

# Schräglagenangst

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 142

**bast**

# Schräglagenangst

von

Florian Scherer  
Hermann Winner

Technische Universität Darmstadt  
Fachgebiet Fahrzeugtechnik

Raphael Pleß  
Sebastian Will  
Alexandra Neukum

Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften – WIVW GmbH  
Veitshöchheim

Maximilian Stanglmaier  
Maximilian Bäuml  
Christian Siebke  
Günther Prokop

AMFD - Auto Mobil Forschung Dresden GmbH

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Fahrzeugtechnik Heft F 142**

**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 82.0710**  
Schräglagenangst

**Fachbetreuung**  
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 978-3-95606-622-1

Bergisch Gladbach, November 2021

## Kurzfassung – Abstract

### Schräglagenangst

Ziel des Projektes FE 82.0710/2018 „Schräglagenangst“, bearbeitet durch das Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt (TUDA), das Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH (WIVW) und Auto Mobil Forschung Dresden GmbH (AMFD), ist die Analyse gefahrener Schräglagen von Motorradfahrenden. Hierbei werden sowohl Alltags- wie auch Gefahrensituationen eines möglichst breiten Fahrendenkollektivs untersucht.

Zum einen soll projektseitig untersucht werden, ob ein schräglagenängstlicher Fahrendentyp existiert, der unabhängig von der Fahrsituation ein Überschreiten einer Rollwinkelschwelle vermeidet. Dieses Verhalten kann zu gefährlichen Situationen aufgrund zu hoher Kurvengeschwindigkeiten führen, obwohl diese durch größere Schräglagen vermieden werden könnten. Zum anderen soll in dem Projekt das Fahrendenverhalten bei situationsbedingtem Nichtausnutzen des möglichen Schräglagenpotenzials analysiert werden.

Im Rahmen dessen werden Methodiken zur Ermittlung des Fahrendenverhaltens in schräglagenängstlichen Situationen sowie zur Ermittlung eines schräglagenängstlichen Fahrendentyps entwickelt. Dazu gehören die Auslegung pseudo-kritischer Manöver zur Untersuchung des Fahrendenverhaltens im Teststreckenversuch sowie ein Fragebogen zur Ermittlung schräglagenängstlicher Fahrendentypen.

Ein weiteres Ziel dieses Projekts ist die breite Erfassung gefahrener Schräglagen von Motorradfahrenden im Straßenverkehr. Insgesamt werden drei verschiedene Messtechnikkonzepte umgesetzt. Das erste basiert auf einem Messmotorrad für Probandenfahrten im Straßenverkehr. Das zweite auf einer Smartphone-Application (App), die im Rahmen des Projekts entwickelt wurde. Bei der Smartphone-Application wird dabei auf die im Smartphone integrierten Sensoren zurückgegriffen. Das dritte Konzept zielt auf eine Stationärmesstechnik, die für einen Zeitraum von mindestens einem Tag oder länger in Kurvenbereichen aufgestellt werden kann, um dort ein möglichst großes Fahrendenkollektiv beobachten zu können, wenn auch mit Einbußen

bei den Kenntnissen über den jeweiligen Fahrendentyp bzw. das individuelle Fahrkönnen.

Im nächsten Schritt wird auf die Umsetzung der erarbeiteten Konzepte in Fahrversuchen eingegangen. Hier werden zwei verschiedene vordefinierte Streckenabschnitte im Dresdener Umkreis und in der Nähe von Würzburg beschrieben. Zudem wird die Umsetzung der pseudokritischen Manöver bei Teststreckenversuchen in Darmstadt dargelegt.

Im Rahmen der Fahrstudien in Würzburg und Dresden konnte aufgezeigt werden, dass sich im Alltag 75 % aller gefahrenen Schräglagen unter einem Schwellwert von 25° befinden. Hierbei weisen Fahrende mit höherer berichteter Schräglagenangst durchschnittlich geringere maximale Rollwinkel und Rollwinkelspektren auf. Weiterhin konnten erste alters- und fahrleistungsbedingte Abhängigkeiten der Schräglagen beobachtet werden.

In den Fahrversuchen auf abgesperrtem Gelände konnte eine Eignung der Manöver zur Untersuchung von Schräglagenangst-Phänomenen bestätigt werden. Eine allgemein gültige Reaktion auf eine bestimmte Situation konnte nicht nachgewiesen werden. Die Reaktionen sind sehr individuell und abhängig von dem sonstigen Fahrstil. Das plötzliche Auftauchen eines Hindernisses in einer nicht einsehbaren Kurve zeigte bei den meisten Fahrenden starke Reaktionen im Fahrverhalten.

Zusammenfassend wird innerhalb des Projekts die Hypothese der Existenz einer Schräglagenschwelle bestätigt. Diese ist jedoch nicht wie ursprünglich vermutet auf einen bestimmten Rollwinkelwert fixiert, sondern vielmehr eine persönliche und individuelle Schwelle. Sie wird weder in Normalsituationen noch in Schrecksituationen unterschritten, aber auch nicht deutlich überschritten. Dies bedeutet, dass bei der Notwendigkeit eines größeren Rollwinkels als des persönlich Maximalen ein Verlassen des eigenen Fahrstreifens und ein Unfall droht.

Hier wird als mögliche Weiterarbeit eine flächendeckende Studie zur Untersuchung der Steigerungsmöglichkeiten der eigenen Schräglagenschwelle empfohlen. Dies könnte zum Beispiel mit neuartigen Trainingskonzepten möglich sein.

## Corner Fear

The aim of the project FE 82.0710/2018 "Corner Fear", which is being carried out by the Department of Automotive Engineering (FZD) of the Technical University of Darmstadt (TU-DA), the Würzburg Institute of Transportation Sciences GmbH (WIVW) and Auto Mobil Forschung Dresden GmbH (AMFD), is to analyse the leaning positions of motorcyclists in everyday life and in dangerous situations for as many drivers as possible.

On the one hand, it is assumed that there is a type of rider who is afraid of leaning and who avoids exceeding a roll angle threshold regardless of the driving situation. On the other hand, the aim of this project is to analyse the driver's internal behaviour when the possible lean angle potential is not being exploited due to the situation.

Within the framework of this project, methods for determining driver behaviour in situations where the driver is afraid of leaning and for the methodical determination of a driver type that is afraid of leaning are developed. This includes the design of pseudo-critical manoeuvres to investigate driver behaviour on the test track as well as questionnaires to determine anxious drivers.

A further goal of this project is the broad detection of motorcyclists in sloping positions in road traffic. In total, three different measurement concepts will be implemented. The first is based on a measuring motorcycle for test rides in road traffic. The second is based on a smartphone application (app), which was developed within this project. The smartphone application makes use of the sensors integrated in the smartphone. The third concept aims at a stationary measurement technology that can be set up in curves for a certain period of time in order to be able to observe as large a driver collective as possible, albeit with a loss of knowledge of the respective driver's interior type and individual driving skills.

In the next step, the implementation of the developed concepts in driving tests is discussed. Here, two different pre-defined route sections in the Dresden area and near Würzburg are described. In addition, the implementation of pseudo-critical maneuvers in test track trials in Darmstadt is described.

Within the scope of the riding studies in Würzburg and Dresden it could be shown that in everyday life 75% of all driven lean angles are below a threshold

value of 25°. Riders with higher reported fear of leaning have lower maximum roll angles and roll angle spectra on average. Furthermore, the first age- and mileage-related dependencies of roll angles could be observed.

In the riding tests on closed off terrain, the suitability of the maneuvers for the investigation of cornering fear phenomena could be confirmed. A generally valid reaction to a specific situation could not be proven. The reactions are very individual and depend on the riding style. The sudden appearance of an obstacle in a curve that could not be seen showed strong reactions in the riding behaviour of most riders.

In summary, the hypothesis of the existence of a lean angle threshold is confirmed within the project. However, it is not fixed to a certain roll angle value as originally assumed, but rather a personal and individual threshold. It is not undercut in normal situations or in situations of shock, but it is also not clearly exceeded. This means that if a larger rolling angle is required than the personal maximum, there is a risk of leaving one's own lane and causing an accident.

In this case, a comprehensive study to examine the possibilities of increasing the own lean angle threshold is recommended as possible further work. This could be possible, for example, with innovative training concepts.

## Summary

### Corner Fear

## 1 Methodology

In order to collect relevant information on the possible presence of a roll angle threshold of motorcyclists, it is necessary to collect large amounts of data. Although detailed analysis of certain riders can reveal different riding styles, these do not allow for generalisation. Therefore, a large measurement campaign was planned in the project "Corner Fear", which was conducted by three project partners, the Department of Automotive Engineering of the TU Darmstadt (FZD), the Auto Mobil Forschung Dresden GmbH (AMFD) and the Würzburg Institute of Transportation Sciences (WIVW).

The division of the project team into three institutes allows on the one hand independent research priorities from different expertises and on the other hand extends the scope of the project to different regions of Germany.

It is easy to see that the quantity and quality of any data set varies depending on the method of collection. Data of the highest quality (resolution of sensors, knowledge of environmental factors, detailed knowledge about study participants, ...) is only possible with high technical and financial efforts and when collecting large amounts of data (large test person panel, many riders in different riding situations, ...), the data quality can only be lower. The project "Corner Fear" aims at a holistic collection of data both on mesoscopic and microscopic level (see figure 1-1) in normal riding as well

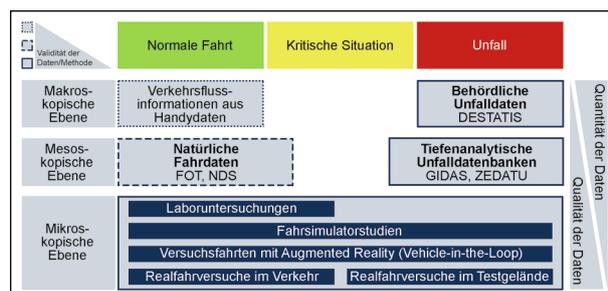


Fig. 1-1: Data basis and investigation methods according to traffic granularity and time sequence (PROKOP, 2017)

as in critical situations. Since the latter are fortunately rarely observed during natural riding in real road scenarios, the project presented here develops "pseudo-critical riding maneuvers" for application on closed test tracks, which allow statements to be made about situations experienced as critical without actually endangering test persons. All other data, on the other hand, are collected in public road transport. On the one hand, a mobile phone app is used for this purpose, which in the future will enable the unattended recording of large amounts of data. On the other hand, a panel of test persons will be examined in real riding with the help of a measuring motorcycle. This test panel also provides detailed subjective data on riding style and the perception of fear of leaning. A further method for the acquisition of riding data in real traffic is a stationary measuring technique, which in future might allow individual observations of accident black spots.

## 2 Test design

### 2.1 Pseudo-critical driving manoeuvres

For ethical reasons it is of course not permissible to deliberately expose test persons to a real critical situation. However, since an effect of a possible "fear of leaning" on riding behaviour is expected especially in critical situations, an investigation of these is desirable. For this purpose, riding tasks are implemented on a closed test track, which are changed after a few repetitions by the test engineer (e.g. trajectory changed at short notice or an obstacle appearing on the road), whereby sufficient safety reserves (run-out zones, possibilities for aborting the test) are always guaranteed. A "pseudo-criticality" is defined, which is the quotient of a subjectively felt criticality and a real criticality. It is shown that especially those maneuvers in which a passenger has no longer the ability to react (short-term nature of the event) and those maneuvers in which obstacles prevent a free ride (unexpected nature of the event) lead to high perceived criticality.

### 2.2 Real trips

In the Dresden and Würzburg areas, test rides are carried out in real road traffic, using a newly developed mobile phone app on the one hand and

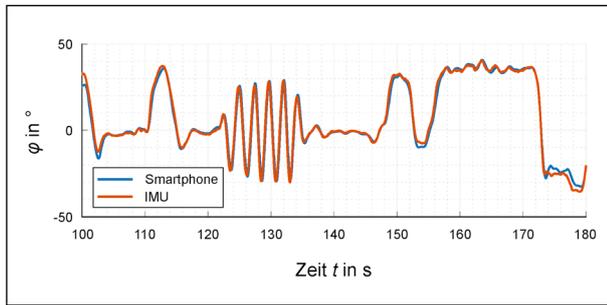


Fig. 2-1: Result data set roll angle cross validation Griefsheim

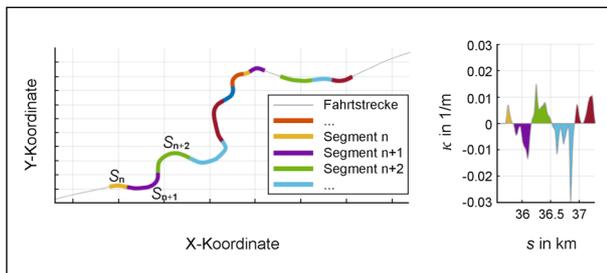


Fig. 2-2: Automatically captured curve segments

a test motorcycle equipped with measurement technology on the other hand. The smartphone application is suitable for the acquisition of acceleration, rotation rates and GPS information. Finally, filtering and post-processing methods provide vehicle dynamics data that are suitable for evaluating riding maneuvers. The signal quality of the smartphone based has been validated by comparative investigations in a cross comparison, just like the other measuring devices. Figure 2-1 shows corresponding measurement series comparing smartphone based measurements with data from professional inertial measurement technology.

The data collected in real traffic via a smartphone application and measuring motorcycle are fed into a segmentation for further use. For automated segmentation, the curvature sign changes is calculated. A segment between two sign changes is defined as a curve if the course angle of the motorcycle within the segment changes by more than  $10^\circ$ . An example of a corresponding segmentation is shown in figure 2-2.

In total, over 13,000 curve segments in the Würzburg and Dresden area are covered by the curvature-based separation of track sections. For further investigation, subsets of these segments are used, which for example show course angle changes, average speeds or average curve curvatures of a certain size.

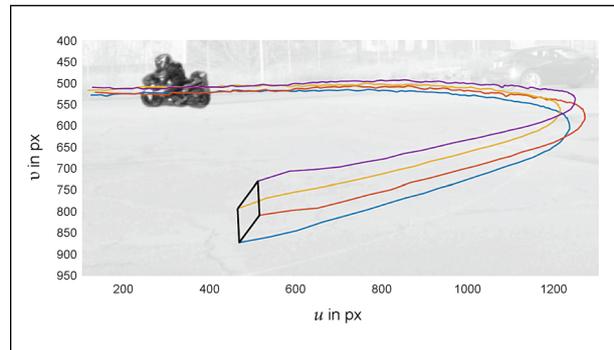


Fig. 2-3: Application of the stationary measuring technique, detected number plate track in the image

## 2.3 Measurement technology

Within the scope of the project “Corner Fear” different measurement concepts were implemented. On the one hand a smartphone based data acquisition routine was developed, put into operation and validated. In a first riding study the system was already successfully used.

Furthermore, different variants of a stationary measurement technology were put into operation as prototypes, which – even without having to carry measurement technology on the motorcycle – is intended to collect as much information as possible about cornering. Especially the ridden trajectory, speed and roll angle are relevant. In a product development process, after examining alternatives (RADAR, LIDAR), a system is finally recommended which, based on a combination of mono and stereo cameras, is able to detect the edges of a number plate and from this, to output an orientation of the filmed motorcycle relative to the camera, the roll angle. The result of such a license plate tracking is shown in the figure 2-3. The technology was implemented as a prototype and tested on the test site. An application in real traffic is reserved for future investigations.

## 3 Results

### 3.1 Real riding study

In a first exploratory study using smartphone-based measurement technology, 15 participants were examined. The study carried out with a measuring motorcycle in the Würzburg area comprises a further 27 study participants, of which 23 complete data sets were finally generated.

Several characteristic values result for each curve recorded in the course of real riding. In particular, the maximum roll angle, maximum roll rate, average speed and the deviation of the roll angle from a theoretical, steady-state roll angle per curve segment show good agreement with subjectively recorded anxiety ratings. No directional dependence could be observed comparing left- and right-hand corners.

The data collected shows a broad spectrum of roll angle distributions per study participant, which in itself does not allow any statements to be made about rider behavior or any lean angle threshold. Only through the reference to the recorded subjective assessments patterns become apparent.

Figure 3-1 shows the distribution of the maximum roll angles per curve segment aggregated over the test persons' fear evaluation. It can be seen that in principle a higher anxiety rating also leads to lower observed roll angles. However, it also shows that certain individuals show an unexpected result and may also have the highest rolling angles despite having the highest anxiety rating as well.

As a meaningful criterion for distinguishing between more or less anxious riders, the RMS value of the deviation of the ridden roll angle from the theoretical roll angle with assumed steady-state cornering is obtained. Figure 3-2 clearly shows a grouping of the study participants who were rather anxious (green) or less anxious (red) according to the preliminary survey. In particular, a proximity of the rider with the highest anxiety rating to the other riders classified as anxious is also evident here.

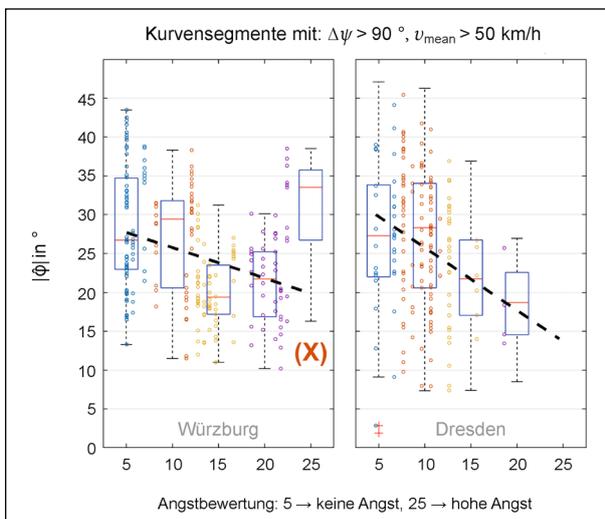


Fig. 3-1 : Rolling angle maxima as a function of subjective fear evaluation

## 3.2 Test person study measuring site

When performing pseudo-critical manoeuvres, indicators become apparent which allow a classification of rider types independent of a maximum roll angle. For example, the phase diagram of roll rate and roll angle shows a clear difference when passing a curve with an unexpected, hidden obstacle. For different types of riders, characteristic courses in the case of a pseudo-critical event can also be observed, as shown in figure 3-3. The hypothesis of an inclined position threshold in dangerous situations could not be proven, however, very strong reactions to correspondingly unforeseeable events have always become visible. A recommendation is therefore the further investigation of such reactions to possibly critical events in road traffic.

