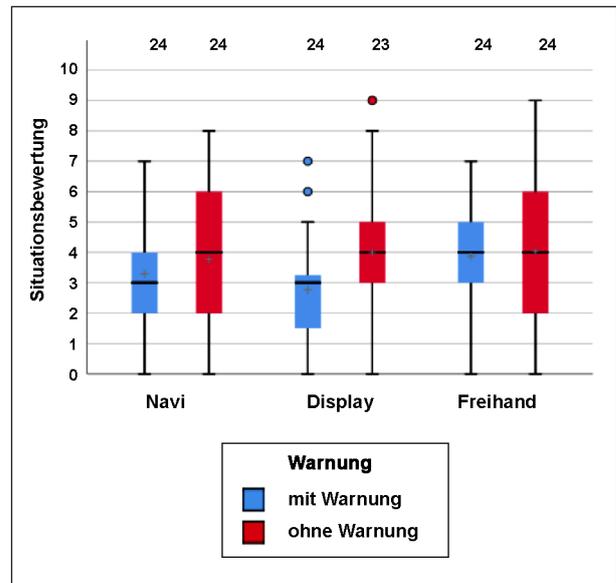


Bild 4-33: Situationsbewertung in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar).

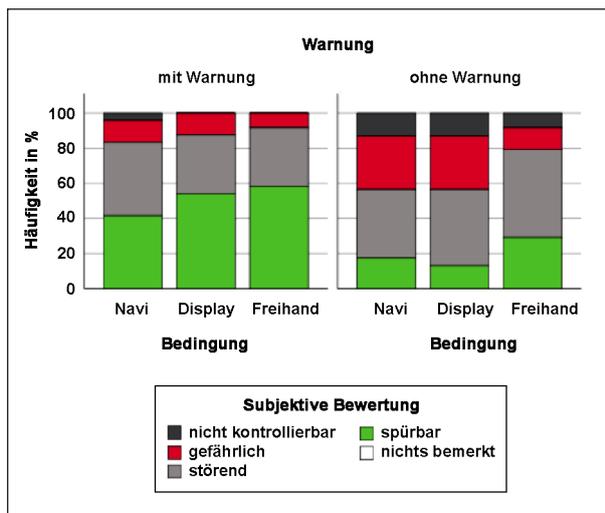


Bild 4-32: Prozentualer Anteil der Bewertungen entsprechend der Kategorien der Störungsbewertungsskala in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung.

Dies zeigt sich auch in der Häufigkeitsverteilung der Fahrerurteile (siehe Bild 4-32). Ohne Warnung beurteilen deutlich mehr Fahrer die Notbremsung mit gefährlich (7-9), als es mit Warnung der Fall ist. Darüber hinaus nimmt der Anteil der Bewertungen in der Kategorie nicht kontrollierbar (10) ebenfalls deutlich zu. Auffällig ist, dass die Bedingung Freihand als weniger kritisch beurteilt wird. Dies ist mutmaßlich darauf zurückzuführen, dass die Fahrer in dieser Bedingung nicht visuell abgelenkt waren, sondern im Gegensatz zu den Bedingungen Display und Navi den Blick auf das Verkehrsgeschehen richten konnten.

Analog dazu wird auch die Fahrersituation (Bild 4-33) bei Eingriffen mit vorangegangener Warnung als tendenziell weniger kritisch beurteilt. Jedoch treten auch hierbei sehr große Streuungen auf. Im Gegensatz zur Störungsbewertung zeigen sich allerdings keine statistisch signifikanten Unterschiede ( $F(1,120) = 2.537, p = .462$ ). Aus diesem Grund wird auf eine Interpretation der Ergebnisse verzichtet.

Bei der Betrachtung der Häufigkeitsverteilungen zeigt sich hingegen eine vergleichbare Verteilungszunahme, die bereits bei der Störungsbewertung beobachtet wurde (Bild 4-34). Es zeigt sich ein Anstieg in den Kategorien unangenehm (4-6) und gefährlich (7-9) bei Eingriffen ohne Warnung im Vergleich zu Eingriffen mit Warnung. Insgesamt fällt dieser Unterschied jedoch geringer aus als bei der Störungsbewertung. Grundsätzlich deutet dies dennoch darauf hin, dass Eingriffe ohne Warnung aus Sicht der Probanden zu kritischeren Situationen führen als Eingriffe mit Warnung.

Hinsichtlich der Beurteilung der Warnung zeigt sich ein konsistentes Bild über die drei Versuchsbedingungen (Bild 4-35). Im Falle einer Notbremsituation ohne Warnung werden hohe Ratings auf die Frage gegeben, wie hilfreich eine Warnung gewesen wäre. In Notbremsituationen, in denen eine vorangehende Warnung gegeben wurde, also ihr tatsächlicher Nutzen bewertet wird, zeigen sich konsistent niedrigere Bewertungen, als in den Situationen ohne Warnung (da es sich um zwei unterschiedli-

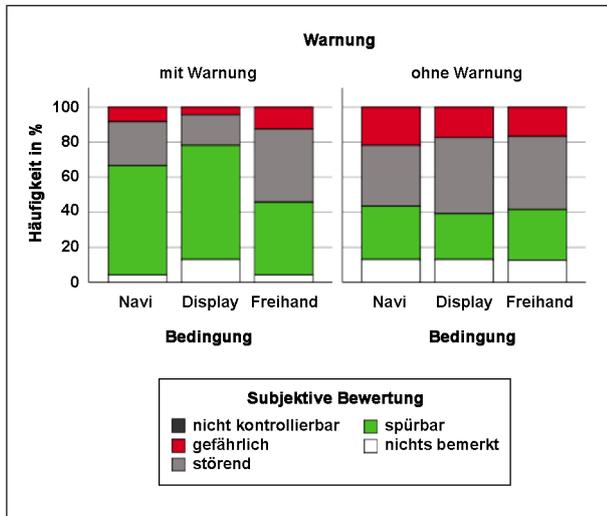


Bild 4-34: Prozentualer Anteil der Bewertungen entsprechend der Kategorien der Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung.