Definitely, clearly individual, rider dependent differences of the lean angle threshold have to be observed. Every rider has an individual maximum lean angle, which is never exceeded in any situation. No situation-dependent change of the lean angle

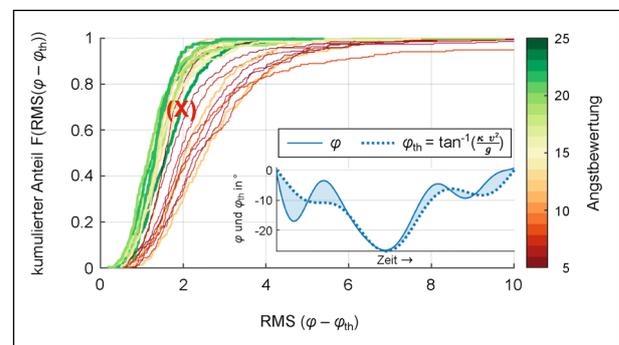


Fig. 3-2 : Cumulative RMS frequency of roll angle deviation

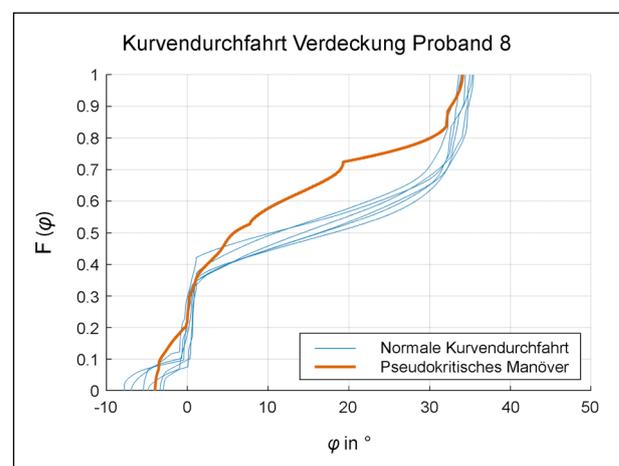


Fig. 3-3: Cumulative distribution of roll angle, pseudo-critical manoeuvre: hidden obstacle

threshold could be observed within the project. All riders regained their personal limit roll angle after a fright situation, even if after some strong interventions in the riding behaviour.

A first suspicion of a kind of fear of leaning was observed when comparing the roll rates between entering and exiting the curve. However, this is again very individual for each rider and requires further investigations.

## **4 Conclusion and outlook**

The present project presents different methods for the acquisition and evaluation of large amounts of data with relevance for the leaning behaviour of motorcyclists. With the development of a smartphone app it will be easy to create a larger database in the future. Comparable results could be collected in two studies with Smartphone App and a measuring motorcycle. There is a large scattering of the achieved roll angles of each rider in curves. The achieved lean angles are smaller for riders who are said to have a high fear of lean angles according to the preliminary survey. However, a clear slant threshold is not apparent from the data. It also shows that the self-evaluation of the study participants does not necessarily correspond to the recorded roll angles. Thus, even a participant with a high subjective fear rating can achieve high roll angles. In addition to the recording and evaluation of leaning positions alone, other indicators could be defined in the project which allow the separation of the test persons into more or less anxious riders.

Also in tests on closed test grounds, different behaviours in coping with critical riding situations could be observed. However, these are independent of the maximum roll angle reached during the test.

The use of stationary measuring technology for recording the roll angle, lane and vehicle speed has also proven itself on the test site. The system developed has great potential to analyse the riding behavior of a large number of different riders, for example at accident blackspots.

In the course of the project, no defined slant threshold could be determined. On the other hand, characteristic values and behaviour patterns were recorded which correlate with a subjectively recorded fear of roll angles.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	11	<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	37
1.1	Motivation und Projektziel .....	11	4.1	Realfahrstudie .....	37
1.2	Stand der Forschung .....	12	4.1.1	Schräglagenverteilung .....	38
1.2.1	Fahrdynamik .....	12	4.2	Probandenstudie Messgelände .....	43
1.2.2	Fahrfertigkeiten .....	14	4.2.1	Komfortbereich .....	43
1.2.3	Unfallgeschehen .....	15	4.2.2	Kritikalitätsbewertung .....	44
1.2.4	Schräglagenangst .....	15	4.2.3	Schräglagenschwelle .....	45
1.3	Einordnung des Projektes .....	17	4.2.4	Zusammenfassung Messgelände- Untersuchungen .....	49
1.3.1	Forschungsfragen und Hypothesen .....	17	4.3	Zusammenfassung .....	50
1.3.2	Betrachtete Situationen .....	17	<b>5</b>	<b>Fazit und Ausblick</b> .....	50
1.3.3	Untersuchungsschwerpunkte .....	17		<b>Literatur</b> .....	52
1.4	Potenzial .....	18		<b>Bilder</b> .....	53
<b>2</b>	<b>Methodik</b> .....	18		<b>Tabellen</b> .....	54
2.1	Messmethodik .....	18			
2.1.1	Objektive Kriterien .....	19			
2.1.2	Subjektive Kriterien .....	20			
2.2	Schräglagenangst .....	21			
2.2.1	Pseudokritikalität .....	21			
2.2.2	Manöverauswahl .....	22			
<b>3</b>	<b>Versuchsdesign</b> .....	22			
3.1	Realfahrten .....	23			
3.1.1	Auswahl der Fahrstrecken .....	23			
3.1.2	Datenauswertemethodik .....	25			
3.1.3	Auswahl der Fahrenden .....	26			
3.2	Messgelände .....	27			
3.2.1	Auswahl der Probanden .....	27			
3.2.2	Szenarien im Fahrversuch .....	28			
3.2.3	Ablauf des Fahrversuchs .....	29			
3.3	Messwerkzeuge .....	29			
3.3.1	Messfahrzeuge .....	30			
3.3.2	Messtechnik .....	31			
3.3.3	Zusammenfassung Messwerkzeuge .....	36			



## 1 Einleitung

Motorradfahren dient sowohl zum Transport als auch als beliebte Freizeitaktivität. Aufgrund des größeren Leistungs-Masse-Verhältnisses und des zusätzlichen Freiheitsgrades um die Rollachse sowie aufgrund der einspurbedingten statischen Instabilität unterliegen Motorräder prinzipbedingt anderen fahrdynamischen Grundlagen und Grenzen als bspw. Personenkraftwagen. Die Möglichkeiten bei der Wahl verschiedener Trajektorien eines Fahrenden sowie der Beeinflussung des Fahrverhaltens durch unterschiedliche Fahrstile sind zudem deutlich größer als bei einem Zweispurfahrzeug.

Um ein besseres Verständnis für die unterschiedlichen Fahrstile und das hiermit zusammenhängende Muster einer Kurvendurchfahrt zu erlangen, soll ein möglichst großes Fahrerkollektiv in Kurvsituationen untersucht werden. Es ist bisher keine Arbeit bekannt, die sich mit der Umsetzung dieser Messaufgabe und der flächendeckenden Datenaufnahme auseinandergesetzt hat.

Daher ist die Messung eines möglichst großen Fahrerkollektivs im Alltag ein Projektziel. Zusätzlich zu den Alltagssituationen ist ein Motorradaufsasse Gefährdungen im Straßenverkehr ausgesetzt, die bei positivem Ausgang zu einem Beinahe-Unfall, im schlimmsten Fall zu einem Unfall mit schwerwiegenden Folgen führen können. Um ein besseres Grundverständnis der in solchen Fällen vorherrschenden fahrdynamischen Zustände und explizit der Handlungen eines jeweiligen Fahrenden zu erreichen, ist wiederum eine Beobachtung und Messung der jeweiligen Größen notwendig. Ein gezieltes Provozieren solcher Gefährdungen im Straßenverkehr ist aus vor allem ethischen Gründen nicht sinnvoll oder gar machbar.

Das vorgestellte Projekt strebt daher eine reproduzierbare Methodik zur Untersuchung solcher Gefahrensituationen an, ohne die Sicherheit des Fahrenden zu gefährden.

Eine Methodik zur Untersuchung des Fahrendenverhaltens in potenziell kritischen Situationen mittels pseudokritischer Manöver wurde entwickelt und ist Teil dieses Berichtes. Die verwendete Messtechnik sowie die Messergebnisse der einzelnen Untersuchungen werden ebenfalls beschrieben und für die Beantwortung der zuvor definierten Forschungsfragen herangezogen.

### 1.1 Motivation und Projektziel

Motorradnutzer zählen als ungeschützte Verkehrsteilnehmer zu den am meisten gefährdeten Verkehrsteilnehmergruppen im Straßenverkehr (BRÄUTIGAM, HELLMANN & SEINIGER, 2018). Aufgrund ihrer Fahrdynamik und der Ortslage der Straßen, auf denen sie überwiegend unterwegs sind, ist die Schwere ihrer Unfälle überdurchschnittlich hoch und als weitgehend ungeschützte Verkehrsteilnehmer tragen sie bei Unfällen besonders häufig schwere Verletzungen davon. So ist das Risiko eines Motorradaufsassen je gefahrenem Kilometer im Vergleich zum Personenkraftwagen (Pkw) (vgl. Destatis, 2014 und BÄUMER, 2014):

- 3,9-fach höher, an einem Verkehrsunfall beteiligt zu sein,
- 6,7-fach höher, bei einem Verkehrsunfall zu verunglücken,
- 20,6-fach höher, bei einem Verkehrsunfall zu sterben.

In einer Studie, nachzulesen in BAUER (2014), wurde gezeigt, dass 45 % der getöteten Motorradfahrenden in einer Kurve verunglückten, wobei der typische Unfallablauf wie folgt beschrieben werden kann:

„Der Motorradfahrer verlässt aufgrund subjektiv zu hoher Geschwindigkeit und zu geringer Schräglage oder schlecht durchgeführter Bremsung seine Fahrspur tangential (meist im Bereich des Kurvenscheitels) und kollidiert entweder mit dem Gegenverkehr oder einem harten Gegenstand am Straßenrand (z. B. einem Baum oder Verkehrsschild). 30 % der Motorradfahrer versuchten ihre subjektiv zu hohe Geschwindigkeit durch ein Bremsmanöver zu reduzieren. Dabei bremsen sie entweder schockartig bis über die Blockiergrenze und stürzten oder konnten das auftretende Aufstellmoment nicht kompensieren und verließen ihre Fahrspur [sic]. Die restlichen 70 % zeigten keine Reaktion vor Verlassen ihrer Fahrspur [sic].“ (BAUER, 2014, S. 124)

Wie bereits durch SPIEGEL antizipiert, zeigt die Studie, dass kein Fahrer im Unfallablauf über 20° Schräglage gefahren ist (SPIEGEL, 2015). Gleichzeitig wird gezeigt, dass alle kritischen Situationen mit einer Vergrößerung der Schräglage auf bis zu 35° vermeidbar gewesen wären, unter der Annah-

me guter Randbedingungen wie einem trockenen und sauberen Straßenbelag.

Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden Faktoren identifiziert, die einen Einfluss auf die gefahrene Schräglage haben können. Eine Aufarbeitung der Thematik in der Literatur findet kaum statt. WINKELBAUER, SOTEROPOULOS und TOMASCH (2017) beschreiben, dass die Fahrerfahrung im Sinne einer Kilometerfahrleistung einen Einfluss auf die gefahrene Schräglage hat, während HÄDRICH (2012) einen Zusammenhang zwischen Fahrerfahrung in Jahren und Schräglage vermutet, diesen empirisch aber nicht bestätigen kann. Dem Bericht von PRASCHL (2000) folgend gibt es einen Zusammenhang zwischen verschiedenen Fahrertypen, wie etwa zügiger Einzelfahrer oder freundlicher Komfortfahrer, und der Unfallverwicklung. Eine zuverlässige Aussage hinsichtlich der Schräglagenaffinität lässt sich hier jedoch nicht treffen.

Hieraus resultierte das Projektziel, das Schräglagenverhalten von Normalfahrern in Alltagssituationen wie auch in kritischen Situationen zu untersuchen. Da bisher wenig über die Verteilung der gefahrenen Schräglagen bekannt ist, ist ein Ziel dieses Projektes, die Messung von Schräglagen in genau solchen Situationen zu ermöglichen. Ein Fokus liegt deshalb auf dem Vergleich verschiedener Messtechnikkonzepte zur Messung von Kurvenparametern. Parallel hierzu wird eine Methode zur Einteilung verschiedener Fahrendentypen anhand ihrer individuellen Risikobereitschaft entwickelt und mit den Messergebnissen aus einer Probandenstudie verglichen. Zudem wird eine Methodik entwickelt, die unerwartete Schrecksituationen untersucht, da bisher nur wenig über das Verhalten von Motorradfahrern in potenziell gefährlichen Situationen bekannt ist. Nach der Entwicklung dieser Methodik soll die Anwendbarkeit dieser in einer Probandenstudie auf abgesperrem Gelände überprüft werden.

## 1.2 Stand der Forschung

Im folgenden Kapitel werden Grundlagen zum Thema Fahrdynamik, Unfallgeschehen und -statistik sowie Erkenntnisse zu Fahrfertigkeiten von Motorradfahrer\*innen aufgeführt. Es werden verschiedene Messtechnikkonzepte in Hinblick auf die Messbarkeit von Fahrdynamikdaten im, am und von außerhalb des Fahrzeuges beschrieben.

### 1.2.1 Fahrdynamik

Das verwendete Koordinatensystem richtet sich nach DIN ISO 8855. Der Koordinatenursprung des fahrzeugbezogenen Rechtssystems befindet sich im Schwerpunkt des Fahrzeugs. Die Achsen werden mit  $(X_v, Y_v, Z_v)^T$  beschrieben.  $X_v$  liegt in der Fahrzeuglängsmittellebene und zeigt waagrecht nach vorne, während  $Y_v$  nach links zeigt und senkrecht auf dieser Ebene steht. Der Rechtskonvention entsprechend zeigt  $Z_v$  nach oben. Rotationen um die Achsen  $X_v$  und  $Y_v$  werden als Rollen und Nicken, sowie eine Rotation um die horizontalisierte (erd-feste) Achse  $Z_e$  als Gieren bezeichnet. Der Rollwinkel wird mit  $\varphi$  bezeichnet. Die Änderung dieser Größe, beziehungsweise die Ableitung des Rollwinkels, wird als Rollrate bezeichnet.

Anders als bei einem Zweispurfahrzeug wird bei einem Motorrad eine Schräglage benötigt, um eine Kurve mit der Krümmung  $\kappa = 1/r$  durchfahren zu können. Während ein Auto in der Kurvenfahrt nach kurvenaußen wankt, ist für ein Motorrad ein Rollwinkel in Richtung des Kurvenmittelpunkts erforderlich, um die Fliehkraft abzustützen.

Im Falle der stationären Kurvenfahrt zeigt die Resultierende aus Fliehkraft  $F_F = mv^2\kappa$  und Gewichtskraft  $F_G = mg$  durch die Reifenaufstandslinie. Bild 1-1 verdeutlicht diesen Zusammenhang unter der Annahme unendlich schmaler, unverformter Reifen (deshalb  $\varphi_{th}$ ) und der Vernachlässigung von Kreiselfräften.

Ein einfacher physikalischer Zusammenhang für den Rollwinkel  $\varphi$  lässt sich über die vektorielle Be-

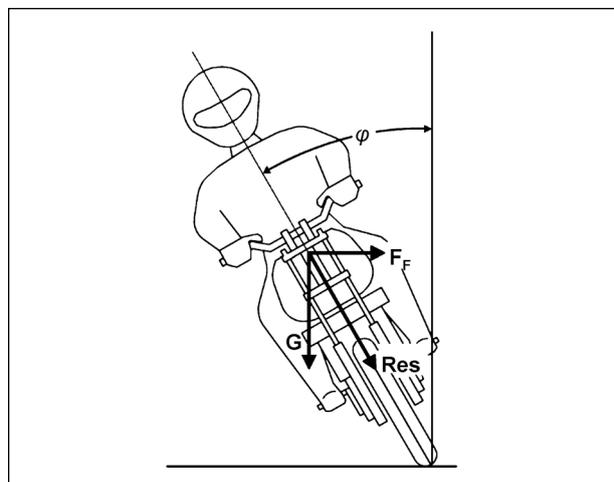


Bild 1-1: Rollwinkel und Kräftegleichgewicht während stationärer Kurvenfahrt

ziehung der Kräfte herleiten, wodurch folgender Zusammenhang entsteht:

$$F_G \sin \varphi_{\text{th}} = F_F \cos \varphi_{\text{th}} \Leftrightarrow \varphi_{\text{th}} = \arctan \frac{F_F}{F_G} = \arctan \frac{v^2 \kappa}{g} \quad (1.1)$$

Aus Gleichung (1.1) geht hervor, dass bei größerer Querbeschleunigung  $v^2 \kappa$ , also größerer Geschwindigkeit, ein größerer Rollwinkel zum Durchfahren der Kurve notwendig ist. Umgekehrt gilt, unter der Voraussetzung gleichbleibender Geschwindigkeit, dass bei großen Kurvenradien (= kleinere Krümmungen) ein geringerer Rollwinkel eingenommen werden muss als bei kleineren Radien.

Aufgrund der in der Realität endlichen Reifenbreite wandert der Reifenaufstandspunkt während einer Kurvenfahrt auf der Reifenoberfläche in Richtung der Kurvenmitte. Daher muss ein größerer Rollwinkel eingestellt werden, der sich aus dem physikalisch wirksamen Rollwinkel  $\varphi_{\text{th}}$  (Winkel zwischen der Vertikalen und der Verbindungslinie zwischen Schwerpunkt und Reifenaufstandspunkt) und einem zusätzlichen Winkel  $\varphi'$  (Winkel zwischen Fahrzeuglängsebene und der Verbindungslinie zwischen Schwerpunkt und Reifenaufstandspunkt) zusammensetzt. Bild 1-2 stellt diesen Zusammenhang dar.

Der geometrische Gesamrollwinkel  $\varphi_{\text{ges}}$  ergibt sich daher aus der Addition des physikalisch wirksamen Rollwinkels  $\varphi_{\text{th}}$  und dem Zusatzrollwinkel  $\varphi'$ . Der Zusatzrollwinkel entspricht im Durchschnitt ca. 10 %. In diesem Bericht wird vereinfachend bei der Nutzung des Begriffs Rollwinkel von dem geometri-

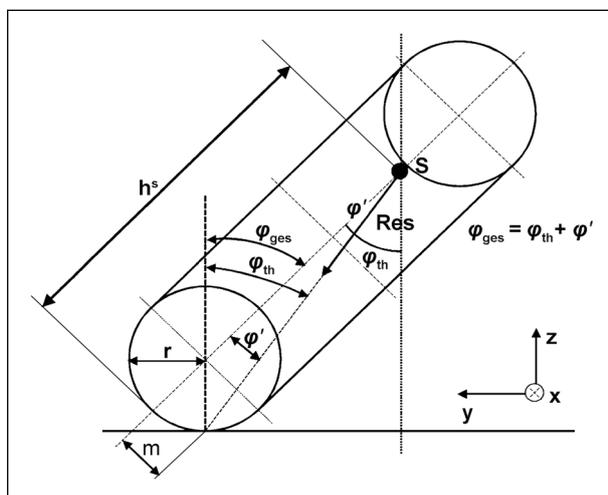


Bild 1-2: Zusammenhang zwischen theoretischem Rollwinkel und Zusatzrollwinkel (nach WEIDLE, 2018)

schen Rollwinkel gesprochen. Zudem wird darauf hingewiesen, dass dieser Winkel von der Querneigung der Fahrbahn abhängt, was bei fahrzeugfesten Messungen jedoch nicht berücksichtigt werden kann. Zudem existiert ein zusätzlicher Rollwinkel aufgrund der Kreiselkräfte, d. h. aufgrund aller rotatorisch bewegter Teile am Fahrzeug, der ca. 1 % des physikalisch wirksamen Rollwinkels beträgt.

$$\varphi_{\text{ges}} = \varphi_{\text{th}} + \varphi' \approx 1,1 \varphi_{\text{th}} \quad (1.2)$$

Aufgrund des bereits vorgestellten Zusammenhangs zwischen Flieh- und Gewichtskraft lässt sich für trockene Straßenverhältnisse und der Annahme eines Querreibwerts von  $\mu = 1$  ein maximal möglich fahrbarer theoretischer Rollwinkel von  $45^\circ$  errechnen. Dies entspricht aufgrund des Zusammenhangs mit der Reifenbreite real einem Rollwinkel von ca.  $50^\circ$ . Dieser kann aufgrund der heutzutage verwendeten Motorradreifen mit entsprechend höherem Reibwert als  $\mu = 1$  auch erreicht werden. Zum Beispiel bei der Paarung aus Sportreifen mit weicher Gummimischung und hochwertigem Asphalt. Beispielsweise im Rennsport werden deutlich größere Rollwinkel gefahren. Umgekehrt nimmt der maximal mögliche Rollwinkel bei niedrigerem Querreibwert, wie er bei widrigen Witterungsverhältnissen (Regen/Schnee/Eis) auftritt, auch deutlich geringere Werte an. Dies hat zur Folge, dass Motorradfahrende die Geschwindigkeit und damit die gefahrenen Rollwinkel immer den Umgebungsbedingungen anzupassen haben, da bei einer Fehleinschätzung ein Sturz die Folge ist.