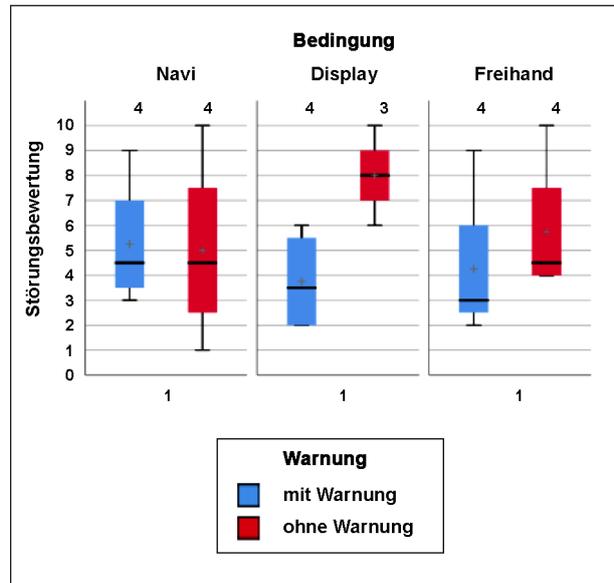


Bild 4-36: Störungsbewertung im Erstkontakt in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar).

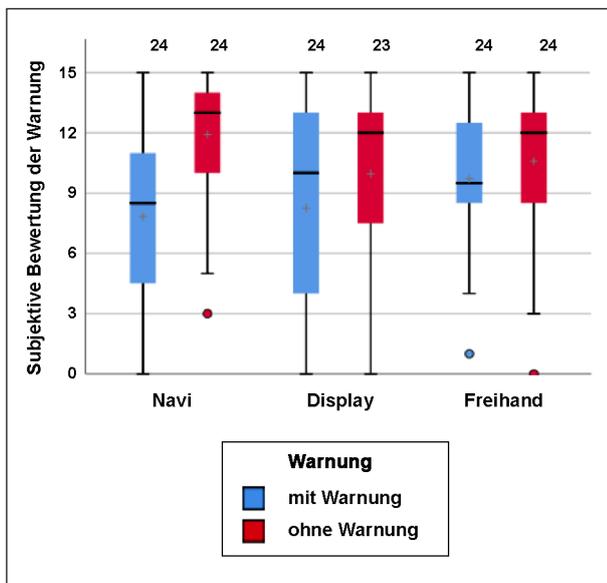


Bild 4-35: Subjektive Bewertung der Warnung in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (Mit Warnung: Wie hilfreich war die Warnung?; ohne Warnung: Wie hilfreich wäre eine Warnung gewesen?, 0 = gar nicht, 15 = sehr hilfreich).

che Fragestellungen handelt, wird auf eine inferenzstatistische Prüfung verzichtet). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Fahrer eine Warnung im Falle eines Notbremsmanövers als wichtig betrachten, die gewählte Umsetzung der Warnung jedoch nicht gänzlich zusagte. Die gewählte Warnung präsentierte ein Warnicon im Cockpit mit einer unspezifischen akustischen Warnung. Insbesondere bei der Optimierung visueller Hinweise stellt sich

die Frage nach Darbietungsort und Gestaltung, um nachteilige Effekte z. B. durch visuelle Ablenkung zu minimieren.

Da Notbrems-situationen für den Fahrer seltene Ereignisse sind, wurde zusätzlich ein besonderer Fokus auf die Bewertung der Erstkontakte gelegt. Da im Rahmen der Untersuchungen mehrere Eingriffe des Notbremsassistenten erlebt wurden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Habituation an den Notbremsassistenten erfolgte. Durch die isolierte Betrachtung des Erstkontakts soll das unvorbereitete, erstmalige Erleben des Eingriffs erfasst werden.

Hierbei zeigt sich zunächst kein eindeutiger Unterschied zwischen Eingriffen mit und ohne Warnung. Lediglich bei der Bedingung Display ist ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Dies ist möglicherweise dadurch zu erklären, dass die Probanden stärker visuell abgelenkt waren als in den anderen Bedingungen. Hierdurch erfolgt der Eingriff überraschender, was zu höheren Störungsbewertungen beiträgt (Bild 4-36). Entgegen der in der Darstellung erkennbaren Unterschiede zeigt sich jedoch kein statistisch signifikanter Unterschied in Abhängigkeit der Bedingung ( $F(1,17) = 1.616, p = .823$ ). Ebenfalls zeigt sich bei Betrachtung der Erstkontakte kein signifikanter Einfluss der Warnung auf die Störungsbewertung ( $F(1,120) = 2.337, p = .145$ ). Daher wird auf eine weitere Interpretation der Ergebnisse verzichtet.

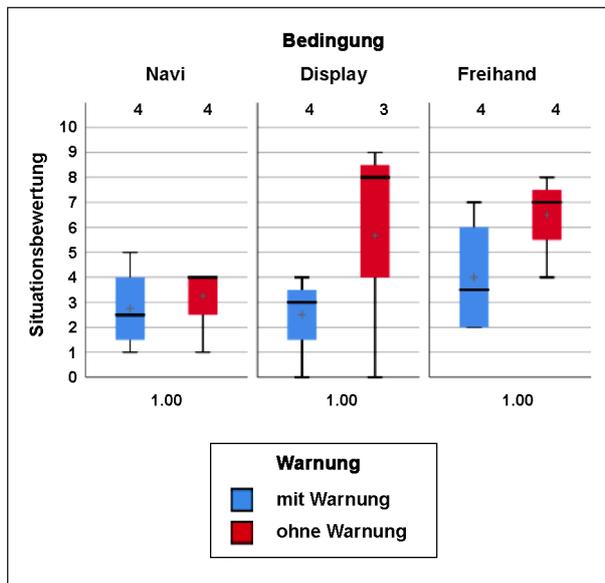


Bild 4-37: Situationsbewertung im Erstkontakt in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar).

Bei der Situationsbewertung zeigt sich grundsätzlich ein ähnliches Befundmuster wie bei der Störungsbewertung (Bild 4-37). Auch hier wurde kein statistisch signifikanter Einfluss der Bedingung ( $F(1,120) = 1.719, p = .209$ ) oder der Warnung auf die Situationsbewertung festgestellt ( $F(1,17) = 4.076, p = .06$ ).

Entgegen der Störungs- und der Situationsbewertung zeigt sich bei der Frage, ob die Warnung hilfreich war bzw. gewesen wäre, ein deutlicher Unterschied in Abhängigkeit der Warnung (Bild 4-38). In allen Bedingungen beurteilen Probanden, die keine Warnung erhalten haben, diese als potenziell hilfreich (10-12). Probanden, die hingegen im Erstkontakt eine Warnung erhalten haben, bewerten diese tendenziell als wenig hilfreich (4-6). Dies deutet darauf hin, dass eine Warnung generell befürwortet wird, die Umsetzung jedoch den Anforderungen der Probanden nicht entspricht. Auffällig ist zudem, dass in der Freihandbedingung eine Warnung als besonders hilfreich eingeschätzt wird, sofern die Fahrer keine erhalten haben. Auch wird die vorhandene Warnung als hilfreicher bewertet als bei den Bedingungen Display und Navi.

Im Rahmen einer Abschlussbefragung wurden die Probanden zusätzlich gebeten einzuschätzen, ob die Stärke des Bremsengriffs und der Zeitpunkt der Warnung angemessen waren (Bild 4-39). Im Mittel beurteilten die Fahrer die Stärke des Bremsengriffs (-6 m/s<sup>2</sup>) als zu stark (1-3) und den Zeitpunkt der

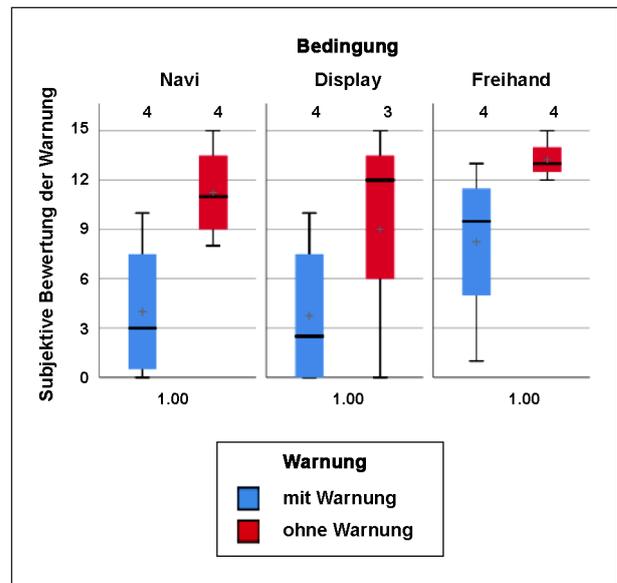


Bild 4-38: Subjektive Bewertung der Warnung im Erstkontakt in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (Mit Warnung: Wie hilfreich war die Warnung?; ohne Warnung: Wie hilfreich wäre eine Warnung gewesen?, 0 = gar nicht, 15 = sehr hilfreich).

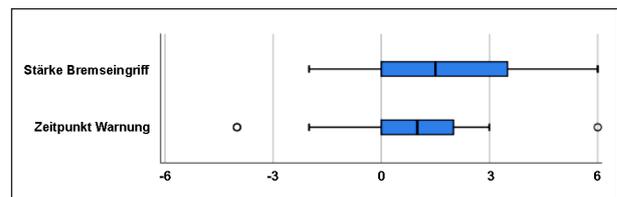


Bild 4-39: Abschließende subjektive Bewertung der Stärke des Bremsengriffs (-6 = viel zu sanft, 6 = viel zu stark) und des Zeitpunkts der Warnung (-6 = viel zu früh, 6 = viel zu spät)

Warnung als zu spät (1-3). Dies deutet darauf hin, dass die Fahrer sich eine frühere Warnung wünschen würden.

Bei der abschließenden Beurteilung der beiden Systemvarianten (mit und ohne Warnung) wird deutlich, dass Notbremsengriffe mit Warnung im Mittel als hilfreicher, entlastender und sicherer bewertet werden als Notbremsengriffe ohne Warnung (Bild 4-40). Insgesamt würden die Fahrer im Mittel eher das System mit Warnung nutzen als das System ohne Warnung. Zudem stimmen die Fahrer eher damit überein, dass Notbremsengriffe mit Warnung die Unfallhäufigkeit reduzieren würden. Allerdings haben die Fahrer insgesamt eher kein Vertrauen zu dem System, unabhängig davon, ob eine Warnung dargeboten wurde oder nicht. Zudem wird die Warnung nicht als vom Fahren ablenkend eingeschätzt. Eine hohe Zustimmung erreicht die

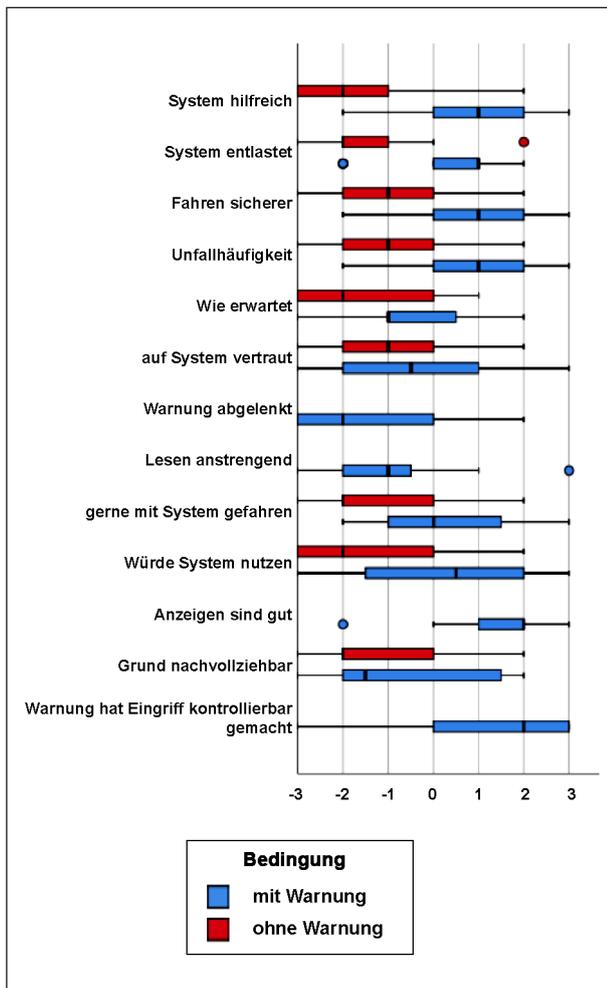


Bild 4-40: Subjektive Akzeptanzbewertung von Notbremseingriffen mit und ohne Warnung (-3 = starke Ablehnung, 3 = starke Zustimmung).

Aussage, dass die Warnung den Eingriff kontrollierbar gemacht hat. Dies deutet darauf hin, dass die Warnung für die Fahrer ein essentieller Bestandteil des Notbremseingriffs sein sollte. Die Ergebnisse der Abschlussbefragung spiegeln damit im Wesentlichen die Ergebnisse der Online-Befragung (beschrieben in Kapitel 3.3.3) wider. Allerdings wird im Rahmen der Abschlussbefragung weniger deutlich, dass die Warnung besser gestaltet werden könnte.