Über den Reifen werden sämtliche Kräfte des Fahrzeuges an die Straße übertragen. Um fahrdynamische Grenzen aufzuzeigen, ist die Beziehung zwischen Längs- und Querkraften, zwischen Reifen und Fahrbahn zu betrachten. Dies kann mithilfe des Kamm'schen Kreises dargestellt werden. Dieser wird idealisiert als Kreis, korrekterweise jedoch als Ellipse dargestellt. In Bild 1-3 ist beispielhaft ein solcher Kamm'scher Kreis abgebildet. Die elliptische Form beruht auf dem Reifenaufbau. Dieser kann mehr Längskräfte als Seitenkräfte übertragen.

Der dargestellte Kamm'sche Kreis verdeutlicht das Verhältnis zwischen Längs- und Querkraften und gibt einige Beispiele für unterschiedliche Fahrsituationen an. Der Kreisdurchmesser resultiert aus der Normalkraft am Rad und dem Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn und entspricht der zur Verfügung stehenden Kraft.  $F_y$  beschreibt die Querkraft und  $F_x$  die Längskraft. Bei einer Überlagerung die-

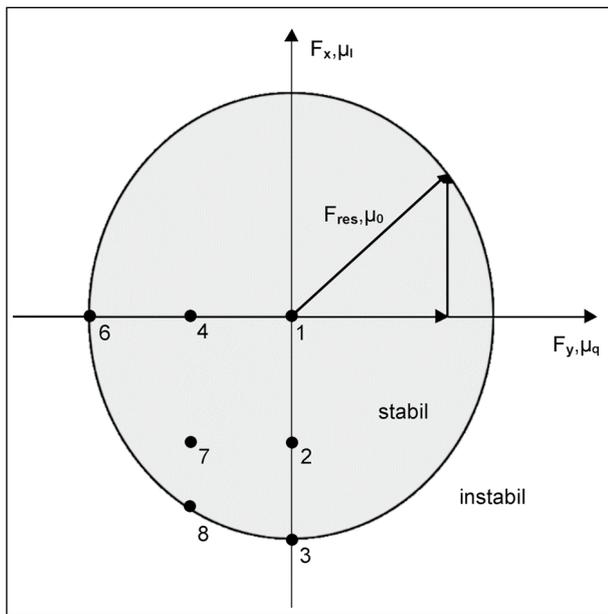


Bild 1-3: Beispielhafte Darstellung eines Kamm'schen Kreises

ser Kräfte resultiert ein Kraftvektor, der beispielhaft als Vektor  $F_{res}$  dargestellt ist. Bei einer konstanten Geradeausfahrt liegen weder Längs- noch Querkkräfte vor. Dieser Zustand ist mit Punkt 1 gekennzeichnet. Wird während der Geradeausfahrt eine Verzögerung aufgebaut, so verschiebt sich der resultierende Vektor hin zu Punkt 2. Bei einer maximal möglichen Verzögerung endet der resultierende Vektor in Punkt 3. Werden Querkräfte und keine Beschleunigung oder Verzögerung aufgebracht, was einer normalen Kurvenfahrt entspricht, resultiert Punkt 4. Punkt 6 hingegen kennzeichnet die maximal übertragbare Querkraft, ohne Überlagerung mit einer Längskraft. In kombinierten Fahrsituationen, wie einer Verzögerung in der Kurvenfahrt, endet der resultierende Vektor in Punkt 7, der aufgrund der Entfernung zur Kraftschlussgrenze ein ungefährliches Fahrmanöver darstellt. Bei einer Erhöhung der Verzögerung wird dieser hin zu Punkt 8 verschoben. Bei all diesen Erläuterungen wird deutlich, dass kombinierte Lastfälle immer in einer verminderten maximal übertragbaren Quer- und Längskraft resultieren.

Einfluss auf den geometrischen Rollwinkel haben nicht nur Geschwindigkeit, Kurvenradius und Reifenkontur. Einen wesentlichen Anteil haben Fahrer bzw. deren Fahrtechnik, da diese maßgeblich die Lage des Schwerpunkts des Gesamtsystems beeinflusst. Man unterscheidet zwischen drei Sitzpositionen: lean with, lean in und lean out, dargestellt in Bild 1-4. Zusätzlich kann man auch noch das hang off als Extremform des lean in anführen.

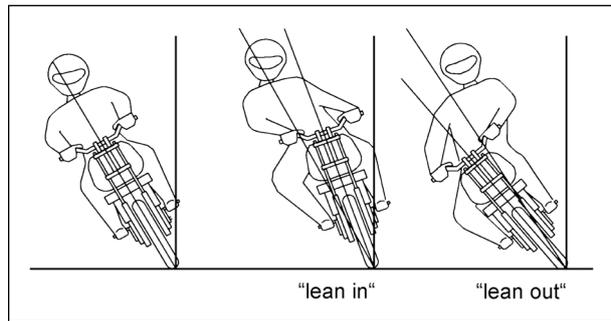


Bild 1-4: Verschiedene Fahrstile: lean in, lean out und lean with

Hierbei verlagert sich das Fahrer-Gewicht ins Kurveninnere, indem die Sitzbank verlassen wird und der gesamte Körper seitlich verschoben ist.

### 1.2.2 Fahrfertigkeiten

Es wird vermutet, dass das Abschneiden unterschiedlicher Fahrer in Schrecksituationen stark von deren Fahrfertigkeiten abhängig ist. Derzeit ist ein gezieltes Training von Kurvenfahren kein Bestandteil der Fahrer-Ausbildung. Hierfür sind mehrere Ursachen zu nennen:

- der Wunsch nach einem möglichst schnellen, günstigen Erhalt der Fahrerlaubnis,
- Nichtvorhandensein von Trainingsflächen für Ausbilder.

Ohne Eigenmotivation und finanzielles Engagement wird im Anschluss an die Erstausbildung kaum eine Verbesserung der Fahrfertigkeiten zu erreichen sein.

Die im vorangehenden Kapitel gezeigten g-g-Diagramme eignen sich nur begrenzt zur Bewertung von Fahrfertigkeiten. In laufenden Untersuchungen bei FZD werden weitere Kennwerte und Skalen entwickelt, die eine Bewertung der Fahrfertigkeiten ermöglichen. Hierzu ist unter anderem die Arbeit von MAGIERA (2016) zu nennen. Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst:

- Die Varianz der Rollrate während konstanter Kurvenfahrt – unerfahrene Fahrer weisen im Gegensatz zu erfahrenen Fahrern wesentlich größere Schwankungen des Rollwinkels innerhalb einer Kurve auf.
- Das gleichmäßige Erreichen der maximalen Schräglage in einer Kurve – erfahrene Fahrer erreichen den Zielrollwinkel i. d. R. durch einen

einzigem Einlenkvorang; der Verlauf der Rollrate gleicht einer Glockenfunktion. Bei unerfahrenen Fahrenden und Gelegenheitsfahrenden ist hingegen zu beobachten, dass zunächst eine erste Rollwinkelschwelle erreicht wird, bevor sich die Fahrenden erst in einem zweiten oder gar dritten Schritt dem Zielrollwinkel annähern.

### 1.2.3 Unfallgeschehen

Im Straßenverkehr kommt es täglich zu tödlichen Verkehrsunfällen, weshalb Unfallforschung zur Untersuchung unterschiedlicher Unglücksursachen betrieben wird. Die in Bild 1-5 dargestellte Statistik ordnet Unfälle mit Motorradfahrenden als Hauptunfallverursacher verschiedenen Unfalltypen zu. Mithilfe dieser Unfalltypen lassen sich sämtliche Unfälle in Kategorien einteilen. Das statistische Bundesamt definiert den Unfalltyp „Fahrnfall“ als einen aufgrund des Kontrollverlusts über das Fahrzeug ausgelösten Unfall durch nicht angepasste Geschwindigkeit oder z. B. Fehleinschätzung des Straßenverlaufs, bzw. -zustands, ohne einen Beitrag durch andere Verkehrsteilnehmer. Ein Zusammenstoß mit anderen Verkehrsteilnehmern als Folge der unkontrollierten Fahrzeugbewegungen ist dabei möglich (Statistisches Bundesamt, 2019). Weitere mögliche Ursachen für den Kontrollverlust können sein. Der Unfalltyp Fahrnfall ist demnach zu 52,0 % (Destatis, 2019) die Ursache für die erfassten Motorradunfälle.

Aufbauend auf dieser Erkenntnis setzt die Studie von BAUER et. al (2014) an, die beschreibt, dass sich 45 % aller Motorradunfälle in Kurven ereignen. Als Gründe werden zu geringe Rollwinkel und zu

hohe subjektive Geschwindigkeit angegeben. Infolge der daraus entstehenden kritischen Situation versuchen 30 % der Motorradfahrer ihre Geschwindigkeit durch ein Bremsmanöver zu reduzieren. Die restlichen 70 % der Unfälle weisen keine durchgeführten Bremsmanöver auf. Aufgrund von Unfalluntersuchungen wurde nachgewiesen, dass keiner der Verunglückten Schräglagen von 20° überschritten hat.

### 1.2.4 Schräglagenangst

Bild 1-6 stellt zwei Kamm'sche Kreise und deren Ausnutzung für verschiedene Motorradfahrende dar. Auch hier zeigt sich für einen ungeübten Fahrenden (links), dass der Bereich gefahrener Schräglagen bei ca. 20° (dies entspricht einer Querbeseleunigung von 0,36 g) begrenzt ist, während ein geübter Fahrender – zumindest im Rahmen der durchgeführten Messung ohne Gefahrensituation – diesen Wert überschreiten kann.

Der in Kapitel 1.1 erläuterte Unfallhergang lässt sich dahingehend wie folgt einordnen: Ein Aufsasse

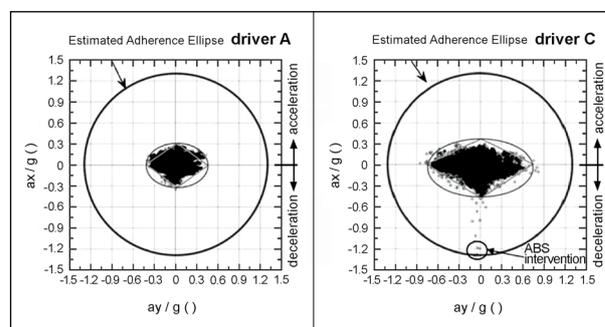


Bild 1-6: g-g-Diagramme zweier Motorradfahrer (BIRAL, 2010)

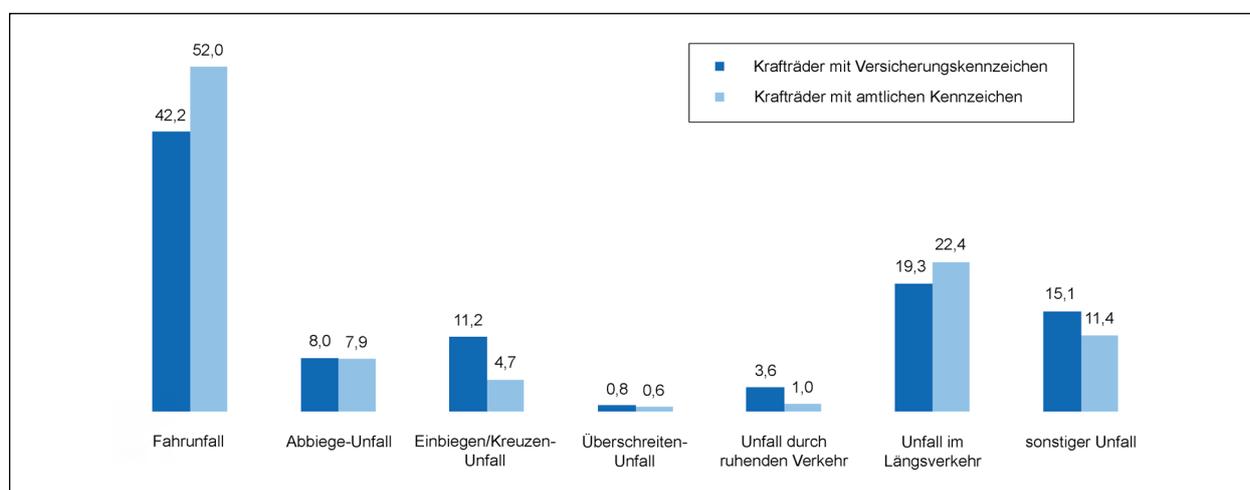


Bild 1-5: Motorradunfälle, gegliedert nach Unfallsituation, Statistisches Bundesamt (2019), S.38

befindet sich in Kurvenfahrt im äußeren Bereich seiner Komfortzone, dem typischerweise befahrenen und gewohnten Bereich des Kamm'schen Kreises. Tritt nun jedoch im Verlauf der Kurvenfahrt ein Ereignis auf, das Fahrende aus ihrer Handlungsroutine herauszwingt (Schrecksituation durch reale oder auch nur vermeintliche Gefahr), wird im Kamm'schen Kreis einen Pfad gewählt, der innerhalb der jeweiligen Komfortzone liegt. Bild 1-7 stellt dies schematisch dar. Nach Auftreten des Ereignisses (roter Stern) sind vielfältige Änderungen der vorhandenen Längs- und Querbewegungen möglich – der Aufsasse bzw. die Aufsassin befindet sich fernab jeglicher technischen Grenzwerte. Um jedoch in der Komfortzone bleiben zu können, ist zunächst lediglich die Reduktion der Schräglage möglich, bevor bspw. eine signifikante Verzögerung aufgebracht werden kann (blauer Pfeil). Handlungsalternativen wie z. B. das Vergrößern der Schräglage oder Verzögern in Schräglage werden nicht gewählt.

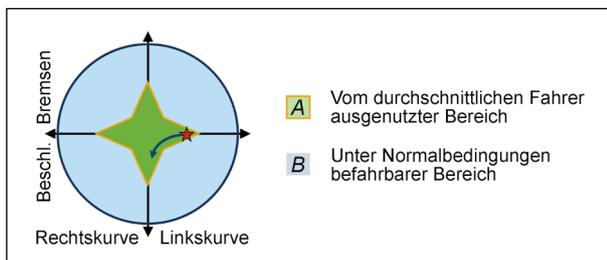


Bild 1-7: Von durchschnittlichen Fahrenden ausgenutzter Bereich des Kamm'schen Kreises

Das beschriebene Verhalten kann auch für das nachfolgende Fallbeispiel angenommen werden. Im Rahmen eines Fahrtrainings wurden hier Kurvenfahrten videografisch dokumentiert (siehe Bild 1-8).

Bild 1-8 zeigt, wie ein Trainingsteilnehmer zunächst noch erfolgreich mit hoher Schräglage in die Kurve einfährt. Zu einem späteren Zeitpunkt jedoch ist er nicht mehr in der Lage, diese Schräglage bis zum Ende der Kurvenfahrt beizubehalten, was auf einen Schreck durch das Wahrnehmen des entgegenkommenden Fahrzeugs zurückzuführen sein könnte. Durch das folgende Aufstellen des Motorrads resultiert schließlich eine reale Gefahr, da der Aufsasse beim Befahren eines weiteren Radius auf die Gegenfahrbahn gerät.

Das Beispiel zeigt, dass die Schräglage, die der Aufsasse zu fahren imstande ist, stark von der Fahrsituation abhängt. So ist es grundsätzlich offensichtlich (Bild links oben) sehr wohl möglich, Schräglagen oberhalb von  $20^\circ$  zu fahren, sodass die gezeigte Situation völlig unkritisch hätte durchfahren werden können. Erst als die Situation sich in einer für den Fahrenden unerwarteten Art ändert, fällt er auf eine niedriger liegende Schräglagenschwelle ab, die nun tatsächlich eine Gefahr darstellt.

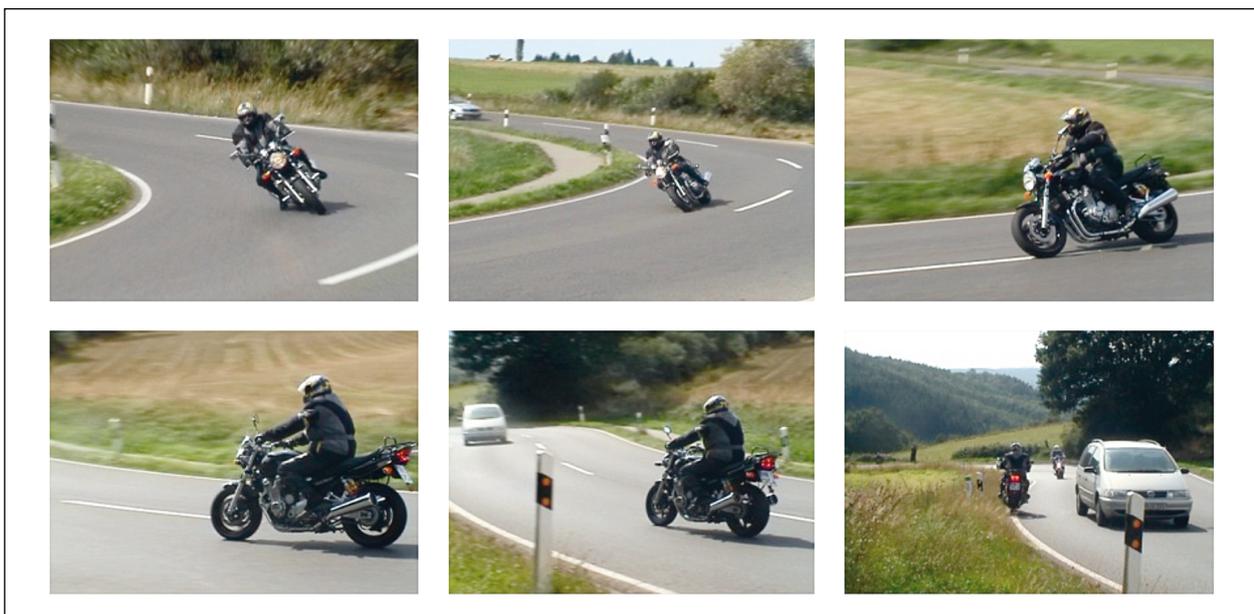


Bild 1-8: Bildfolge Schräglagenangst (©Wolfgang Stern, German Safety Tour Fahrertraining)

## 1.3 Einordnung des Projektes

Im Folgenden wird auf die wissenschaftlichen Fragestellungen, die mit dem Projekt beantwortet werden sollten, eingegangen sowie eine Aufstellung der betrachteten Situationen und Untersuchungsschwerpunkte gegeben.