#### 4.3.3 Zusammenfassung Simulatorstudie

Grundsätzlich bleibt die Skepsis gegenüber eines aktiv und stark in die Längsregulation eingreifenden Systems. Insgesamt zeigen die Ergebnisse allerdings, dass eine zusätzliche Warnung vor Beginn des Eingriffs aus Sicht der Fahrer sinnvoll und notwendig erscheint, um die Kontrollierbarkeit des Eingriffs zu gewährleisten. Zwar kam es in der Untersuchung in keinem Fall zu einem Sturz infolge des

Eingriffs, allerdings gibt es Hinweise darauf, dass eine Notbremsung zu einem ungünstigen Zeitpunkt (z. B., wenn der Fahrer nur eine Hand am Lenker hat) das Lenkverhalten des Motorrads beeinflussen kann. Durch die zusätzliche Warnung können sich die Fahrer besser auf die bevorstehende Bremsung vorbereiten, sodass kritische Situationen vermieden werden. Künftige Studien sollten untersuchen, wie eine entsprechende Warnung optimalerweise gestaltet werden sollte und ob Teilbremsungen, Bremsimpulse oder ein langsamer Bremsaufbau mit Hilfe eines Gradienten ebenfalls als Warnung geeignet sind. Zudem sollte überprüft werden, ob sich bei einem Notbremseingriff während einhändiger Fahrt in der Realität vergleichbare Einflüsse auf das Lenkverhalten finden, wie im Simulator.

## 5 Fazit und Ausblick

Um die Einsatzgrenzen automatischer Notbremsysteme für Motorräder zu ermitteln, wurde im Rahmen des Projekts FE 82.0661/2015 „Automatische Notbremsysteme für Motorräder“ eine Untersuchungsmethodik entwickelt, die es erlaubt, zunächst einzugrenzen, welche automatischen Bremseneingriffe für Normalfahrer zumutbar sind, um anschließend innerhalb dieser Grenzen die Wirksamkeit der Eingriffe zu ermitteln. Da es bereits serienreife Systeme gibt, die verhindern können, dass physikalische Grenzen überschritten werden ([kurventaugliches] ABS, Hinterradabhebe-Erkennung), liegt das Hauptaugenmerk dabei auf den Grenzen, die der Aufwasse der Anwendbarkeit setzt.

Dabei wird der Ansatz verfolgt, dass der Fahrer sich in einem bremsbereiten Zustand befinden muss, um einen automatischen Eingriff kontrollieren zu können. Um ihn in diesen Zustand zu bringen und trotzdem schon vor Erreichen der Bremsbereitschaft einen Geschwindigkeitsabbau erreichen zu können, werden vorbereitende Teilbremsungen eingesetzt. Diese Teilbremsungen sind Hauptinhalt der Untersuchungen. Ergänzend wurden mit den Experten Bremsungen in Kurvenfahrt und mit variierten Versuchsgeschwindigkeiten durchgeführt, um erste Erkenntnisse hinsichtlich verschiedener Fahrsituationen zu erhalten. Auch Bremsungen in Kurvenfahrt wurden bei Rollwinkeln bis zu 30° von den Experten als für Normalfahrer zumutbar eingeschätzt.

In einer Expertenstudie wurden zunächst Parameter für die verschiedenen Teilbremsprofile ermittelt,

die Normalfahrern zugemutet werden können, die sich nicht im bremsbereiten Zustand befinden und von einem Eingriff überrascht werden. Es zeigte sich, dass auch vor Erreichen des bremsbereiten Zustands Verzögerungen von bis zu  $5 \text{ m/s}^2$  zumutbar erscheinen.

Mit den ermittelten Parametern wurden anschließend Probandenversuche durchgeführt, in denen untersucht wurde, inwieweit die verschiedenen Teilbremsprofile geeignet sind, Fahrer in einer Notbremssituation zu unterstützen. Die Versuche zeigen, dass die Blockbremsung die Fahrer am schnellsten dazu bringt, einen bremsbereiten Zustand einzunehmen. Der bremsbereite Zustand zeichnet sich dadurch aus, dass die Fahrer eine stabile Position mit nur geringer Bewegung des Oberkörpers relativ zum Fahrzeug einnehmen. Trotz der kürzesten Zeitspanne wird während der Transitionsphase bei der Blockbremsung absolut am meisten Geschwindigkeit abgebaut. Bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von  $70 \text{ km/h}$  im Versuch werden in der Zeit, die der Fahrer bei einem Referenzversuch braucht, um selbst einzugreifen, bereits  $44 \%$  der Ausgangsgeschwindigkeit abgebaut. Weiterhin wurde gezeigt, dass auch die Bremsrampe und der Bremsimpuls geeignet sind, die Transitionszeit im Vergleich zu einer durch den Fahrer selbst induzierten Bremsung zu verkürzen.

Auch bei der Subjektivbewertung zu den Bremsseingriffen wird die Blockbremsung von den Probanden als am besten kontrollierbar bewertet. Alle Befragten ordneten das Bremsprofil als harmlos ein. Auch die Profile Rampe und Impuls wurden durchschnittlich im harmlosen Bereich oder zumindest auf der Grenze zwischen harmlos und unangenehm eingeordnet. Allerdings tritt bei diesen beiden Profilen eine größere Streuung auf. Einige Probanden ordneten sie als unangenehm ein. Kein Bremsseingriff wurde als gefährlich bewertet.

Die Simulatorstudien zeigen, dass auch bei kritischeren Szenarien mit Ablenkung, Ein- oder Freihandfahrt grundsätzlich kein Kontrollverlust im Sinne von Stürzen auftritt. Anhand der simulierten Fahrdynamikdaten wird jedoch ersichtlich, dass insbesondere bei Einhandbedienung die Querdynamik negativ beeinflusst werden kann. Die Vergleichsversuche für automatische Bremsseingriffe mit und ohne Warnung zeigen eindeutig, dass Eingriffe durch vorherige Warnung in ihrer Effizienz verbessert werden. Auch die Subjektivbewertung zeigt ein-

deutig, dass Eingriffe mit vorheriger Warnung von den Befragten bevorzugt werden.

Durch die schon in der Transitionsphase hohe akzeptierte Verzögerung einer Blockbremsung von  $5 \text{ m/s}^2$  und die kurze Dauer der Transition von knapp  $0,6 \text{ s}$ , an die sich eine weitere Verzögerungserhöhung anschließen kann, ist das Potenzial einer automatischen Notbremssysteme für Motorräder gegenüber zweispurigen Fahrzeugen nicht wesentlich eingeschränkt. Die subjektive Akzeptanz wurde sowohl in den Realfahrversuchen als auch im Rahmen der Simulatorstudien positiv bewertet. Analog zu den Systemen für Zweispurfahrzeuge sollten auch Notbremssysteme für Motorräder die Aufmerksamkeit des Fahrers durch eine angemessene Warnung auf das bevorstehende Bremsmanöver richten.