### 1.3.1 Forschungsfragen und Hypothesen

Die beschriebenen Unfallszenarien lassen einen Zusammenhang zwischen den Fahrfertigkeiten, den Umgebungsbedingungen und der daraus resultierenden Fahrreaktion erwarten. Allgemein lässt sich aus den Beobachtungen die Hypothese aufstellen:

Es existiert eine Schräglagenschwelle bei Motorradfahrenden.

Hieraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Kann eine individuelle, fahrendenabhängige Schräglagenschwelle nachgewiesen werden?
- Ist eine vorhandene Schräglagenschwelle bei Motorradfahrenden situationsabhängig veränderlich?

Zudem stellt sich unabhängig von der Existenz einer Schräglagenschwelle die Frage nach den im Normalverkehr gefahrenen Schräglagen. Daher folgende weitere Forschungsfragen:

- Mit welcher Messmethode lassen sich die gefahrenen Schräglagen ermitteln?
- Welche Schräglagen werden vom Fahrenden in Normalsituationen gefahren?
- Sind Unterschiede bei Fahrenden in Abhängigkeit ihres Alters oder sonstiger persönlicher Kriterien beobachtbar?

### 1.3.2 Betrachtete Situationen

Für die Untersuchung der aufgestellten Forschungsfragen werden innerhalb des Projektes verschiedene Realfahrstudien durchgeführt. Hierbei wird sowohl im Straßenverkehr rund um Würzburg und Dresden als auch auf einem abgesperrten Testgelände in der Nähe von Darmstadt gemessen. Dadurch sollen sowohl alltägliche Situationen als auch vermeintliche Schrecksituationen messbar gemacht werden. Es wird sowohl mit den Privatfahrzeugen

der Probanden im Dresdner Umland und der Nutzung von Smartphone integrierten Sensoren als auch mit eigens ausgestatteten Messfahrzeugen rund um Würzburg und Darmstadt gemessen.

### 1.3.3 Untersuchungsschwerpunkte

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

- Ermittlung gefahrener Schräglagen eines möglichst breiten Fahrendenkollektivs,
- Methodenentwicklung zur Untersuchung des Vorhandenseins einer Schräglagenschwelle.

Dazu wurden die folgenden Untersuchungsschwerpunkte abgeleitet:

#### Vergleich verschiedener Messtechnikkonzepte zur Erfassung gefahrener Schräglagen

- Smartphone-Applikation,
- Messmotorrad,
- Stationärmesstechnik.

Somit kann ein Vergleich hinsichtlich der Messdatenqualität der verschiedenen Konzepte erfolgen und eine Empfehlung für die Nutzbarkeit der verschiedenen Methoden gegeben werden.

#### Messungen von Realfahrten, um gefahrene Schräglagen im Alltag zu ermitteln

Zur Ermittlung der gefahrenen Schräglagen im Alltag werden Probandenstudien mit Fahrenden durchgeführt, die entweder auf dem eigenen Motorrad oder einem mit Messtechnik ausgestatteten Messfahrzeug eine Strecke rund um Dresden oder Würzburg abfahren. Währenddessen werden die Fahrdynamikdaten mittels einer Smartphone-App oder der im Fahrzeug verbauten Inertialmesstechnik aufgenommen.

#### Zusammenhang zwischen Fahrfertigkeiten und Schräglagen/Schwelle

Im Anschluss an die Erfassung der Messdaten werden diese mit den Ergebnissen einer zuvor erfolgten Befragung zur Einschätzung der Risikobereitschaft der Fahrenden verglichen. Die Ergebnisse geben einen Einblick in die Vergleichbarkeit der Selbsteinschätzung des eigenen Verhaltens im Straßenverkehr und des realen Handelns der Person.

**Ermittlung eines Komfortbereichs des jeweiligen Fahrenden**

Während der Versuche auf dem Testgelände werden Fahrten durchgeführt, die den individuellen Komfortbereich der Fahrenden ermitteln und die Unterschiede der gefahrenen Schräglagen, getrennt nach Links- und Rechtskurven, ermöglichen. Dieser Komfortbereich wird mit dem Handeln in einer Schrecksituation verglichen.

**Untersuchung potenziell gefährlicher Situationen**

Um ein möglicherweise situationsbedingt unterschiedliches Fahrverhalten untersuchen zu können, sollen Fahrende beabsichtigt in Situationen gebracht werden, die real unkritisch sind, Fahrende aber aus der Komfortzone bewegen sollen. Hierdurch kann die Änderung des Verhaltens in solchen Situationen untersucht werden.

**Ableitung einer Methodik zum Nachweis einer Schräglagenschwelle**

Die genannten Untersuchungen bilden die methodischen Bausteine zur Untersuchung individueller Schräglagenschwellen, sowohl allgemein als auch situationspezifisch.

**1.4 Potenzial**

Bei Bekanntheit der gefahrenen Schräglagen, einem Zusammenhang mit der interindividuellen Risikobereitschaft und der Möglichkeit einer Unterscheidung zwischen Normal- und Gefahrensituationen können problemangepasste Trainingsmethoden entwickelt werden. Der Nachweis der Güte einer bestimmten Messmethode ist für zukünftige Projekte wertvoll, da die Datenerfassung eines größeren Fahrendenkollektivs ermöglicht wird sowie die zu erwartende Qualität dieser Messmethoden bekannt ist.

Ein verbessertes Training aufgrund neuer Erkenntnisse kann zu einer Verminderung von Alleinunfällen und somit geringeren Verletzten- und Getötetenzahlen führen.

**2 Methodik**

Im folgenden Kapitel wird die Methodik zur Messung gefahrener Schräglagen sowie weiterer Kurvenparameter aufgezeigt. Zudem werden mögliche Bewertungsgrößen für Fahrdynamik und Fahrendengrößen zusammengestellt.

**2.1 Messmethodik**

Für statistisch relevante Aussagen bzgl. Schräglagenschwellen sind große Datenmengen zu erfassen. Die Erfassungsmethoden können dabei nach der Granularität des Verkehrsraums und zeitlichem Ablauf unterteilt werden, wie Bild 2-1 nach PROKOP (2017) zeigt. Darin bezeichnet die makroskopische Ebene das globale Verhalten einer großen Menge von Verkehrsteilnehmern, die mesoskopische Ebene die Interaktion von Verkehrsteilnehmern untereinander und die mikroskopische Ebene das (re-)aktive Verhalten eines einzelnen Verkehrsteilnehmers.

Mit Untersuchungen auf mikroskopischer Ebene kann zwar die höchste Datenqualität erreicht werden, jedoch nur für eine begrenzte Menge an Probanden oder Wiederholungen, da diese i. d. R. kosten- und materialintensiv sind. So ist im Fahrversuch mit Messfahrzeug auf einer Teststrecke zwar eine hohe Datenqualität gegeben – eine Vielzahl an Fahrzeugzuständen ist messbar, die aufsitzende Person beobachtbar und der Testaufbau bekannt. Jedoch ist ein Messmotorrad teuer und aufwendig in der Wartung, und es steht je Zeiteinheit nur eine einzelne Testperson zur Verfügung. Zudem ist i. d. R. eine Versuchsbegleitung erforderlich. Mit dem Ziel, eine größere Datenmenge zu erreichen, muss nun entweder die Anzahl der Fahrenden und Fahrzeuge oder die Beobachtungsdauer vergrößert

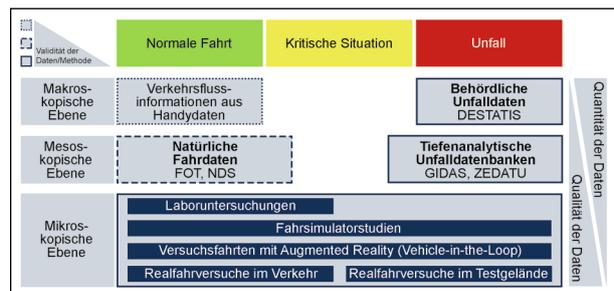


Bild 2-1: Datengrundlagen und Untersuchungsmethoden nach Granularität im Verkehr und zeitlichem Ablauf (PROKOP, 2017)

werden. Dies kann bspw. mit einer Studie zur Erfassung sogenannter natürlicher Fahrdaten erfolgen. Dabei werden mehrere Personen über längere Dauer im Realverkehr beobachtet. Entsprechend sind mehrere Fahrzeuge für längere Dauer mit robuster, leicht zu bedienender Messtechnik auszustatten. Diese wird – ohne den finanziellen Aufwand zu hoch zu setzen – nicht die gleichhohe Datenqualität erzeugen können wie ein vollausgestattetes Messmotorrad auf einem Prüfgelände. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass Messungen auf einem Prüfgelände in der Regel mit hohen Zusatzkosten verbunden sind, und sich zudem die Frage stellt, inwiefern die dargestellten Prüfsituationen die Realität widerspiegeln. Es ist daher davon auszugehen, dass die Datenqualität verschiedener Messmethoden nicht nur in Abhängigkeit von der Messtechnik variiert, sondern auch hinsichtlich der Fahrenden, des Messfahrzeugs und der Umwelt.

Bild 2-2 stellt diesen Sachverhalt dar. Darin wird eine erwartete Datenqualität über der erreichbaren Testpersonenzahl und der möglichen kumulierten Beobachtungsdauer für drei beispielhafte Erfassungsmethoden aufgeführt.

Wie zuvor beschrieben besitzt die Datenerfassung auf einem Versuchsgelände die höchstmögliche Datenqualität. Fahrende, Motorrad und Umwelt sind für die kurze Dauer eines Versuchs vollständig identifiziert.

Die Durchführung von Messungen auf einem Privatfahrzeug reduziert die Informationen, die jeweils

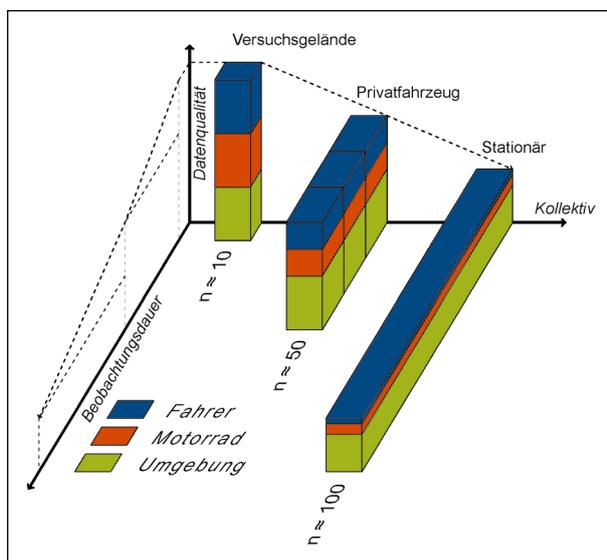


Bild 2-2: Datenqualität unterschiedlicher Messmethoden (qualitative Darstellung)

zur Verfügung stehen. So kann der Fahrende nicht mit hochtechnischen Messinstrumenten (Bodytracking, Eyetracking etc.) ausgerüstet werden und auch die Motorradmesstechnik besitzt einen niedrigeren Qualitätsstandard. Die Umgebung kann bspw. durch GPS-Daten klassifiziert werden, und Kameradaten könnten bei der Situationsanalyse helfen, doch sie ist niemals so gut kontrollierbar wie auf dem Testgelände. Vorteilhaft bei Messungen mit dem Privatfahrzeug ist jedoch, dass die Beobachtungsdauer und das erreichbare Kollektiv größer sind als auf dem Testgelände. Zudem ist davon auszugehen, dass Fahrende mit ihrem Privatfahrzeug besser vertraut sind als mit einem zur Verfügung gestellten Messmotorrad, wodurch sich die Aussagekraft der gewonnenen Erkenntnisse in dieser Hinsicht erhöht.

Maximal werden Beobachtungsdauer und Kollektiv bei stationären Verkehrsbeobachtungen an Gefahrenstellen. Einzelne Fahrende, die über eine jeweils sehr kurze Dauer beobachtet werden, sind hier zwar nicht identifizierbar (außer sie werden später angehalten und befragt) und auch über die Fahrdynamik sind nur optisch messbare Zustände bekannt, dafür kann eine große Zahl verschiedener Fahrenden(-typen) bei gleichbleibenden und bekannten Umgebungsbedingungen beobachtet werden. Zudem kann auch hier davon ausgegangen werden, dass das natürliche Fahrverhalten der Fahrenden beobachtet wird und dies nicht durch die Versuchsumgebung beeinflusst wird.

Kamerabasierte stationäre Untersuchungen bzgl. des Kurvenfahrverhaltens von Motorradfahrenden werden bspw. vom österreichischen Kuratorium für Verkehrssicherheit durchgeführt (WINKELBAUER, 2014).

### 2.1.1 Objektive Kriterien

Zur Bewertung verschiedener Fahrender wird eine möglichst objektive Bewertungsmetrik angestrebt. Im Vergleich zu subjektiven Kriterien sind diese komplett unabhängig von der Selbsteinschätzung des eigenen Verhaltens der Probanden. Folgend werden einige Beispiele genannt, die zum Vergleich des Schräglagenverhaltens unterschiedlicher Fahrender geeignet sind:

#### Rollwinkel

Der Rollwinkel ist bis auf geringe Abweichungen (siehe Kapitel 1.2.1) eine direkte Größe, die das

Schräglagenverhalten der Fahrenden abbilden kann. Hieraus lässt sich zum Beispiel die maximal gefahrene Schräglage oder auch eine individuelle Schräglagenschwelle ablesen. Daher ist die Betrachtung des Rollwinkels in diesem Projekt unabdingbar.

### Rollrate

Als Ableitung und somit Änderung des Rollwinkels gibt die Rollrate Aufschluss über die Kontinuität einer Rollbewegung und somit Gleichmäßigkeit, mit der ein bestimmter Zielrollwinkel angefahren wird. Insbesondere bei einer Gegenüberstellung von Rollwinkel und Rollrate sind bei der Existenz einer Schräglagenschwelle sichtbare Ergebnisse zu erwarten, da hierüber die Kontinuität der Rollbewegung und ein möglicher Unterschied dieser bei einer bestimmten Schwelle sichtbar werden.

### Geschwindigkeit

Wie in Gleichung (1.1) beschrieben, besteht ein fester Zusammenhang zwischen gefahrener Geschwindigkeit und der Schräglage in einer Kurve. Zudem ermöglicht der Vergleich der gefahrenen Geschwindigkeit einen Vergleich der Risikobereitschaft im Straßenverkehr.

### Beschleunigung

Aufgrund des Zusammenhangs der maximal übertragbaren Kräfte am Reifen und der entsprechenden Quer- und Längsbeschleunigungen ist eine Auswertung der Beschleunigungen für die Betrachtung der realen Kritikalität sinnvoll.

#### 2.1.2 Subjektive Kriterien

Die Subjektivbewertung erfolgt mithilfe eines Fragebogens, hierbei wird unterschieden in den im Folgenden beschriebenen Fragebogen zur Ermittlung des Typs des/der Fahrenden sowie die Subjektivbewertung zur Einschätzung der Kritikalität, die Teil der in Kapitel 2.2 vorgestellten Methodik ist.

### Fahrendentyp

In Vorbereitung zur Realfahrstudie erfasste Daten aus einem Online-Fragebogen liefern Details zu demografischen Merkmalen wie Alter, Geschlecht und Fahrerfahrung der späteren Versuchsteilnehmer (Fragebogen Teil A). Des Weiteren wird der

vom WIVW entwickelte „Fragebogen zur Typisierung von Motorradfahrer\*innen“ eingesetzt (Fragebogen Teil B), der einer Unterscheidung zwischen sportlichen und defensiven Fahrenden dient. Ergänzende Fragen (Fragebogen Teil C) zielen auf das Erleben von kritischen Fahrsituationen, insbesondere in Verbindung mit Schräglage ab.

Für die Zuteilung einzelner Probanden in drei exemplarisch gewählte Fahrtypen „Sportlich“, „Defensiv“ und „Konstant“ werden 24 Items auf einer 7-stufigen Skala (1 – trifft nicht zu, 7 – trifft zu) beantwortet.

Die Antworten werden einer Faktorenanalyse zugeführt, welche drei voneinander unterscheidbare Cluster ergibt. Die entsprechenden charakterisierenden Begriffe werden zugeordnet.

Die einzelnen Items sind jeweils einem Fahrendentyp zugeordnet. So ist bspw. eine Zustimmung zur Abfrage „Ich versuche möglichst sparsam Motorrad zu fahren“ klar einem defensiven Fahrstil zuzuordnen, während eine Zustimmung auf „Nach Möglichkeit nutze ich die Gegenfahrbahn, um dynamischer fahren zu können“ offensichtlich für eine sportliche Fahrweise spricht. Aus allen Abfragen, die konkret einem Fahrendentyp zugeordnet werden können, wird jeweils ein Mittelwert gebildet, sodass schließlich Fahrende aus drei Mittelwerten für „Sportlich“, „Defensiv“ und „Konstant“ beschrieben werden kann. Zur eindeutigen Zuteilung eines Fahrenden zu einem einzelnen Fahrendentyp wird der jeweils höchste Mittelwert herangezogen. Das Vorgehen ist in Bild 2-3 skizziert.

### Umgang mit Schräglage

Neben den 24 Items zur Erfassung des Fahrendentyps dienen 5 Fragen explizit zur Einschätzung der Ängstlichkeit gegenüber Schräglage:

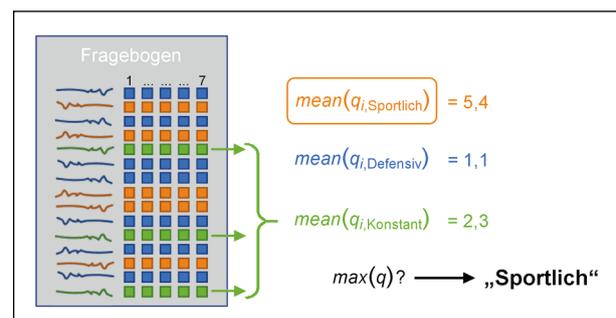


Bild 2-3: Erfassung des Fahrendentyps

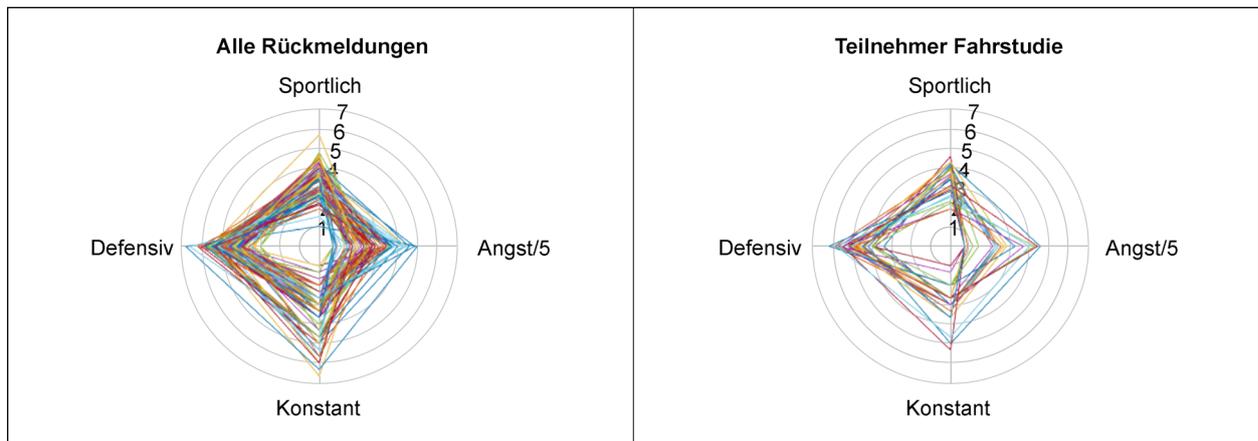


Bild 2-4: Subjektivbewertungen des Probandenpanels

- „Ich habe Bedenken, eine bestimmte Schräglage zu überschreiten, obwohl mein Motorrad dazu in der Lage wäre.“
- „Ich fühle mich unsicher, wenn ich eine gewisse Schräglage erreiche.“
- „Ich habe die Befürchtung, dass ich in Schräglage die Kontrolle über mein Motorrad verliere.“
- „Ich vermeide es, große Schräglagen zu fahren.“
- „Ich finde große Schräglagen bedrohlich.“

Die Summe der Einzelbewertungen ergibt einen Wert zwischen 5 (keine Anzeichen von Schräglagenangst) und 35 (große Anzeichen von Schräglagenangst) bei Nutzung einer 7-stufigen Skala (1: trifft nicht zu, 7: trifft zu, dazwischen keine weiteren verbalen Anker). Zur Vergleichbarkeit mit Daten, die in einer 5-stufigen Skala erfasst wurden, werden die hier erfassten Daten von maximal 35 erreichbaren Punkten auf 25 erreichbare Punkte normiert. Aus 79 vollständig beantworteten Fragebögen ergeben sich somit Aussagen über den Fahrerentyp. Zur Durchführung der Realfahrversuche wurden zunächst diejenigen Probanden eingeladen, die auf der Schräglagenangstbewertungsskala Extremwerte zeigten, also sehr starke oder sehr schwache Indikatoren von Schräglagenangst aufwiesen. Bild 2-4 zeigt diese Auswahl.

## 2.2 Schräglagenangst

### 2.2.1 Pseudokritikalität

Zur Untersuchung des Fahrverhaltens in potenziell kritischen Manövern ist eine Methodik unverzichtbar. Eingegliedert sind diese Untersuchungen nach

Kapitel 2.1 auf mikroskopischer Ebene, das heißt, es handelt sich hierbei um Untersuchungen auf abgesperrtem und sicherem Gelände mit einem detaillierten Wissen über den jeweiligen Fahrenden und der Möglichkeit des Einsatzes eines Messmotorrades zur Ermittlung sehr umfangreicher und exakter Daten. Dies ist essenziell für die grundlegende Überprüfung der Anfangshypothese einer situations- und fahrendenabhängigen Schräglagenschwellexistenz.

Der Begriff pseudokritisch beruht auf der Begrifflichkeit der Kritikalität und impliziert gleichzeitig eine rein hypothetische Existenz dieser. Dies bedeutet, dass die entwickelte Methodik dem Probanden das Gefühl einer kritischen Situation bei gleichzeitig fahrphysikalisch unkritischem Fahrzustand vermitteln muss. Hieraus ist folgende Definition der Pseudokritikalität entstanden:

$$K_{pseu} = \frac{K_{subj}}{K_{real}}$$

wobei die Faktoren im Falle der subjektiven Wahrnehmung im Wertebereich  $0 \leq K_{subj} \leq 1$  und  $0 < K_{real} \leq 1$  liegen können. Für Pseudokritikalitätsfaktoren  $>1$  wird ein Fahrmanöver als pseudokritisch angenommen. Dies bedeutet, dass der Proband die Kritikalität eines Fahrmanövers stärker bewertet als es fahrdynamisch der Fall ist.

Zur Bewertung der wahrgenommenen Kritikalität werden die Fahrenden im Anschluss an ein Manöver befragt. Die hierfür verwendete Likert-Skala ist in Bild 2-5 dargestellt.

Angelehnt ist dieses Vorgehen an ein Verfahren zur Ermittlung des Risikobewusstseins und der Kritikalitätsbewertung durch Fahrende nach BANET und

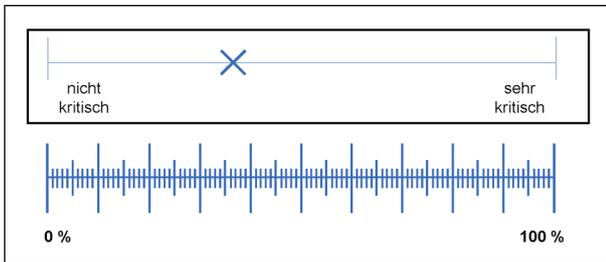


Bild 2-5: Likert-Skala und Skala zur Auswertung der Kritikalität

BELLET (2008). Über die Erstellung eines semantischen Differentials ist ein Fragebogen zur Beurteilung der Kritikalitäts- sowie Situationsbewertung durch Fahrende erstellt worden. Dieser Fragebogen wird direkt nach Durchführung eines jeden Manövers beantwortet, um eine Trennung der verschiedenen Manöver sowie eine hohe Präsenz des Erlebten sicherzustellen. Die reale Kritikalität  $K_{real}$  wird folgendermaßen ermittelt:

$$K_{real} = \tilde{a}_{ges} / a_{max}$$

wobei  $\tilde{a}_{ges}$  dem Median der resultierenden Beschleunigung in Längs- und Querrichtung in einer betrachteten pseudokritischen Situation entspricht.  $a_{max}$  beschreibt die maximal mögliche Beschleunigung bei der Annahme eines Reibwertes von  $\mu = 1$ , was bei trockenen Bedingungen und gutem Fahrbahnbelag eine eher konservative Abschätzung ist.

### 2.2.2 Manöverauswahl

Weiterhin ist eine Auswahl der zu untersuchenden Manöver so durchzuführen, dass damit ein möglichst umfangreicher Anteil aller im Straßenverkehr auftretenden Situationen abgedeckt ist. Gleichzeitig impliziert sowohl der Begriff der Schräglagenangst als auch die Stützung auf Unfallanalysen, wie z. B. durch SCHWIFCZ (2018), eine Auswahl von Manövern in Schräglagen- also Kurvensituationen.

Der starke Unterschied zwischen Links- und Rechtskurven in Bild 2-6 beruht auf der alleinigen Betrachtung von Alleinunfällen, da in Rechtskurven (also Innenkurven) bei einem Verlassen des eigenen Fahrstreifens das Kollisionsrisiko mit zum Beispiel einem anderen Fahrzeug größer ist, was wiederum nicht als Alleinunfälle in der Statistik geführt wird.

Für die Ermittlung wichtiger Manöver ist zunächst eine Einteilung potenzieller Gefährdungen im Straßenverkehr sinnvoll. Eine mögliche Kategorisierung über entsprechende Einflussfaktoren ist in Bild 2-7 dargestellt. Hierbei wurden die beeinflussenden,

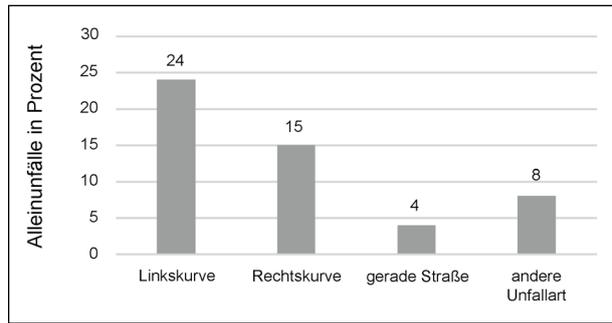


Bild 2-6: Alleinunfälle nach SCHWIFCZ (2018)

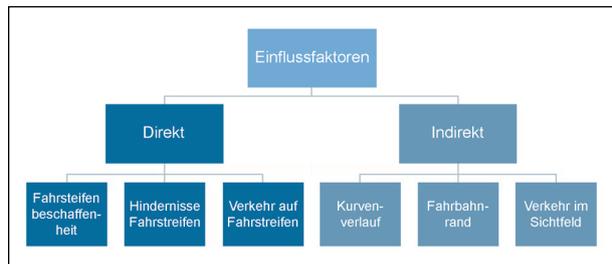


Bild 2-7: Einflussfaktoren, die zu potenziell kritischen Situationen führen können.

auftretenden Ereignisse in direkte und indirekte Einflussfaktoren unterteilt.

Unter Beeinflussung dieser Faktoren und basierend auf der Analyse der Unfalldatenbank des Statistischen Bundesamtes (2019) sind folgende Fahrmanöver zur Untersuchung von Schräglagenangst als geeignet ausgewählt worden:

- Kurve mit verschiedenen Radien, mehrfach durchfahren (nach Ansage oder überraschend),
- Kurve mit im Verlauf veränderlichem Radius (Hundskurve) und
- Hindernis im verdeckten Kurvenbereich.

## 3 Versuchsdesign

Das Versuchsdesign der Fahrversuche für die Aufzeichnung der Messdaten innerhalb dieses Projektes richtet sich nach der in Kapitel 2.1 vorgestellten Methodik. Es wird unterschieden zwischen der Granularität des Verkehrsraums sowie der erreichbaren Qualität und Quantität der Daten je nach Messwerkzeug und der damit einhergehenden Versuchsumgebung. Somit wird eine Unterteilung der durchgeführten Versuche nach Realfahrten und Untersuchungen auf abgesperrtem Messgelände vorgenommen. Wie bereits beschrieben, dienen die in-

nerhalb dieses Projektes durchgeführten Untersuchungen als Grundlage für mögliche weiterführende Studien und sind daher insgesamt nach Bild 2-1 der mikroskopischen Ebene zuzuordnen.

Um möglichst unverfälschte und natürliche Fahrdaten verschiedener Fahrenden zu erhalten, werden Untersuchungsfahrten mit Fahrenden im Realverkehr durchgeführt. Ausführlich behandelt wird dies in Kapitel 3.1. Die durchgeführten Fahrten finden jeweils in der räumlichen Umgebung der Projektpartner AMFD in Dresden und WIVW in Würzburg statt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird ein möglichst ähnlicher Streckenverlauf an beiden Versuchsstätten ausgewählt, näher erläutert in Kapitel 3.1.1. Im Dresdner Umkreis sind die Fahrenden zudem mit ihren jeweiligen Privatfahrzeugen, ausgestattet mit einem Mess-Smartphone inkl. im Projekt entwickelter Mess-Application, unterwegs. Seitens des WIVW steht ein Messmotorrad mit Zugriff auf interne Sensorik zur Verfügung. In Kapitel 3.1.2 wird die Methodik zur automatisierten Auswertung der aufgezeichneten Daten vorgestellt und im Anschlusskapitel näher auf die Auswahl der Fahrenden für die Untersuchungen eingegangen.

Seitens FZD wurden alle Versuchsfahrten auf abgesperrtem Gelände durchgeführt, aufgeführt in Kapitel 3.2. Dies bietet zum einen die Möglichkeit, bei sehr genauen Strecken- und Umgebungskennnissen die verschiedenen Messwerkzeuge untereinander vergleichen zu können, und zum anderen die in Kapitel 2.2 entwickelte Methodik in sicherer Umgebung umzusetzen. Hierfür werden in Kapitel 3.2.2 die in den jeweiligen Untersuchungen gefahrenen Szenarien vorgestellt und im Anschluss eine Aufzählung des Untersuchungsablaufes gegeben.

Während eines Kreuzvergleichs wurden innerhalb des Projektes die verschiedenen Messwerkzeuge sowohl in Referenz auf ein hochpräzises Messsystem als auch untereinander verglichen. Vorgestellt werden die genutzten Messwerkzeuge in Kapitel 3.3. Hierbei wird unterteilt in die jeweils genutzten Messfahrzeuge der verschiedenen Projektpartner. Ein Vergleich der verschiedenen Fahrzeuge ist sinnvoll, da jedem Partner für die Durchführung der entsprechenden Untersuchungen lokal das eigene Fahrzeug zur Verfügung stand. Im daran anschließenden Kapitel 3.3.2 werden die unterschiedlichen Messwerkzeuge näher beschrieben. Hervorzuheben ist hier die Entwicklung einer entsprechenden Smartphone-Applikation seitens des Partners AMFD und die durch FZD untersuchten Messwerk-

zeuge Radar, Lidar und Mono- bzw. Stereokamera hinsichtlich ihrer Eignung für stationäre Messungen vorbeifahrender Fahrzeuge.

## 3.1 Realfahrten

Nachfolgend werden die innerhalb des Projektes durchgeführten Untersuchungen im realen Straßenverkehr im Raum Dresden und Würzburg hinsichtlich der Auswahl der Fahrtstrecken und Fahrenden sowie der automatisierten Auswertemethodik der aufgezeichneten Daten vorgestellt.

### 3.1.1 Auswahl der Fahrtstrecken

Für die vorliegende Studie ist es hoch relevant, dass der Großteil der Versuchsstrecke auf Landstraßen mit hohem Kurvenanteil verlaufen sollte. Hier ist eine besondere Häufung an Unfällen mit tödlichem Ausgang zu beobachten (siehe Kapitel 1.2.3). Es gilt schließlich, in der Datenerhebung ebensolche Strecken zu untersuchen, auf denen, z. B. durch Sichtverdeckungen und unbekannte Kurvenverläufe, andere Verkehrsteilnehmer oder wechselnde Licht- und Wetterbedingungen „das reale Leben“ abgebildet und beobachtet werden kann. Die Streckenauswahl basiert daher auch auf Streckenabschnitten des Unfallatlas des Statistischen Bundesamtes (Unfallatlas, 2019). Darin werden Abschnitte markiert, in denen Unfälle mit Beteiligung eines Kraftstofffahrenden stattgefunden haben. Als Start- und Zielpunkte der beiden Realfahrtstrecken dienen jeweils die Niederlassungen der Projektpartner AMFD und WIVW. Die beiden Probandengruppen sind aufgefordert, denselben Streckenverlauf zu befahren, sodass die aufgezeichneten Daten später vergleichbar sind. Für die Detailplanung des Streckenverlaufs ist außerdem zu berücksichtigen, dass Links- und Rechtskurven zu möglichst gleichen Teilen auftreten und dabei eine breite Spanne unterschiedlicher Kurvenradien, Höhenverläufe und Straßenbeläge abgedeckt werden. Daraus ergeben sich die in Bild 3-1 gezeigten Messstrecken mit jeweils etwa 80 km Länge und einer Fahrdauer von etwa 100 Minuten.

### Raum Würzburg

Die in Bild 3-1 (links) dargestellte Strecke führt aus Veitshöchheim startend durch die Ortschaften Rimpar, Gramschatz, Retzstadt, Thüngen und Reuchelheim. Der Abschnitt zwischen Rimpar und Gram-

schatz lässt sich durch eine sehr gute Asphaltqualität und weite – wenngleich teils zuziehende und ansteigende sowie abfallende – Kurven charakterisieren. Der Vorgabe folgend wird die Strecke ab Gramschatz im Uhrzeigersinn weiter befahren. Im Streckenabschnitt zwischen Retzstadt und Thüngen finden sich engere Kurvenradien mit teils schlechten Belagqualitäten. Insgesamt liegt der Landstraßenanteil bei 76 %, während die restlichen 24 % Ortsdurchfahrten sind. Auf der Strecke werden durch einen automatisierten Auswertalgorithmus je Fahrendem ca. 240 Kurvenelemente erfasst. Von  $N = 27$  Probanden wurden letztlich 23 Datensätze erzeugt, bei denen keine Abweichung von der vorgegebenen Route (2x) oder technische Defekte (2x) auftraten.

**Raum Dresden**

Die in Bild 3-1 (rechts) dargestellte Strecke führt ausgehend vom Campus der Technischen Universität Dresden zunächst in Richtung Süden nach Bannewitz. Anschließend führt sie Richtung Westen in das Weißeritztal bis nach Tharandt. Hinter Tharandt

beginnt, weiterhin im Weißeritztal, der erste kurvige Abschnitt der Strecke. Anschließend werden die Maltertalsperre sowie die Orte Oberhäslich, Luchau und Cunnersdorf passiert. Bevor schließlich der zweite kurvige Abschnitt im unter Motorradfahren beliebten Müglitztal beginnt, verläuft die Strecke durch die Orte Hausdorf und Maxen. In Dohna verlässt die Strecke anschließend das Müglitztal und führt in das Stadtzentrum von Dresden über die Autobahn zurück, um eine schnelle Rückkehr zum Ausgangspunkt zu erreichen. Insgesamt betragen der Autobahnanteil sowie der Anteil innerhalb des Dresdner Stadtgebietes 9 % bzw. 11 % der Gesamtstrecke. Die restlichen Ortsdurchfahrten belaufen sich auf ca. 20 % der Strecke, sodass sich der verbleibende Landstraßenanteil auf ca. 60 % der Gesamtstrecke beläuft. Die maximale Steigung der Strecke beträgt ca. 3,5 %, das maximale Gefälle 2,7 %. Auf der Strecke werden durch einen automatisierten Auswertalgorithmus je Fahrendem ca. 140 Kurvenelemente erfasst. Von  $N = 15$  Fahrenden wurden 15 Datensätze erzeugt, wobei ein Datensatz (Fahrender 3) nur zu 70 % vollständig erfasst wurde, da das Mess-Smartphone überhitzte.