Die Realfahrversuche wurden alle mit dem gleichen Versuchsfahrzeug und mit den Probanden lediglich in Geradeausfahrt mit voller Konzentration auf die Fahraufgabe durchgeführt. Im Rahmen zukünftiger Forschung sollten Parameter wie die Fahrzeuggeometrie und die Fahrsituation (Geschwindigkeit, Trajektorie) variiert werden, um die Auswirkungen auf die Zumutbarkeitsgrenzen zu untersuchen. Außerdem sollten Untersuchungen zu Fahrerwarnungen vor automatischen Bremsseingriffen durchgeführt werden, um eine ideale Warnstrategie zu entwickeln.

## Literatur

- BALDANZINI, N., HUERTAS-LEYVA, P., SAVINO, G. u. M. PIERINI (2016): Rider Behavioral Patterns in Braking Manoeuvres. In: *Transportation Research Procedia* 14. S. 4374–4383. Abrufbar unter: [10.1016/j.trpro.2016.05.359](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.359).
- BEKIARIS, E. (2008): SAFERIDER. Abrufbar unter: [www.saferider-eu.org](http://www.saferider-eu.org) (letzter Abruf: 15.11.2016).
- BOSCH (2016): Fahrerassistenz. Abrufbar unter: [http://www.bosch-motorcycle.com/de/de/assistancesystems/assistance\\_systems.html](http://www.bosch-motorcycle.com/de/de/assistancesystems/assistance_systems.html) (letzter Abruf: 29.11.2016).
- BRENNA, C., MORENO, D., SYMEONIDIS, I. u. G. KAVADARLI (2008): MYMOSA – Towards a virtual motorcycle rider for realistic simulations of motorcycle manoeuvres. In: Institut für Zweiradsicherheit e. V. (IFZ). ifz Forschungsheft Nr. 13: Tagungsband der 7. Internationalen Motorradkonferenz 2008. 2008. 143–168.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2016): Leistungsbeschreibung FE 82.0661/2015. „Automatische Notbremssysteme für Motorräder“.
- DEKRA Automobil GmbH (2010): Verkehrssicherheitsreport Motorrad 2010. Strategien zur Unfallvermeidung auf den Straßen Europas. Stuttgart.
- EDWARDS, M., NATHANSON, A. u. M. WISCH (2014): Estimate of potential benefit for Europe of fitting Autonomous Emergency Braking (AEB) systems for pedestrian protection to passenger cars. In: *Traffic injury prevention* 15 Suppl 1. S173-82. Abrufbar unter: [10.1080/15389588.2014.931579](https://doi.org/10.1080/15389588.2014.931579).
- Europäisches Parlament (2013): Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen Text von Bedeutung für den EWR. EU-Verordnung 168/2013 (letzter Abruf: 21.12.2018).
- FECHER, N., HOFFMANN, J. u. H. WINNER (2015): EVITA – Das Prüfverfahren zur Beurteilung von Antikollisionssystemen. In: WINNER, H. Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. ATZ/MTZ-Fachbuch. (Springer Vieweg) Wiesbaden. 197–206.
- FREIENSTEIN, H.: Verfahren zum Durchführen eines Notbremsvorgangs in einem Zweirad H. DE 10 2013 200 044 A1 2014.07.03.
- GAIL, J., FUNKE, J., SEINIGER, P. u. U. WESTERKAMP (2009): Anti Lock Braking and Vehicle Stability Control for Motorcycles – Why or Why Not. In: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). The 21<sup>st</sup> ESV Conference Proceedings.
- GEORGI, A., ZIMMERMANN, M., LICH, T. u. L. BLANK (2009): New Approach of Accident Benefit Analysis for Rear End Collision Avoidance and Mitigation Systems. In: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). The 21<sup>st</sup> ESV Conference Proceedings.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (2016): Unfalltypen-Katalog Leitfa-den zur Bestimmung des Unfalltyps. Abrufbar unter: <https://udv.de/download/file/fid/9308> (letzter Abruf: 09.05.2017).
- GIORGI, I u. M. PIERINI (2014): MOTORIST. Motorcycle Rider Integrated Safety. Abrufbar unter: [http://www.motorist-ptw.eu/?page\\_id=8](http://www.motorist-ptw.eu/?page_id=8) (letzter Abruf: 15.11.2016).
- GIOVANNINI, F., SAVINO, G., PIERINI, M. u. N. BALDANZINI (2013): Analysis of the minimum swerving distance for the development of a motorcycle autonomous braking system. In: *Accident Analysis and prevention* 59. S. 170–184. Abrufbar unter: [10.1016/j.aap.2013.05.020](https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.05.020).
- GREEN, M. (2000): How Long Does It Take to Stop? Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times. In: *Transportation Human Factors* 2 H. 3. S. 195–216. Abrufbar unter: [10.1207/STHF0203\\_1](https://doi.org/10.1207/STHF0203_1).
- GUTH, S. (2017): Absicherungsmethode von Anzeige-konzepten zur Darstellung fahrfremder Informationen mittels eines Motorrad-Fahrsimulators.
- HELLER, O. (1985): Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorieunterteilung. In: *Psychologische Beiträge*. 1985. S. 478–493.
- HUMMEL, T. (2011): Fahrerassistenzsysteme. Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis

- des Schadensgeschehens der deutschen Versicherer. ForschungsBERICHT/Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. FS, Fahrzeugsicherheit/Unfallforschung der Versicherer 03. (GDV) Berlin.
- International Organization for Standardization (2002): Transport information and control systems – Forward vehicle collision warning systems – Performance requirements and test procedures H. 15623.
- International Organization for Standardization (2012): 14198:2012 Road vehicles – Ergonomic aspects of transport information and control systems – Calibration tasks for methods which assess driver demand due to the use of in-vehicle systems H. 14198.
- International Organization for Standardization (2013): Intelligent transport systems — Forward vehicle collision mitigation systems — Operation, performance and verification requirements H. 22839.
- KRAUSE, R., VRIES, N. de u. W.-C. FRIEBEL (2007): Mensch und Bremse in Notbremsituationen mit Pkw. neue Erkenntnisse zu Prozesszeiten beim Bremsen. Teil 1 & 2. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik H. 46. 164 – 171 & 201 – 206.
- KÜHN, M. u. L. HANNAWALD (2015): Verkehrssicherheit und Potenziale von Fahrerassistenzsystemen. In: WINNER, H. Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. ATZ/MTZ-Fachbuch. (Springer Vieweg) Wiesbaden. 55–70.
- KUSCHEFSKI, A., HAASPER, M. u. A. VALLESE (2016): Bremsen oder Ausweichen? Oder sogar Beides? Vorstellung der Studie und erste Ergebnisse. In: Institut für Zweiradsicherheit e. V. (IFZ). ifz Forschungsheft Nr. 17: Tagungsband der 11. Internationalen Motorradkonferenz 2016. 2016. 60–100.
- LENKEIT, J. F, HAGOSKI, B. K u. A. I. BAKKER (2011): A Study of Motorcycle Rider Braking Control Behavior.
- MERKEL, N. L., PLEß, R., SCHEID, K. u. H. WINNER (2018): Einsatzgrenzen automatischer Notbremsysteme für Motorisierte Zweiräder – eine Expertenstudie. In: Institut für Zweiradsicherheit e. V. (IFZ). ifz Forschungsheft Nr. 18: Tagungsband der 12. Internationalen Motorradkonferenz 2018.
- NEUKUM, A. u. H.-P. KRÜGER (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn, VDI-BERICHTe Nr. 1791.
- NEUKUM, A., LÜBBEKE, T., KRÜGER, H.-P., MAYSER, C. u. J. STEINLE (2008): ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In: MAURER, M. u. C. STILLER. 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS2008. 141–150.
- PIERINI, M. (2008a): 2-BE-SAFE. 2-Wheeler Behaviour and Safety. Abrufbar unter: <http://moving.unifi.it/en/2-be-safe/?template=CAR> (letzter Abruf: 15.11.2016).
- PIERINI, M. (2008b): SAFERIDER. Advanced Telematics for Enhancing the Safety and Comfort of Motorcycle Riders. Abrufbar unter: <http://moving.unifi.it/en/saferider/> (letzter Abruf: 15.11.2016).
- PIEVE, M., SANTUCCI, M. u. O. DI TANNA (2010): Safety in Motion (SIM). Integrated approach for motorcycle safety. In: Institut für Zweiradsicherheit e. V. (IFZ). ifz Forschungsheft Nr. 14: Tagungsband der 8. Internationalen Motorradkonferenz 2010.
- PLEß, R., WILL, S., HOFMANN, M. u. H. WINNER (2016): Manöverumsetzung auf einem dynamischen Motorrad Fahrsimulator. Lenken, Lehnen und Kopplungseffekte in der virtuellen Umgebung. In: Institut für Zweiradsicherheit e. V. (IFZ). ifz Forschungsheft Nr. 17: Tagungsband der 11. Internationalen Motorradkonferenz 2016. 2016.
- RESCHKA, A., Rieken, J. u. M. Maurer (2015): Entwicklungsprozess von Kollisionsschutzsystemen für Frontkollisionen: Systeme zur Warnung, zur Unfallschwereminderung und zur Verhinderung. In: WINNER, H. Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. ATZ/MTZ-Fachbuch. (Springer Vieweg) Wiesbaden. 913–935.

- ROLL, G., HOFFMANN, O. u. J. KÖNIG (2009): Effectiveness Evaluation of Antilock Brake Systems (ABS) for Motorcycles in Real-World Accident Scenarios. In: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). The 21<sup>st</sup> ESV Conference Proceedings.
- SAVINO, G., BROWN, J., BALDOCK, M. u. M. FITZHARRIS (2014): A novel approach for evaluating the potential benefits of motorcycle autonomous emergency braking (MAEB) in real world crashes. In: Australasian College of Road Safety (ACRS). Proceeding of the 2014 Australasian Road Safety Research, Policing & Education Conference.
- SAVINO, G., GIOVANNINI, F., PIANTINI, S., BALDANZINI, N. u. M. PIERINI (2015): Autonomous Emergency Braking for Cornering Motorcycle. In: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). The 24<sup>th</sup> ESV Conference Proceedings.
- SAVINO, G., PIERINI, M., GRANT, R., FRAMP-  
TON, R., TALBOT, R., PELDSCHUS, S.,  
SCHULLER, E., OUDENHUIJZEN, A., PAU-  
WELUSSEN, J., SCHEEPERS, B., TEERHUIS,  
A., KARANAM VENKATA, M., BABU, R.,  
ROESSLER, B., NANETTI, M., GUGGIA, R.,  
McCARTHY, M. u. W. HULSHOF (2010): PISa  
– Powered two-wheeler Integrated Safety.  
Development, implementation and testing of  
PTW integrated safety systems. In: Institut für  
Zweiradsicherheit e. V. (IFZ). ifz Forschungsheft  
Nr. 14: Tagungsband der 8. Internationalen  
Motorradkonferenz 2010.
- SAVINO, G., PIERINI, M., THOMPSON, J., FITZ-  
HARRIS, M. u. M. G. Lenne (2016): Exploratory  
field trial of motorcycle autonomous emergency  
braking (MAEB):. Considerations on the accep-  
tability of unexpected automatic decelerations.  
In: Traffic injury prevention 17 H. 8. S. 855–862.  
Abrufbar unter: 10.1080/15389588.2016.1155  
210.
- SCHRÖTER, K., PLEß, R. u. P. SEINIGER (2015):  
Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder. In:  
WINNER, H. Handbuch Fahrerassistenzsysteme:  
Grundlagen, Komponenten und Systeme für  
aktive Sicherheit und Komfort. ATZ/MTZ-  
Fachbuch. (Springer Vieweg) Wiesbaden. 767–  
794.
- SCHRÖTER, K., WALLISCH, M., WEIDEL, A. u.  
H. WINNER (2013): Bremslenkmomentopti-  
mierte Kurvenbremsung von Motorrädern. In:  
ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 115 H. 5.  
S. 436–443. Abrufbar unter: 10.1007/s35148-  
013-0185-1.
- Statistisches Bundesamt (2016): Unfallentwicklung  
auf deutschen Straßen 2015. Begleitmaterial  
zur Pressekonferenz am 12. Juli 2016 in Berlin.  
Wiesbaden. Abrufbar unter: www.destatis.de  
(letzter Abruf: 20.07.2018).
- SYMEONIDIS, I., KAVADARLI, G., ERICH, S.,  
GRAW, M. u. S. PELDSCHUS (2012): Analysis  
of the stability of PTW riders in autonomous  
braking scenarios. In: Accident Analysis and  
prevention H. 49. S. 212–222. Abrufbar unter:  
10.1016/j.aap.2011.07.007.
- WINNER, H. (2015): Grundlagen von Frontkollisi-  
onsschutzsystemen. In: WINNER, H. Handbuch  
Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Kompo-  
nenten und Systeme für aktive Sicherheit und  
Komfort. ATZ/MTZ-Fachbuch. (Springer Vie-  
weg) Wiesbaden. 893–912.