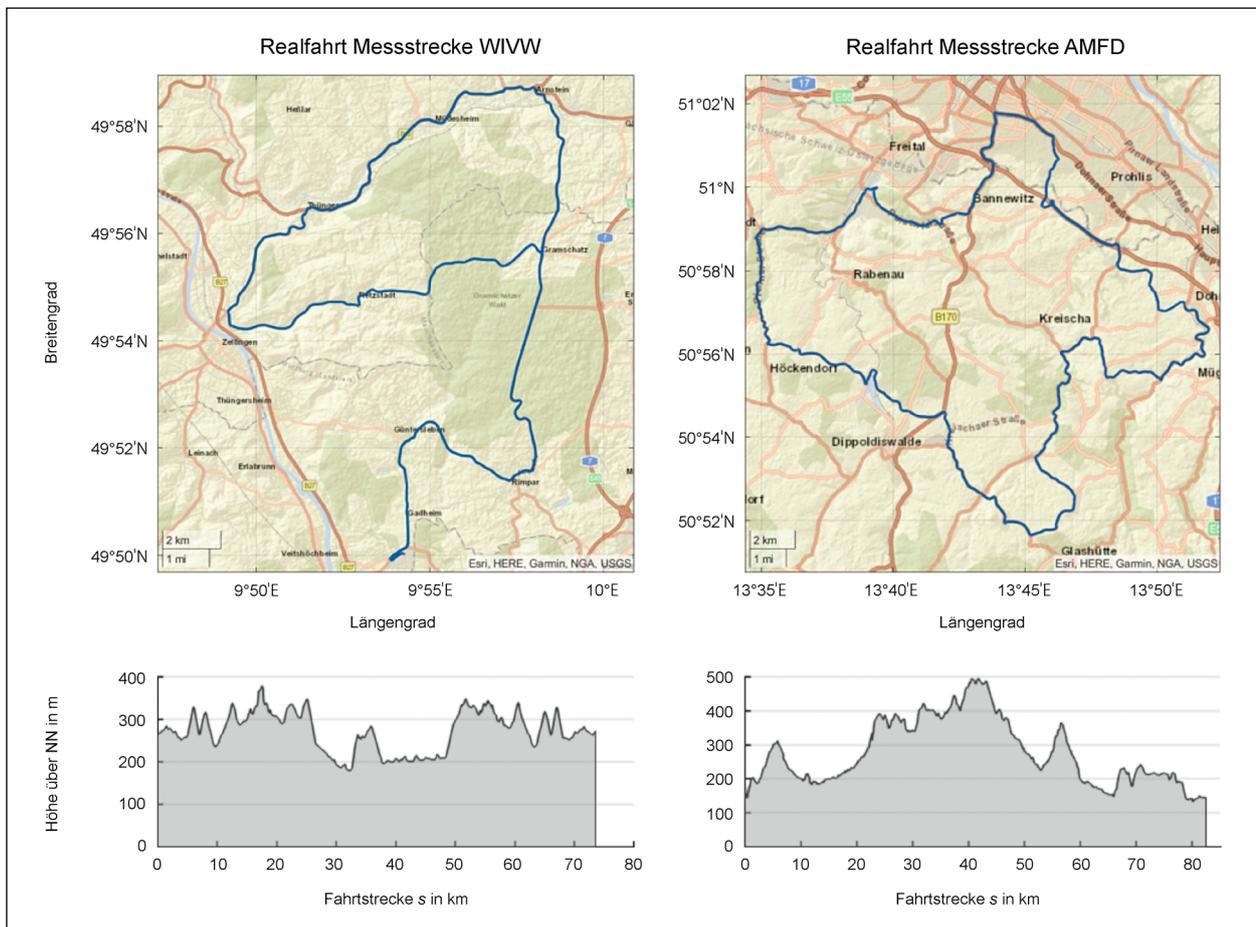


Bild 3-1: Messstrecken und deren Höhenverläufe (Kartenmaterial ©OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

### 3.1.2 Datenauswertemethodik

In vorliegender Untersuchung wurden insgesamt über 13.000 einzelne Kurvensegmente aufgezeichnet, die jeweils zeitliche Verläufe von z. B. GPS und Fahrdynamikdaten besitzen, aus denen wiederum mehrere statistisch auswertbare Kennzahlen abgeleitet werden müssen. Dies bedingt, dass zur Auswertung einzelner Schräglagenereignisse eine automatisierte Datenaufbereitung und Segmentierung durchgeführt werden muss. Die nachfolgend gezeigten Auswertungen basieren auf einzelnen Streckenabschnitten, die aus einer Segmentierung nach der Kurvenkrümmung abgeleitet werden. Eine Schätzung der Kurvenkrümmung kann dabei auf Basis der Fahrdynamikdaten oder auf Basis von GPS Daten erfolgen. Für letzteres wird zunächst die gemessene GPS-Trajektorie in ein UTM Koordinatensystem transformiert. Aus den resultierenden Verläufen von Längen- und Breitengrad (bzw. X- und Y-Koordinate) kann schließlich eine Kurvenkrümmung berechnet werden. Diese ergibt sich gemäß nachfolgender Gleichung zu

$$\kappa(t) = \frac{\dot{x}(t)\ddot{y}(t) - \ddot{x}(t)\dot{y}(t)}{(\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2)^{3/2}} \quad \text{mit } \dot{x}(t) = \frac{\partial x}{\partial t}$$

Für die automatisierte Segmentierung wird der Krümmungsverlauf nach Vorzeichenwechseln durchsucht. Ein Segment zwischen zwei Vorzeichenwechseln wird dann als Kurvenfahrt definiert, wenn der Kurswinkel des Motorrades innerhalb des Segments eine Änderung von mehr als  $10^\circ$  erfährt. In Bild 3-2 rechts ist der Verlauf der Kurvenkrümmung  $\kappa$  abgebildet. Bei jedem Vorzeichenwechsel beginnt ein neues Segment. Die Kartendarstellung

links zeigt den rektifizierten Kartenausschnitt. Farblich zugehörig zur rechten Darstellung sind die einzelnen Segmente hervorgehoben. Es ist zu erkennen, dass zuverlässig zwischen Links- und Rechtskurven getrennt werden kann. Mehrere aufeinanderfolgende Kurven gleicher Richtung (z. B. hellblauer Verlauf) werden jedoch durch das beschriebene Vorgehen nicht voneinander getrennt. Gleichzeitig werden solche Kurvenfolgen häufig auch in einem Schwung befahren, sodass eine Trennung in mehrere Segmente sogar unnötig wäre.

Insgesamt werden durch die krümmungsbasierte Trennung von Streckenabschnitten über 13.000 Kurvensegmente im Raum Würzburg und Dresden erfasst. Zur weiteren Untersuchung werden daraus Untermengen herangezogen, die bspw. Kurswinkeländerungen, mittlere Geschwindigkeiten oder mittlere Kurvenkrümmungen bestimmter Größe aufweisen. Bild 3-3 zeigt die Verteilung der jeweiligen Krümmungmaxima aller erfassten Kurvensegmente. Es ist zu erkennen, dass der Anteil von Links- und Rechtskurven insgesamt annähernd gleich ist. Zudem weisen die im Würzburger Raum erfassten Kurven häufiger kleinere Krümmungen auf als die im Dresdener Raum erfassten Kurven.

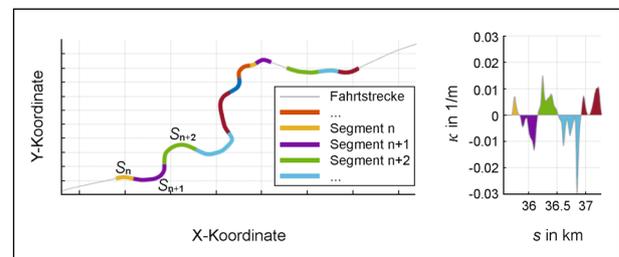


Bild 3-2: Automatisiert erfasste Kurvensegmente

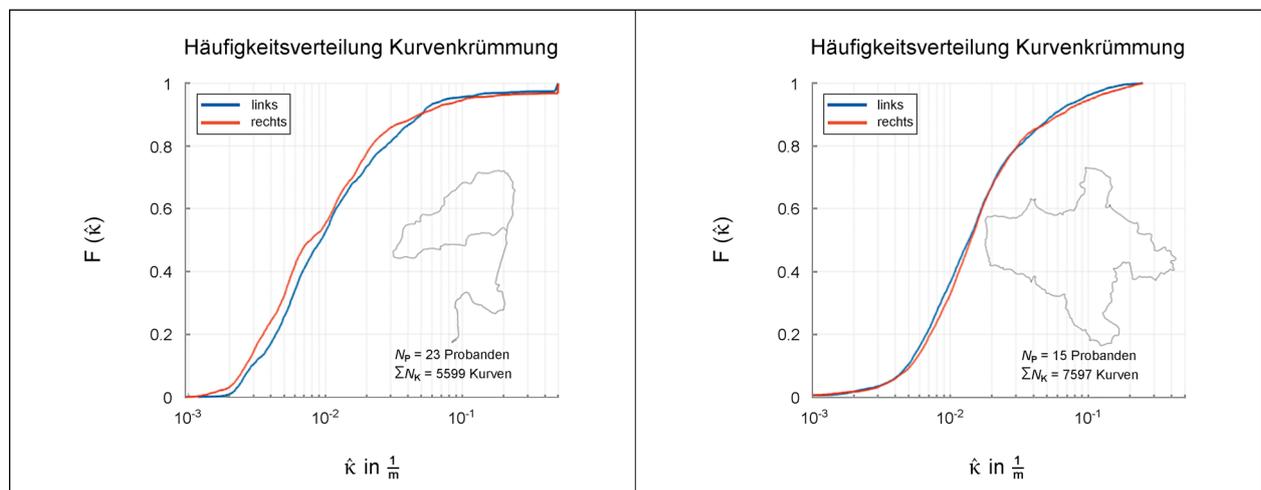


Bild 3-3: Häufigkeitsverteilung der minimalen Kurvenkrümmungen beider Messstrecken, links Würzburg, rechts Dresden

### 3.1.3 Auswahl der Fahrenden

Die Datenerhebung in drei unterschiedlichen Regionen Deutschlands erfordert separate Fahrendengruppen. Ihre Zusammensetzung ist nachfolgend kurz zusammengefasst.

#### Fahrendenauswahl Dresden

Die 15 Fahrenden stammen hauptsächlich aus dem direkten universitären Umfeld des Instituts für Automobiltechnik der Technischen Universität Dresden. Somit stellen die Fahrenden keine repräsentative Auswahl aller Motorradfahrenden in Dresden dar. Diese Einschränkung gilt es somit bei der Interpretation der Versuchsdaten, insbesondere bei der Übertragbarkeit auf eine übergeordnete Population, zu berücksichtigen. Alle an der Studie teilnehmenden Fahrenden besaßen einen gültigen Motorradführerschein.

Die Zusammensetzung des Fahrendenkollektivs hinsichtlich des Geschlechtes, Alters, Motorradbezeichnung, Fahrpraxis und Fahrendentyp zeigt Tabelle 3-1. Darin wird deutlich, dass sich dieses ausschließlich aus männlichen Teilnehmern zusammensetzt. Das Altersspektrum reicht hierbei von 25 bis 58 Jahren. Aufgrund des niedrigen Durchschnittsalters von 35,7 Jahren (Median 32 Jahre) ist zudem festzustellen, dass die durchschnittliche Fahrpraxis mit 8,7 Jahren (Median 6 Jahre) sehr ge-

ring ist. Die längste aktive Fahrpraxis beträgt 20 Jahre. Die durchschnittliche Leistung der Fahrzeuge liegt mit 69 kW (Median 70 kW) deutlich über der Durchschnittsmotorisierung von 52,5 kW (Statistisches Bundesamt, 2019). Von den 15 Fahrenden wird nur ein Fahrender gemäß Fahrendentypenklassifizierung („Defensiv“/„Konstant“/„Sportlich“) als sportlich eingestuft. Die Mehrheit, 7 Fahrende, wird als defensiv charakterisiert, 6 Fahrende als konstant. Lediglich ein Fahrender lässt sich nicht eindeutig einem Fahrendentyp zuordnen und ist demnach „nicht definierbar“. Eine Unterscheidung der Messungen nach diesen Fahrendentypen findet aufgrund der geringen statistischen Relevanz im weiteren Verlauf nicht mehr statt.

#### Fahrendenauswahl Würzburg

Die Rekrutierung der Fahrenden in der Region Würzburg erfolgte über das Testfahrendenpanel der WIVW GmbH, in dem sich über 710 Personen und darunter etwa 270 Motorradfahrende befinden, die regelmäßig an Studien teilnehmen (Stand: 29.08.2019). Vor Aufnahme in das Panel werden die Personen eingehend zu ihrer Fahrfahrung und dem Führerscheinbesitz befragt (Kapitel 2.1.2). Das Panel umfasste 249 Frauen und 461 Männer (Motorradfahrende: w = 38, m = 232). Die Altersverteilung liegt zwischen 18 und > 85 Jahren. Alle an der Studie teilnehmenden Versuchspersonen besaßen ei-

Fahrende	Geschlecht	Alter	Fahrpraxis (Jahre)	Fahrendentyp (nach Kapitel 2.1.2)	Motorrad (Leistung in kW)
01	Männlich	32	9	Sportlich	Triumph Street Triple 675 (78)
02	Männlich	49	3	Defensiv	Yamaha MT-07 (55)
03	Männlich	43	20	Nicht definierbar	Ducati Hypermotard (66)
04	Männlich	31	6	Defensiv	Honda CTX 700 D (36)
05	Männlich	27	1	Defensiv	BMW R1200 GS Adventure (92)
06	Männlich	25	4	Konstant	Suzuki XF650 Freewind (35)
07	Männlich	27	5	Konstant	Kawasaki ZXR 900 (105)
08	Männlich	28	11	Konstant	MZ Baghira Enduro (37)
09	Männlich	58	14	Defensiv	BMW R1200 GS (92)
10	Männlich	33	15	Konstant	BMW F700 GS (70)
11	Männlich	58	4	Defensiv	BMW R1200 RT (88)
12	Männlich	32	4	Konstant	Yamaha MT-07 (55)
13	Männlich	31	15	Defensiv	BMW R1200 GS Adventure (81)
14	Männlich	34	18	Defensiv	Moto Guzzi 1200 Sport (94)
15	Männlich	28	4	Konstant	Yamaha XTZ 750 (51)

Tab. 3-1: Übersicht der Probanden der Dresdner Fahrstudie

nen gültigen Motorradführerschein. Die Auswahl der Testfahrenden geschah anhand einer Online-Vorbefragung. Alle Fahrenden nutzten in der Studie dasselbe Messmotorrad KTM 790 Duke mit einer Leistung von 77 kW, ausführlicher beschrieben in Kapitel 3.3.1.

Vier Probandinnen und 19 Probanden führten die Fahrstudie erfolgreich durch und generierten vollständige Datensätze, welche für diese Untersuchung herangezogen werden konnten. Sie sind zwischen 22 und 66 Jahren alt (Median 35) und besitzen zwischen zwei und 40 Jahren Fahrpraxis (Median 10 Jahre). Während die Fahrendentypklassifizierung in der vorab durchgeführten Befragung („Defensiv“/„Konstant“/„Sportlich“) Anteile von 52/10/12 ergaben, finden sich im finalen Datensatz neben 19 „defensiven“ Fahrenden nur noch ein Fahrender des Typs „Konstant“, zwei Fahrende des Typs „Sportlich“ und ein Fahrender mit gleicher Präferenz zu „Sportlich“ und „Defensiv“. Eine Unterscheidung

der Messungen nach diesen Fahrendentypen findet aufgrund der geringen statistischen Relevanz daher im weiteren Verlauf nicht mehr statt.

## 3.2 Messgelände

Alle Messungen mit Stationärmesstechnik sowie die Fahrendenstudie zur Ermittlung der Schräglagenschwelle nach der Methodik aus Kapitel 2.2 fanden auf dem August-Euler-Flugplatz in Griesheim bei Darmstadt statt.

### 3.2.1 Auswahl der Probanden

Die zehn Teilnehmenden der Fahrstudie auf dem abgesperrten Gelände in der Nähe Darmstadts stammen wie in Dresden hauptsächlich aus dem direkten universitären Umfeld des Fachgebiets Fahrzeugtechnik. Dementsprechend ist auch hier keine

Fahrende	Geschlecht	Alter	Fahrpraxis (Jahre)	Fahrendentyp (nach Kapitel 2.1.2)
5	Männlich	29	2	Sportlich
8	Männlich	35	20	Defensiv
22	Männlich	28	8	Defensiv
24	Männlich	61	30	Defensiv
26	Männlich	24	5	Defensiv
29	Männlich	28	7	Defensiv
30	Männlich	61	40	Sportlich
49	Männlich	55	9	Konstant
50	Weiblich	58	16	Defensiv
60	Männlich	28	6	Defensiv
61	Männlich	41	18	Defensiv
62	Weiblich	22	4	Defensiv
63	Männlich	47	15	Defensiv
70	Männlich	48	30	Defensiv
74	Männlich	61	40	Defensiv
75	Männlich	29	11	Defensiv
79	Männlich	50	28	Defensiv
81	Männlich	58	8	Defensiv
84	Männlich	26	10	Sportlich/Defensiv
88	Männlich	66	20	Defensiv
96	Weiblich	23	5	Defensiv
98	Männlich	26	3	Defensiv
99	Weiblich	29	3	Defensiv

Tab. 3-2: Übersicht der Probanden der Würzburger Fahrstudie

repräsentative Menge aller Motorradfahrenden in der Umgebung durch die Fahrendenmenge dargestellt. Dies ist bei der Interpretation der in Kapitel 4.2 vorgestellten Ergebnisse zu berücksichtigen. Alle Fahrenden besaßen eine gültige Fahrerlaubnis für Motorräder.

In Tabelle 3-3 ist die Zusammensetzung des Fahrendenkollektivs hinsichtlich des Geschlechts, Alters und der Fahrpraxis zu finden. Zudem ist die Fahrendentypenbeurteilung nach Kapitel 2.1.2 aufgeführt. Diese wurde nach der entsprechenden Methodik vor Versuchsdurchführung mündlich ermittelt. Das Kollektiv setzt sich zusammen aus drei weiblichen und sieben männlichen Fahrenden im Alter von 21 bis 29 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 26,5 (Median 27). Die Fahrenden weisen eine Fahrpraxis von zwei bis elf Jahren auf, bei einer durchschnittlichen Haltedauer der Fahrerlaubnis von 6 Jahren (Median 6,5). Nach der Fahrendentypenklassifizierung („Defensiv“/„Konstant“/„Sportlich“) sind vier Teilnehmende als defensiv, drei sportlich, zwei konstant und ein Teilnehmender zwischen defensiv und sportlich einzuordnen. Diese Selbsteinschätzung findet sich zum Teil auch in den Ergebnissen in Kapitel 4.2 wieder, wobei auch hier aufgrund der geringen Stichprobenzahl nicht von einer statistischen Relevanz gesprochen werden kann. Die jährliche Fahrleistung der Fahrenden teilt sich je zu ca. einem Drittel auf die Intervalle 0 – 5.000 km, 5.000 – 10.000 km und 10.000 – 15.000 km auf. Dabei gaben die Fahrenden eine Fahrpraxis von teils mehrmals wöchentlich bis zu 1 bis 4 Mal pro Monat an. Der Großteil der Fahrten findet in der Freizeit und örtlich betrachtet auf Landstraßen sowie im Stadtverkehr statt.

Alle Fahrenden nutzten für die Messfahrten das FZD eigene Messfahrfahrzeug Honda NC 700 X, welches in Kapitel 3.3.1 näher beschrieben wird.

### 3.2.2 Szenarien im Fahrversuch

Es wurden aufgrund vorangegangener Vorversuche und der in Kapitel 2.2 beschriebenen Methodik vier Szenarien für die Fahrendenstudie ausgewählt. Im ersten Szenario wird die Komfortgrenze des jeweiligen Fahrenden ermittelt. Hierfür wird eine 180°-Kurve mit selbstgewählter Geschwindigkeit fünfmal gegen und im Anschluss fünfmal im Uhrzeigersinn durchfahren.

Aufgrund fehlender Bodenmarkierungen auf dem Vorplatz des Flugplatzes wird der Kurvenverlauf mit 20 cm großen Pylonen und Kreidespray markiert. Die Breite der Fahrgasse beträgt 3 m und der Kurvenradius der inneren Begrenzung 9 m. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt hierbei auf dem maximalen Rollwinkel sowie der Kontinuität der Kurvenerleitung der individuellen Fahrenden.

Das zweite Szenario stellt gleichzeitig das erste pseudokritische Manöver nach Kapitel 2.2.1 dar. Während der Fahrende mehrere Runden über das Testgelände fährt, wird unbemerkt der Radius der Kurve auf dem Vorplatz um 3 m auf 6 m verkleinert. Die Breite des Fahrstreifens bleibt konstant. Die Fahrenden, die sich an den großen Radius gewöhnt haben, müssen nun auf den geänderten Verlauf reagieren.