## Tabellen

- Tab. 1-1: Frontkollisionsassistenzsysteme nach  
(RESCHKA et al. 2015: S. 915)
- Tab. 3-1: Untersuchte Eingriffe
- Tab. 3-2: Randomisierter Versuchsplan
- Tab. 3-3: Simulatorstudienablauf
- Tab. 4-1: Zumutbarkeit der verschiedenen Brems-  
profile bei 70 km/h
- Tab. 4-2: Transitionsdauer Blockbremsung
- Tab. 4-3: Transitionsdauer Bremsrampe
- Tab. 4-4: Transitionsdauer Bremsimpuls
- Tab. 4-5: Transitionsdauer Referenzbremsungen
- Tab. 4-6: Zusammenfassung Probandenversuche  
Realfahrt
- Tab. 4-7: Fragebogenskala

## Bilder

- Bild 1-1: Verkehrstote in Deutschland nach Verkehrsbeteiligung von 1991 bis 2015 (1991 = 100 %)
- Bild 1-2: Beschleunigungspotenzial
- Bild 1-3: Eingriffe von Bremssystemen eigene Darstellung nach (KRAUSE et al. 2007), ergänzt um AEB
- Bild 3-1: Schema Expertenstudie
- Bild 3-2: Verzögerungspotenzial unter Rollwinkel
- Bild 3-3: Vergleich der Bremsprofile
- Bild 3-4: Skala zur Bewertung der Kritikalität nach (NEUKUM et al. 2008: S. 144)
- Bild 3-5: Folgefahrtszenario mit Zielfahrzeug (weißer Pkw) im eigenen Fahrstreifen
- Bild 3-6: Surrogate Reference Task
- Bild 3-7: Kategorien-Unterteilungs-Skala (HELLER, 1985)
- Bild 3-8: Versuchsfahrzeug Honda NC700X
- Bild 3-9: Bremsaktor
- Bild 3-10: Aufbau des Bremsaktors
- Bild 3-11: Bremsaktor im eingebauten Zustand
- Bild 3-12: Geometrische Größen
- Bild 3-13: Rückenprotector mit Beschleunigungssensor
- Bild 3-14: EVITA mit Zugfahrzeug
- Bild 3-15: Anschlussplan
- Bild 3-16: DESMORI Motorrad-Fahrsimulator
- Bild 4-1: Verzögerung Profil Bremsblock mit  $5 \text{ m/s}^2$  aus Zielgeschwindigkeit 70 km/h
- Bild 4-2: Zumutbarkeitsbewertung des Blockprofils bei 70 km/h (Tachoanzeige)
- Bild 4-3: Verzögerung Profil Rampe mit Gradient  $3 \text{ m/s}^3$  aus Zielgeschwindigkeit 90 km/h
- Bild 4-4: Zumutbarkeitsbewertung des Rampenprofils bei 70 km/h (Tachoanzeige)
- Bild 4-5: Verzögerung Profil Impuls mit  $7 \text{ m/s}^3$  aus Zielgeschwindigkeit 70 km/h
- Bild 4-6: Zumutbarkeitsbewertung des Impulsprofils bei 70 km/h (Tachoanzeige)
- Bild 4-7: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Zumutbarkeit beim Blockprofil
- Bild 4-8: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Zumutbarkeit beim Rampenprofil
- Bild 4-9: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Zumutbarkeit beim Impulsprofil
- Bild 4-10: Rollwinkelabhängigkeit der Zumutbarkeit von Verzögerungen in Kurvenfahrt
- Bild 4-11: Schematischer Ablauf des Versuchs am Beispiel einer Blockbremsung
- Bild 4-12: Beispielhafte Darstellung einer Blockbremsung
- Bild 4-13: Auswertung Blockbremsung
- Bild 4-14: Auswertung Bremsrampe
- Bild 4-15: Auswertung Bremsimpuls
- Bild 4-16: Auswertung Referenzbremsung
- Bild 4-17: Zusammenfassung Subjektivbewertung Bremseingriff
- Bild 4-18: Zusammenfassung Fragebogenauswertung
- Bild 4-19: Prozentualer Anteil der fahrerinduzierten Bremsungen am Vorderrad nach Eingriff des Notbremsassistenten.
- Bild 4-20: Bremsreaktionszeiten (Vorderradbremse) nach Eingriff des Notbremsassistenten.
- Bild 4-21: Prozentualer Anteil der fahrerinduzierten Bremsungen am Hinterrad nach Eingriff des Notbremsassistenten.
- Bild 4-22: Bremsreaktionszeiten (Hinterradbremse) nach Eingriff des Notbremsassistenten.
- Bild 4-23: Prozentualer Anteil der fahrerinduzierten Kupplungsbetätigungen nach Eingriff des Notbremsassistenten.
- Bild 4-24: Zeitpunkt der Kupplungsbetätigung nach Eingriff des Notbremsassistenten.

- Bild 4-25: Darstellung des Lenkwinkels über die Zeit in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe mit und ohne Warnung.
- Bild 4-26: Darstellung des maximalen Lenkwinkels (Betrag) pro Zeitschritt in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe mit Warnung. Der schwarze Balken kennzeichnet den Median, das Plus den Mittelwert. Kreise kennzeichnen milde Ausreißer, Sterne extreme Ausreißer.
- Bild 4-27: Darstellung des maximalen Lenkwinkels (Betrag) pro Zeitschritt in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe ohne Warnung. Der schwarze Balken kennzeichnet den Median, das Plus den Mittelwert. Kreise kennzeichnen milde Ausreißer, Sterne extreme Ausreißer.
- Bild 4-28: Darstellung des Lenkmoments über die Zeit in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe mit und ohne Warnung.
- Bild 4-29: Darstellung des maximalen Lenkmoments (Betrag) pro Zeitschritt in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe mit Warnung. Der schwarze Balken kennzeichnet den Median, das Plus den Mittelwert. Kreise kennzeichnen milde Ausreißer, Sterne extreme Ausreißer.
- Bild 4-30: Darstellung des maximalen Lenkmoments (Betrag) pro Zeitschritt in Abhängigkeit von der Bedingung für Eingriffe ohne Warnung. Der schwarze Balken kennzeichnet den Median, das Plus den Mittelwert. Kreise kennzeichnen milde Ausreißer, Sterne extreme Ausreißer.
- Bild 4-31: Störungsbewertung in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar).
- Bild 4-32: Prozentualer Anteil der Bewertungen entsprechend der Kategorien der Störungsbewertungsskala in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung.
- Bild 4-33: Situationsbewertung in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar).
- Bild 4-34: Prozentualer Anteil der Bewertungen entsprechend der Kategorien der Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung.
- Bild 4-35: Subjektive Bewertung der Warnung in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (Mit Warnung: Wie hilfreich war die Warnung?; ohne Warnung: Wie hilfreich wäre eine Warnung gewesen?, 0 = gar nicht, 15 = sehr hilfreich).
- Bild 4-36: Störungsbewertung im Erstkontakt in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar).
- Bild 4-37: Situationsbewertung im Erstkontakt in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar).
- Bild 4-38: Subjektive Bewertung der Warnung im Erstkontakt in Abhängigkeit der Bedingung für Fahrten mit und ohne Warnung (Mit Warnung: Wie hilfreich war die Warnung?; ohne Warnung: Wie hilfreich wäre eine Warnung gewesen?, 0 = gar nicht, 15 = sehr hilfreich).
- Bild 4-39: Abschließende subjektive Bewertung der Stärke des Bremsengriffs (-6 = viel zu sanft, 6 = viel zu stark) und des Zeitpunkts der Warnung (-6 = viel zu früh, 6 = viel zu spät)
- Bild 4-40: Subjektive Akzeptanzbewertung von Notbremsengriffen mit und ohne Warnung (-3 = starke Ablehnung, 3 = starke Zustimmung).

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

#### 2016

**F 112: Ersatz von Außenspiegeln durch Kamera-Monitor-Systeme bei Pkw und Lkw**

Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens

€ 17,50

**F 112b: Final Report Camera-Monitor-Systems as a Replacement for Exterior Mirrors in Cars and Trucks**

Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 113: Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe**

Bergk, Heidt, Knörr, Keller

€ 15,50

**F 114: Barrierefreiheit bei Fernlinienbussen**

Oehme, Berberich, Maier, Böhm

€ 17,50

**F 115: Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich – Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit**

Frey

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2017

**F 116: Lang-Lkw – Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt**

Süßmann, Förg, Wenzelis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 117: 7th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference 2016 at Hannover Medical School**

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 118: Bedeutung kompensativer Fahrerstrategien im Kontext automatisierter Fahrfunktionen**

Voß, Schwalm

€ 16,50

**F 119: Fahrzeugtechnische Eigenschaften von Lang-Lkw**

Förg, Süßmann, Wenzelis, Schmeier

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 120: Emissionen von über 30 Jahre alten Fahrzeugen**

Steven, Schulte, Hammer, Lessmann, Pomsel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 121: Laufleistungsabhängige Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen von neuen Pkw**

Pellmann, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2018

**F 122: Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge – Bedarfsanalyse auf Basis einer Vorstudie**

Auf der Maur, Strassburg, Knörr, Heidt, Wuethrich

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 123: Motorradschutzhelme – Identifizierung ihres Verbesserungspotenzials unter Berücksichtigung des Motorradunfallgeschehens**

Pollak, Schueler, Bourdet, Deck, Willinger

€ 19,50

**F 124: Aufbau eines Qualitätsmanagementsystems für die Erfassung und Weiterverarbeitung von Daten für IVS-Dienste**

Heinrich, Pollesch, Schober, Stamatakis, Grzebellus, Radike, Schneider, Stapelfeld, Huber

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 125: Untersuchung zu Elektrokleinstfahrzeugen**

Bierbach, Adolph, Frey, Kollmus, Bartels, Hoffmann, Halbach

€ 19,50

#### 2019

**F 126: Einfluss zunehmender Fahrzeugautomatisierung auf Fahrkompetenz und Fahrkompetenzerwerb**

Weißgerber, Grattenthaler, Hoffmann

€ 15,50

**F 127: Erhöhung der Verkehrssicherheit älterer Kraftfahrer durch Verbesserung ihrer visuellen Aufmerksamkeit mittels „Sehfeldassistent“**

Kupschick, Bürglen, Jürgensohn

€ 16,50

**F 128: Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung**

Rösener, Sauerbier, Zlocki, Eckstein, Hennecke, Kemper, Oeser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 129: Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung zur Vermeidung der Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer**

Kosmas, Kobbert, Khanh

€ 15,50

**F 130: Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens – Grundlagenprojekt**

Dierkes, Friedrich, Heinrich, Hoffmann, Maurer, Reschka, Schendzielorz, Ungureanu, Vogt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 131: Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssysteme (FAS/FIS) – Personale Voraussetzungen ihres Erwerbs und Nutzung durch ältere Kraftfahrerinnen und -fahrer**

Hargutt, Kenntner-Mabiala, Kauschner, Neukum

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2020

**F 132: Handbuch Barrierefreiheit im Fernbuslinienverkehr**

Boenke, Grossmann, Nass, Schäfer

€ 17,50

**F 133: Lkw-Notbremsassistentensysteme**

Seiniger, Heini, Bühne, Gail

€ 15,50

**F 134: Stationär-Geräusch von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen**

Altinsoy, Lachmann, Rosenkranz, Steinbach

€ 19,00

**F 135: Abweichungen von der akzeptierten Fahrleistungsschwelle in automatisierten Fahrsituationen**

Voß, Schwalm

€ 18,00

## 2021

### F 136: Kamera-Monitor-Systeme als Fahrerinformationsquelle

Leitner, Oehme, de Silva, Blum, Berberich, Böhm  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### F 137: Konzept für die Erzeugung eines ISO-konformen UML-Modells und Generierung eines GML-Applikationsschemas für DATEX II zur Verbesserung der Interoperabilität

Lauber, Steiger, Kopka, Lapolla, Freudenstein, Kaltwasser  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### F 138: Grundlagen zur Kommunikation zwischen automatisierten Kraftfahrzeugen und Verkehrsteilnehmern

Schaarschmidt, Yen, Bosch, Zwicket, Schade, Petzold € 16,50

### F 139: Einfluss von Notbremssystemen auf die Entwicklung von Lkw-Auffahrunfällen auf Bundesautobahnen

Straßgütl, Sander € 14,50

### F 140: Reibwertprognose als Assistenzsystem

Leschik, Sieron, Gregull, Müller, Trapp, Brandenburg, Haalman, Terpstra  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### F 141: Methoden für die Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion beim teilautomatisierten Fahren

Schömig, Wiedemann, Julier, Neukum, Wiggerich, Hoffmann € 18,00

### F 142: Schräglagenangst

Scherer, Winner, Pleß, Will, Neukum, Stanglmayr, Bäumler, Siebke, Prokop € 14,50

## 2022

### F 143: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbags

Holtz, Heidt, Müller, Johannsen, Jänsch, Hammer, Büchner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### F 144: Entwicklung eines Verfahrens zur Generierung eines Safety Performance Indikators aus der Bewertung von Euro NCAP

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### F 145: Regeneration von Partikelfiltern bei Benzin- und Dieselmotorkraftfahrzeugen

Langwald  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### F 146: Analysis of options for the creation of safety-related traffic information based on vehicle-generated data

Margalith, Sickenberger, Wohak  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### F 147: Automatische Notbremssysteme für Motorräder

Merkel, Pleß, Winner, Hammer, Schneider, Will  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

---

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.