Das dritte Szenario ist eine bis zu diesem Punkt schon mehrfach durchgefahrene Kurve, die wiederum

Fahrende	Geschlecht	Alter	Fahrpraxis (Jahre)	Fahrendentyp (nach Kapitel 2.1.2)
1	Männlich	28	4	Defensiv
2	Männlich	24	6	Sportlich
3	Männlich	21	3	Sportlich
4	Weiblich	29	7	Defensiv
5	Männlich	26	8	Konstant
6	Männlich	28	2	Defensiv/Sportlich
7	Männlich	25	7	Defensiv
8	Männlich	29	11	Sportlich
9	Weiblich	29	4	Defensiv
10	Weiblich	26	8	Konstant

Tab. 3-3: Übersicht der Probanden der Darmstädter Fahrstudie

unbemerkt zu einer sogenannten Hundekurve<sup>1</sup> umgebaut wird. Auch hier hat sich die Testperson mittlerweile an den Kurvenverlauf gewöhnt und wählt ihren Komfortrollwinkel für die Durchfahrt. Die Veränderung im Kurvenverlauf ist derart gewählt, dass ein Erkennen dieser erst nach der Einfahrt in die Kurve möglich ist. Hierdurch wird die Testperson zu einer Reaktion gezwungen. Mögliche zu erwartende Reaktionen sind eine Verringerung der Geschwindigkeit oder ein Vergrößern des Rollwinkels.

Im dritten Szenario wird in einer verdeckten Kurve ein plötzlich auftauchendes Hindernis in Form von Pylonen platziert. Diese zwingen Fahrende erneut zu einer Reaktion. Die Pylonen sind so positioniert, dass bei geeigneter Linienwahl eine Durchfahrt der Kurve ohne Änderungen in Geschwindigkeit oder Rollwinkel weiterhin möglich ist.

Allgemein werden die verschiedenen Szenarien so aneinandergereiht, dass zwischen den einzelnen Ereignissen mehrere Runden freier Fahrt integriert werden. Hierbei führt oder folgt teils ein Begleitmotorrad. Somit wird eine typische Landstraßenfahrt simuliert, um ein möglichst realgetreues Fahrenverhalten zu provozieren.

### 3.2.3 Ablauf des Fahrversuchs

- 0) Zunächst wird die Testperson begrüßt und nach Ausfüllen eines anfänglichen Fragebogens zur Einschätzung des Fahrentypen mit Sensoren zur Messung des Oberkörperverhaltens ausgestattet sowie in die Bedienung und Besonderheiten des Messfahrzeuges eingewiesen.
- 1) Der erste Fahrversuch findet auf dem Vorplatz des Flughafens statt. Hier ist die bereits beschriebene 180°-Kurve mit Pylonen und Kreide markiert, die mehrfach im und gegen den Uhrzeigersinn durchfahren wird.
- 2) Im zweiten Fahrversuch folgen die Fahrenden einem Begleitmotorrad über die Start-Landebahn und den Hubschrauberlandeplatz zurück über den Taxiway zum Vorplatz. Diese Runde wird ab diesem Zeitpunkt immer wieder gleichzeitig durchfahren. Der Begleitmotorradfahrer lässt den Probanden in der zweiten Runde passie-

ren, folgt ihm weiter bis zum Start der dritten Runde. Der Fahrende fährt diese Runde selbstständig, währenddessen wird der Radius der Kurve auf dem Vorplatz um drei Meter verkleinert. Nach der Durchfahrt der Fahrenden dieser ersten pseudokritischen Situation findet eine Befragung zur Subjektivbewertung der Kritikalität durch die Fahrende statt.

- 3) Für den dritten Fahrversuch fährt zunächst die erste Runde der/die Fahrende vor dem Begleitmotorrad, wird in der zweiten Runde von dem Begleitmotorrad überholt und in der dritten Runde wieder vorgelassen, um diese Runde selbstständig zu durchfahren. Zwischen dritter und vierter Runde stellt der Versuchsbegleiter in dem Begleit-Pkw die Kurve am Hubschrauberlandeplatz um, sodass diese nun der Kurve mit veränderlichem Radius entspricht. In der nun vierten Runde setzt sich zunächst der Begleitmotorradfahrer vor den/die Fahrende(n) und lässt diesen in der Mitte der Start-Landebahn überholen, woraufhin der/die Fahrende das zweite pseudokritische Manöver passiert und im Anschluss wieder befragt wird.
- 4) Während des letzten Teils des Versuchs fährt zunächst der/die Fahrende vor, wird in der zweiten Runde überholt und in der dritten wieder vorbeigelassen. Zwischen zweiter und dritter Runde wird durch den Versuchsbegleiter das Hindernis in der verdeckten Kurve aufgestellt, woraufhin der Fahrende das dritte pseudokritische Manöver durchfährt. Abschließend wird auch hierzu eine Befragung durchgeführt und der/die Fahrende nach einem Abschlussfragebogen verabschiedet.

Der gesamte Versuch dauerte durchschnittlich ca. 45 min.

## 3.3 Messwerkzeuge

Im Folgenden werden die für die Aufzeichnung der Messdaten innerhalb dieses Projektes genutzten Messmittel vorgestellt. Hierbei wird unterteilt in die genutzten Messfahrzeuge und die zum Teil auf diesen genutzte oder zusätzlich am Straßenrand aufgestellte Messtechnik. Der besondere Fokus liegt hierbei auf der Untersuchung der Nutzbarkeit des jeweiligen Messkonzeptes zur Aufzeichnung fahrdynamischer Größen des Motorrades, des Fahrenden und der Umgebung (nach Kapitel 2.1). Hierbei

<sup>1</sup> Kurve mit im Verlauf veränderlichem Radius.

wird in die in Bild 2-2 gezeigten drei Ebenen Versuchsgelände, Privatfahrzeug und Stationäre Messung unterschieden.

Für Messungen auf dem Versuchsgelände und im Realverkehr bei gleichzeitig sehr guter Kenntnis über die genutzte Messtechnik stehen die drei Motorräder BMW R1200 GS (AMFD), Honda NC 700 X (FZD) und KTM 790 Duke (WIVW) zur Verfügung. Beschrieben werden die Fahrzeuge in Kapitel 3.3.1. Bei allen Fahrzeugen ist entweder durch zusätzlich verbaute Messtechnik (BMW und Honda) oder durch Zugriffsmöglichkeit auf die serienmäßig verbaute Sensorik (KTM) eine Erfassung der Fahrdynamikzustände des jeweiligen Motorrades möglich. Der Vorteil des Einsatzes verschiedener Motorrädern ist eine parallele Durchführbarkeit von Messungen im Realverkehr oder auf dem Testgelände an den jeweiligen Standorten der Projektpartner. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde ein Kreuzvergleich der verschiedenen Messwerkzeuge durchgeführt. Der Vergleich bestätigte die Vergleichbarkeit der verschiedenen Messfahrzeuge untereinander. Das AMFD-Fahrzeug wurde innerhalb des Projektes hauptsächlich für den Vergleich der entwickelten Smartphone-Applikation nach Kapitel 3.3.2 mit Fahrdynamikdaten der inertialen Messtechnik eingesetzt. Das FZD-Fahrzeug wurde für die in Kapitel 3.2 vorgestellten Untersuchungen auf dem Messgelände sowie zum Vergleich der stationären Messtechnik aus Kapitel 3.3.2 eingesetzt. Das WIVW-Fahrzeug kam für die in Kapitel 3.1 vorgestellten Untersuchungen im Kreis Würzburg zum Einsatz.

Innerhalb des Projektes entwickelte neuartige Messmittel werden in Kapitel 3.3.2 vorgestellt. Hierin ist die Entwicklung einer Smartphone-Applikation durch AMFD zur Nutzung bei Untersuchungen mit dem Privatfahrzeug nach Bild 2-2 aufgeführt. Zum anderen sind die durch FZD untersuchten stationären Messtechnikkonzepte aufgeführt. Zusätzlich wird die für die erwähnten Vergleichsmessungen der neuartigen Konzepte mit Fahrdynamikdaten der Fahrzeuge genutzte Messtechnik ADMA-G in diesem Kapitel vorgestellt.

Abschließend wird in Kapitel 3.3.3 eine Zusammenfassung der Ergebnisse mit besonderem Hinblick auf die Eignung der neuartigen Konzepte zur Messung fahrdynamischer Parameter von Motorrädern gegeben.



Bild 3-4: Messmotorrad Honda NC 700X

### 3.3.1 Messfahrzeuge

#### Honda NC700X

Im FZD steht für Messungen ein Motorrad der Marke Honda, Modell NC 700X (Bild 3-4) mit einer Vielzahl verbauter Sensoren zur Verfügung. Eine Besonderheit stellt das 21 Liter fassende Staufach unter der Tankatruppe dar. Es bietet der gesamten Messelektronik Platz. Ausgestattet ist das Fahrzeug unter anderem mit einer IMU von XSENS® sowie analogen Sensoren zur Messung des Lenkmoments, der Lenkwinkel und Federwege, sowie der Bremsdrücke und Gasgriff- und auch Kupplungshebelstellung.

Die niedrige Sitzposition ermöglicht auch kleineren Fahrenden ein sicheres Führen des Fahrzeuges. Aufgrund der Leistung von 34 kW (48 PS) darf das Motorrad auch mit einem A-2 Führerschein gefahren werden. Die Gesamtmasse des Fahrzeuges beträgt 218 kg. Ausgestattet ist das Motorrad mit einem Combined-Brake-System (CBS) mit ABS. Hierdurch wird beim Betätigen des Fußhebels auch die Vorderbremse mit aktiviert. So kann eine ungünstige Bremskraftverteilung ausgeschlossen werden. Zusammenfassend steht daher für die Untersuchungen nach Kapitel 3.2 ein flexibel einsetzbares und sicheres Fahrzeug für die Fahrversuche zur Verfügung.

#### KTM 790 Duke

Im Rahmen des Projekts setzt das WIVW eine KTM Duke 790 (Bild 3-5) als Messmotorrad ein. Sie verfügt über einen 799 cm<sup>3</sup> 2-Zylinder Reihenmotor mit einer Leistung von 77 kW (103 PS). Das Motorrad ist serienmäßig mit Technik und Assistenzsystemen nach aktuellem Stand der Technik ausgestattet. Dies beinhaltet eine IMU, Kurven-ABS, schräglä-



Bild 3-5: Messmotorrad KTM Duke 790 des WIVW

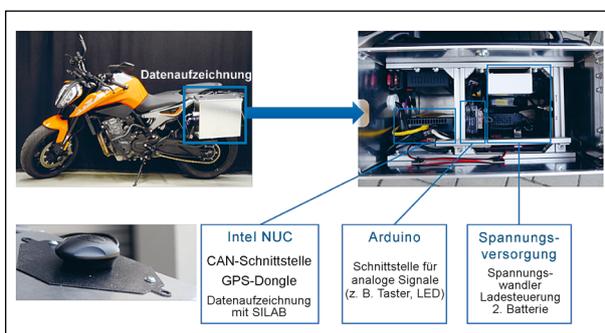


Bild 3-6: Aufbau der Messtechnik am Messmotorrad des WIVW

genabhängige Traktionskontrolle und einen sog. Quickshifter zum kupplungsfreien hoch- und runterschalten.

Aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Sitzhöhe, der aufrechten Sitzposition und des geringen Gewichts von 187 kg eignet sich die 790 Duke für eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrerinnen/Fahrer und ist damit gut für Studienzwecke geeignet. Zudem kann mit geeigneter Messtechnik direkt auf die bordeigene Sensorik zugegriffen werden, sodass zur Erfassung der relevanten Parameter wie z. B. Rollwinkel, Rollrate und Geschwindigkeit keine zusätzliche Sensorik verbaut werden muss. In Bild 3-6 ist der Aufbau der Messtechnik dargestellt.

### BMW R1200GS

Zur Durchführung der Vergleichs- und Validierungsmessungen wird seitens der AMFD das Motorrad R1200 GS Adventure (K51) der Marke BMW verwendet. Es handelt sich hierbei um eine Reiseenduro, die sowohl für längere Fahrten auf asphaltierten Strecken als auch für Fahrten im leichten Gelände konzipiert ist. Hinsichtlich der Eignung als Messmotorrad bietet dieses den Vorteil, Motorradkoffer sowohl seitlich als auch hinten über dem

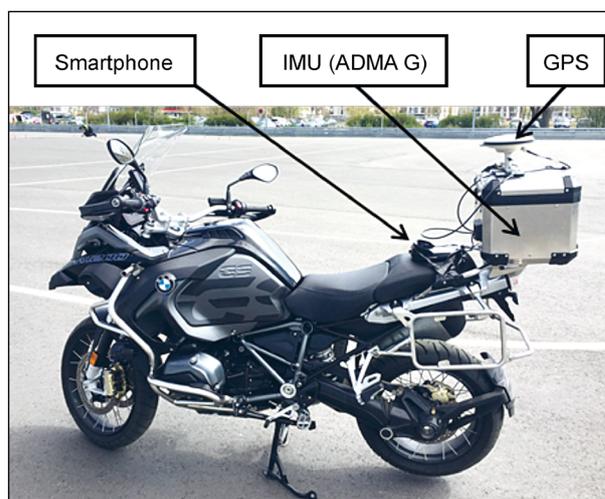


Bild 3-7: Messaufbau BMW R1200 GS für Vergleichs-/Validierungsmessungen

Heck zu montieren, sodass sich darin unkompliziert die benötigte Messtechnik verbauen lässt. Bild 3-7 zeigt das Motorrad auf der Versuchsstrecke mit den zu vergleichenden Messsystemen (Messsmartphone und ADMA).

Die IMU wird für die Versuchszwecke im Heckkoffer verschraubt und zur Stromversorgung an das Bordnetz angeschlossen. Darüber hinaus wird die GPS-Antenne auf dem Deckel des Koffers befestigt. Zur mobilen Aufzeichnung der IMU-Messdaten wird ein Laptop verwendet, der im Rucksack des Fahrenen mitgeführt wird. Für die Validierungsfahrt auf dem August-Euler-Flugplatz in Griesheim und auf der Dresdner Versuchsstrecke wird das Smartphone als Messmittel mittels Gewebeklebeband und einer geeigneten Hülle auf dem Soziusitz befestigt. Es sei darauf hingewiesen, dass beide Messsysteme aufbaudefest am Fahrzeug zu installieren sind. Mögliche Winkelabweichungen zwischen Smartphone- und Motorradkoordinatensystem werden bei der Auswertung der Daten unter Zuhilfenahme einer Koordinatentransformation korrigiert.

### 3.3.2 Messtechnik

Im Rahmen der mobilen Messtechnik wird in der Dresdner Fahrstudie auf handelsübliche Smartphones zur Rohdatenerfassung gesetzt, da diese kostengünstig für ein großes Fahrenndenkollektiv eingesetzt werden können. Die Auswertung der mittels Smartphone aufgenommenen Rohdaten erfolgt in einer stationären MATLAB-Umgebung. Die Plausibilisierung der mittels Smartphone und stationären

rer MATLAB-Umgebung berechneten Kennwerte (bspw. Rollwinkelmaxima) erfolgt mittels des nachfolgend vorgestellten Kreiselmesssystems (IMU) des Typs „ADMA G“.

Als Ergänzung zur bereits beschriebenen mobilen Messtechnik wird im Zuge des Projektes durch FZD der Einsatz von Stationäresmesstechnik zur Messung von Kurvenparametern untersucht. Hierunter wird eine ortsfest in der Umgebung verbaute Messtechnik verstanden, die eine Messung von außerhalb des Fahrzeugs oder Fahrenden ermöglicht. In diesem Kapitel werden die verwendeten Sensoren sowie die Umsetzung der Messtechnikkonzepte mit Radar-, Lidar- und verschiedenen Kamerasystemen vorgestellt.

### ADMA

Für die Vergleichsmessungen in Dresden und Darmstadt wird das Kreiselmesssystem ADMA G (Automotive Dynamic Motion Analyzer) der Firma GeneSys verwendet. Es handelt sich hierbei um ein hochpräzises Messsystem, das speziell für Fahrdynamikmessungen im Automobilbereich entwickelt wurde, um während der Fahrt Beschleunigung, Geschwindigkeit, Position und Drehraten in allen drei Raumrichtungen zu bestimmen. Die Rohmessdaten der Messplattform werden durch die Kombination faseroptischer Drehratensensoren, Servo-Beschleunigungssensoren und GPS Modul erzeugt. Ein Fusionierungsalgorithmus (EKF) berechnet aus den Rohdaten Geschwindigkeit, Ort und Lage im Raum und kompensiert Messungenauigkeiten der einzelnen Sensoren. Darüber hinaus kann das Driftverhalten durch den Einsatz eines GPS-Empfängers kompensiert werden, sodass ein hochpräzises Messsignal entsteht. Die erzielte dynamische Genauigkeit liegt für Winkelmessungen bei  $0,1^\circ/\text{h}$ , für Geschwindigkeiten bei  $0,03 \text{ km/h}$  und für Beschleunigungssensoren bei  $10 \mu\text{g}$ . Die Baugröße der ADMA ist dabei sehr kompakt ( $110 \text{ mm} \times 170 \text{ mm} \times 197 \text{ mm}$ ), sodass dieser gut am Motorrad für die Vergleichsmessungen angebracht werden kann (GeneSys Elektronik GmbH, 2019).

Darüber hinaus wurde das System bereits im Rahmen anderer Untersuchungen zur Fahrdynamik- und Rollwinkelmessung bei Motorrädern eingesetzt, sodass dieses auch für die Validierung des Smartphones und der stationären Messtechnik als geeignet erscheint. Beispielsweise sind hier SCHLIPSING et al. (SCHLIPSING, SALMEN, LATTKE, SCHRÖTER & WINNER, 2012) zu nen-

nen, die das Messsystem für Referenzmessungen einer Low-CostIMU sowie zur Rollwinkelberechnung aus Kameradaten verwenden. Daher wird die ADMA auch bei Referenzmessungen mit stationärer Messtechnik durch FZD eingesetzt.

### Smartphone

Eine Möglichkeit zur Untersuchung eines großen Probandenpools mittels mobiler Messtechnik bietet die Nutzung eines Messsmartphones. Heutige Smartphones, wie das in dieser Studie gewählte Mittelklasse-Smartphone LG G7fit, sind dazu mit einer Vielzahl an Sensoren ausgestattet. Zu den Sensoren gehören neben GPS-Sensoren zur Lokalisierung auch eine IMU mit einem jeweils dreiachsigen Beschleunigungssensor, einem dreiachsigen Gyroskop und einem Magnetometer, sodass sich die Orientierung des Smartphones im Raum erfassen lässt. Darüber hinaus finden sich in den meisten Smartphones Sensoren zur Messung von Lichtintensität, Umgebungs- und Hardwaretemperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und Annäherung auf der Frontseite des Smartphones. Die Rohdaten der Sensoren können mittels im Smartphone integrierter Algorithmen oder entwickelter Programme, sogenannten Applications (Apps), ausgelesen und verarbeitet werden. Insbesondere für den Bereich des Android™<sup>2</sup>-Betriebssystems stehen kostenfreie Entwicklungsumgebungen zur Verfügung, sodass eine App zum Auslesen von Sensordaten mit wenig Aufwand entwickelt werden kann.

Daher wird bei der mobilen Messtechnik auf eine Smartphone-App mit anschließendem externen Postprocessing gesetzt. Dies bedeutet, dass die eigens entwickelte Android-Smartphone-App namens „MotoLogger“ für die verlustfreie Aufzeichnung von Rohdaten optimiert wird und das anschließende Interpretieren/Postprocessing der Rohdaten in eine stationäre MATLAB-Umgebung ausgelagert wird.

Für ein erfolgreiches Postprocessing ist notwendig, die aufgezeichneten Rohdaten des Smartphones so aufzubereiten, dass fehlerhafte Werte eliminiert werden. Zunächst erfolgt daher, gemäß Tabelle 3-4, eine Datenfilterung mittels verschiedener Frequenzfilter, deren Grenzfrequenzen empirisch bestimmt werden. Anschließend ist eine Koordinatentransfor-

<sup>2</sup> Android ist eine Marke von Google LLC.

1 Datenfilterung			
Umsetzung	Tiefpassfilter mit Butterworth-Charakteristik	Grund	Externe Schwingungsanteile in Messrohdaten, wie Fahrzeug- und Fahrbahnanregungen.
2 Koordinatentransformation in das Motorradkoordinatensystem			
Umsetzung	1) Ermittlung des Roll- und Nickwinkels aus wirkender Erdbeschleunigung. 2) Ermittlung des Gierwinkels zwischen Fahrzeug und Smartphone aus der Längsbeschleunigung des Motorrads bei Geradeausfahrt. 3) Transformation mittels Transformationsmatrix in das Motorradkoordinatensystem.	Grund	Die Koordinatensysteme von Motorrad und Smartphone können bei jedem Versuch zueinander verdreht sein. Eine Transformation zwischen den Koordinatensystemen ermöglicht eine reproduzierbare Messdatenerhebung.
		Hinweis	Keine einheitliche Messsmartphone-Halterung aufgrund Modellvielfalt des Fahrzeugkollektivs.
3 Berechnung Kurswinkeländerung			
Umsetzung	Berechnung anhand aufgezeichneter GPS-Positionen, die zuvor in ein kartesisches System transformiert werden.	Grund	Die durch das Smartphone intern ermittelte Kurswinkeländerung ist nicht ausfallsicher und zu ungenau (1 Hz Abtastrate).
		Hinweis	Berechneter Kurswinkel stellt den kleinsten Winkel zwischen Fahrtrichtung und Nordrichtung dar.
4 Ermittlung Kurvensegmente			
Umsetzung	Mit Projektpartnern einheitlich abgestimmtes Vorgehen (siehe Kapitel 3.1.2).		
5 Berechnung Krümmung/inverser Kurvenradius			
Umsetzung	Unplausible Werte der Krümmung ( $< 0,25 \text{ 1/m}$ ) werden auf 0 gesetzt.	Grund	Geringe GPS-Abtastrate (1 Hz) bedingt Fehlerkorrektur.
		Hinweis	Einfluss der fehlerbehafteten GPS-Geschwindigkeit wird in Berechnung minimiert. Kurven mit Radius kleiner als 4 m liegen nicht im Fokus der Studie.
6 Berechnung Rollwinkel			
Umsetzung	Fusion der gemessenen Rollrate mittels eines linearen Kalman-Filters in Abhängigkeit von Geradeaus- und Kurvenfahrt mit: a) $\varphi < \varphi_{\text{grenz}}$ : Berechnetem Rollwinkel aus Längsgeschwindigkeit und Gierrate. b) $\varphi > \varphi_{\text{grenz}}$ : Berechnetem Rollwinkel aus Quer- und Vertikalbeschleunigung.	Grund	Berechnung sollte mittels Messdaten der Inertialsensorik aufgrund der Ungenauigkeit der GPS-Position bzw. GPS-Geschwindigkeit (z. B. 1 Hz Abtastrate) erfolgen.
		Hinweis	Grenzrollwinkel von $\varphi_{\text{grenz}} = 10^\circ$ aufgrund nicht kalibrierter Beschleunigungssensoren ( $\rightarrow$ Abweichungen um Nulllage) eingeführt.

Tab. 3-4: Einzelschritte des Smartphone-Postprocessings

mation durchzuführen, da die Koordinatensysteme von Smartphone und Motorrad nicht übereinstimmen. Weiterhin sind Algorithmen zu implementieren, mit denen aus den Rohdaten die Kurswinkeländerung, die Krümmungen (inversen Kurvenradien) und der Rollwinkel berechnet werden. Anschließend können diese Werte nach einer kurvenweisen Segmentierung betrachtet werden.

Der in Bild 3-8 dargestellte Rollwinkelverlauf zeigt einen Ergebnisdatensatz der Kreuzvalidierung, der sich durch die Kombination dynamischer und stationärer Anteile auszeichnet. Hieraus ist ersichtlich, dass der Algorithmus für stationäre und instationäre Zustände eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten der IMU (ADMA G) zeigt.

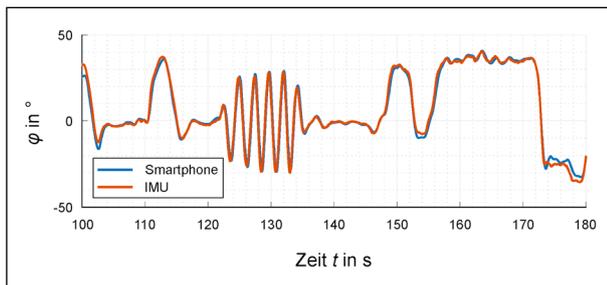


Bild 3-8: Ausschnitt Ergebnisdatensatz berechneter Smartphone-Rollwinkel (aus Kreuzvalidierung)

Die Validierung des Messsmartphones LG G7fit und des Postprocessings auf der Dresdner Versuchsstrecke lieferte bei der Fehlerrechnung des Rollwinkels einen Root Mean Square Error (RMS) von  $2,3^\circ$ . Die Fehlerwerte der Gier- und Rollrate liegen bei  $0,94^\circ/\text{s}$  und  $1,73^\circ/\text{s}$  und die der Längs- und Querbewegung bei  $0,07 \text{ m/s}^2$  und  $0,28 \text{ m/s}^2$ . Größere Abweichungen lassen sich lediglich bei der Untersuchung der GPS-Position mit  $5,8 \text{ m}$  feststellen, die auf die niedrige Aufzeichnungsfrequenz von  $1 \text{ Hz}$  und die Streuung des GPS-Signals zurückzuführen sind. Des Weiteren lässt sich feststellen, dass die Genauigkeit der GPS-Daten maßgeblich von der Umgebung abhängig ist und die Abweichung durch Baumbestand entlang der Strecke oder durch Fahrten in Tälern negativ beeinflusst wird. Insgesamt liegen die Ergebnisse der Validierung jedoch in einem für grundlegende Fahrdynamikuntersuchungen akzeptablen Bereich.

## Radar

Beim verwendeten Radarsensor handelt es sich um das Modell ARS-408-21 von der Continental Engineering Service GmbH. Der Sensor kombiniert Nah- und Fernradar. Bis zu einer Entfernung von  $20 \text{ m}$  können so Objekte in einem Öffnungswinkel von bis zu  $\pm 60^\circ$  detektiert werden. Bis zu einer Entfernung von  $60 \text{ m}$  in einem Öffnungswinkel von  $\pm 45^\circ$ . Der Sensor bietet weiterhin eine Azimutwinkelauflösung von  $4,5^\circ$  im Nahbereich bis  $60 \text{ m}$  bei einer Auflösung von  $0,1^\circ$ . Die Geschwindigkeitsauflösung beträgt  $0,1 \text{ m/s}$  bei einer Genauigkeit von  $0,03 \text{ m/s}$ . Aufgrund des weiten Temperatureinsatzbereichs von  $-40^\circ \text{ C}$  bis  $85^\circ \text{ C}$  ist er für Messungen vom Straßenrand aus gut geeignet. Detaillierte Informationen sind dem entsprechenden Datenblatt (Continental 2019) zu entnehmen. Die Kommunikation mit dem Sensor erfolgt über CAN. Zur Umsetzung der Messungen wurde der Sensor in das Robot Operating System ROS46 eingebunden. Zu die-

sem Zweck wurde eine bereits vorhandene Bibliothek verwendet, die mit frei verfügbarem Quellcode auf GitHub verfügbar ist. Diese erlaubt die Dekodierung und Visualisierung der vom Sensor gesendeten CAN-Nachrichten.

Zur Identifizierung des am besten geeigneten Messaufbaus wurden verschiedene Abstände und Anordnungen der Sensoren untersucht. Aufgrund des eingeschränkten Öffnungswinkels ist eine Aufstellung der Sensorik kurvenaußen vorzuziehen. Um die Vorteile der Ausnutzbarkeit des Dopplereffekts bei Radarsensoren zur Bestimmung der longitudinalen Differenzgeschwindigkeit nutzen zu können, wurden bei den Messungen zwei Radarsensoren eingesetzt. Auf die in der Sensorik enthaltene Möglichkeit zur Objektverfolgung wurde aufgrund der unzureichenden Performanz verzichtet, da diese nicht für einen stationären Einsatz ausgelegt ist. Somit werden die Sensoren im Clustermodus betrieben.

Wichtig bei der Betrachtung des Radarprinzips ist, dass hiermit keine direkte Messung des Rollwinkels möglich ist und dieser daher aus den ermittelbaren Werten der Trajektorie des Fahrzeuges geschätzt werden muss.

Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Zuordnung der Messwerte zu entsprechenden Messpunkten am Fahrzeug sowie der nur indirekten Messbarkeit des Rollwinkels wurde innerhalb des Projektes der Weg mit Radarsystemen nicht weiterverfolgt.

## Lidar

Beim genutzten Lidarsensor (light-detection-and-ranging-sensor) handelt es sich um einen Ultra Puck VLP 32C der Firma Velodyne. Der Sensor hat einen horizontalen Öffnungswinkel von  $360^\circ$  und einen vertikalen Öffnungswinkel von  $40^\circ$ . Dabei laufen 32 Kanäle mit einer Umlauffrequenz von  $5$  bis  $20 \text{ Hz}$  um. Die Kanäle sind dabei nicht gleichmäßig über den vertikalen Öffnungswinkel verteilt, sondern sind um die Nulllage dichter ausgeführt. Dies führt dazu, dass bei einem Abstand von etwa  $10 \text{ m}$  zur Fahrbahn und einer Positionierung des Sensors in  $1 \text{ m}$  Höhe ein typisches Motorrad von  $10 - 12$  Kanälen erfasst wird. Die horizontale Auflösung wird mit  $0,1^\circ$  bis  $0,4^\circ$  angegeben, abhängig von der Umlauffrequenz. Da die Kanäle über die Vertikale nicht gleichmäßig aufgetragen sind, wird die vertikale Auflösung als nicht konstant, aber mit mindestens  $0,3^\circ$  angegeben.



Bild 3-9: Beispielhafte Darstellung einer Rohdaten Lidar Aufnahme eines vorbeifahrenden Motorrades (roter Kreis)

Die Kommunikation mit dem Sensor erfolgt über Ethernet. Um die Rohdaten zu sichern, wird die gesamte Netzwerkkommunikation mit dem Sensor mitgeschnitten und als Datei gesichert. Anschließend wird die Netzwerkkommunikation mithilfe des entsprechenden ROS Pakets eingelesen und im Anschluss analysiert.

In Bild 3-9 ist beispielhaft die Ausgabe der Rohdaten des Sensors dargestellt. Rot eingekreist ist dabei das vorbeifahrende Motorrad. Der Sensor steht im Mittelpunkt der erkennbaren Kreislinien. Hier ist sichtbar, dass ohne eine weitere Verarbeitung der Daten keine Aussage über die Kurvenparameter des vorbeifahrenden Motorrades getroffen werden kann. Über eine erste Filterung wird aus dem Rohdatenbild der Hintergrund entfernt. Realisiert wurde dies über eine Schwellwertbetrachtung. Im Anschluss werden einzelne Ausreißer durch eine Abfrage der Existenz einer Mindestanzahl an Nachbarpunkten eliminiert. Das Ergebnis ist eine Punktwolke des Motorrades inklusive Fahrendem.

Die gesamte Filterung ist sehr rechenaufwändig und die allgemeine Datenmenge beim Einsatz des Lidarsensors sehr groß. Zudem handelt es sich bei dem hier verwendeten Sensor um ein sehr hochwertiges und damit teures Produkt, was den Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr ohne Beaufsichtigung kritisch gestaltet. Eine Positionierung im virtuellen Mittelpunkt mit Abstand des Kurvenradius der Kurve ist im realen Verkehr zudem auch nicht immer möglich. Aus den genannten Gründen wurde innerhalb des Projektes außer dem Nachweis der prinzipiellen Eignung des Lidar-Prinzips zur Messung vorbeifahrender Motorräder auch nicht weiter verfolgt.

## Monokamera

Es wurden mehrere Kameras des Typs „GoPro Hero 3 Black“ Edition der Firma GoPro Inc. verwendet. Dabei handelt es sich um eine handliche Kamera, deren Haupteinsatzgebiet gewöhnlich die Aufnahme sportlicher Freizeitbeschäftigungen im Freien ist. Hierbei soll meist ein großer Bildbereich aufgezeichnet werden, weshalb die Kameraaufnahmen eine große radiale, tonnenförmige Fischaugen-Verzeichnung aufweisen. Diese Verzerrung kann aufgrund ihrer Ausprägung bei der Auswertung der Bilder nicht unberücksichtigt bleiben, weshalb eine Kamerakalibrierung durchgeführt werden musste. Hierdurch können die Aufnahmen auf ein für die weitere Auswertung sinnvolles, nicht verzerrtes Format zurück gerechnet werden.

Für die Auswahl eines geeigneten Aufnahmemodus ist ein Kompromiss zwischen Bildrate, Auflösung und Bildwinkel zu finden. Aufgrund der Verwendung der Kennzeichenumrandung des Motorrades für die weitere Auswertung ist eine gute Erkennbarkeit desselben in den Bilddaten notwendig. Die hauptsächliche Bewegungsrichtung des Motorrades in Richtung der optischen Achse macht einen großen Bildwinkel während der Aufnahme unnötig. Umso wichtiger ist, das Kennzeichen auf einer größtmöglichen Bildfläche darzustellen. Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird über einen Algorithmus direkt nach Verwendung der Kennzeichenaufnahme ein Entfernen des Bildinhaltes innerhalb der Umrandung angestrebt. Hierfür steht bei der BAST bereits ein entsprechendes Software-Tool zur Verfügung. Lediglich die geometrischen Werte der Umrandung werden gespeichert, womit eine Rückverfolgbarkeit des aufgezeichneten Fahrenden unmöglich wird. Eine Berechnung der Lage im Raum in Relation zum Kamerakoordinatensystem wird mittels des Trapezes durch die Eckpunkte des erkannten Kennzeichens durchgeführt. Hierfür ist die Kenntnis des in Deutschland genormten Größenverhältnisses einer Kennzeichentafel nötig.

Weiterhin ist eine hohe Auflösung bei gleichzeitig hoher Bildrate anzustreben. Daher wurde die Auflösung von 1920 x 1080 Pixeln bei einer Bildrate von 50 Bildern pro Sekunde gewählt. Die für Vergleichsmessungen genutzte inertielle Messtechnik zeichnet Daten mit einer Rate von 100 Hz auf. Als ganzzahliges Vielfaches der Bildrate wurde das Angleichen der Datenraten bei der Auswertung somit vereinfacht. Die Daten werden als MPEG4-Videos lokal auf einer Speicherkarte aufgezeichnet. Die Ka-

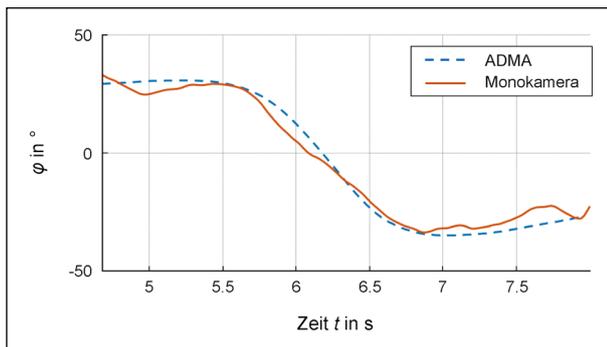


Bild 3-10: Ausschnitt Vergleichsmessungen ADMA/Monokamera, Rollwinkelverlauf

meras können über eine USB-Schnittstelle extern mit Strom versorgt werden, was einen Einsatz über mehrere Stunden im Realverkehr ermöglicht.

Eine drahtlose Verbindung zur Kamera kann über WLAN aufgebaut werden. Hierüber wird die Kameraaufnahme gestartet und eine synchrone Auslösung mehrerer Kameras gleichzeitig realisiert.

In Bild 3-10 ist beispielhaft ein Vergleich der Ergebnisse aus Messungen mit ADMA und Monokamera während der Durchfahrt durch eine Rechts-Links-Kurvenkombination dargestellt. In den durchgeführten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass besonders bei Aufnahmen mit Bewegungsrichtung des Motorrads in Richtung der optischen Achse der Kamera gute Übereinstimmung der Rollwinkelwerte von ADMA und Kamera erreicht werden. Der RMS-Error von  $5^\circ$  für die Rollwinkelermittlung über alle Messungen ist in einem tolerierbaren Bereich. Eine Nutzung mehrerer über den Kurvenverlauf verteilter Kameras ist zur Reduktion des Fehlers empfehlenswert.

### Stereokamera

Bei der verwendeten Stereokamera handelt es sich um das Modell ZED des Herstellers Stereolabs Inc. Die Basisbreite der Kamera beträgt 12 cm, und laut Herstellerangaben eignet sie sich zum Messen von Entfernungen im Bereich von 0,3 bis 25 m.

Die Stereokamera wurde derart positioniert, dass sie das Motorrad möglichst senkrecht zur Bewegungsrichtung in der Vorbeifahrt aufnimmt. Die optische Achse der Kamera steht dabei kurzzeitig orthogonal zur Bewegungsrichtung des Motorrads, sodass sich das Abbild des Motorrads auf der Kameraaufnahme mit der Geschwindigkeit des Motorrads verändert. Um dieser Bewegung gerecht zu

werden und um möglichst den kompletten Kurvenverlauf abbilden zu können, muss der größtmögliche Bildwinkel bei der höchstmöglichen Bildrate gewählt werden. Dabei darf die Auflösung jedoch nicht zu gering werden. Es wurde die Auflösung von  $1280 \times 720$  Pixeln pro Bild (links und rechts) mit einer Bildrate von 60 Bildern pro Sekunde gewählt. Dadurch ergibt sich für den horizontalen Bildwinkel ein Wert von  $85^\circ$ .

Die verwendete Stereokamera wurde zur Ermittlung der Trajektorie eines vorbeifahrenden Motorrads eingesetzt. Hierfür wurden in den Aufnahmen jeweils das Vorder- und Hinterrad sowie zusätzlich eine manuell markierte Stelle am Fahrzeug in den Bilddaten verfolgt. Die Qualität der erhaltenen Daten hängt sehr stark von der Performanz des genutzten Algorithmus und dieser wiederum von hohen Kontrastunterschieden im Bildmaterial ab. Besonders die Verfolgung der Reifenaufstandspunkte ist aufgrund des geringen Kontrastunterschiedes der Grauwerte zwischen Reifen und Fahrbahn schwierig. Der RMS aller Messungen mit Stereokamera lag für die Ermittlung der Fahrzeugspur bei 0,5 m und für die Geschwindigkeit bei 2 m/s.

### 3.3.3 Zusammenfassung Messwerkzeuge

Abschließend lässt sich festhalten, dass handelsübliche Mittelklasse-Smartphones in Kombination mit der vorgestellten stationären Postprocessing-Umgebung geeignet sind, in einem akzeptablen Fehlerbereich größere Fahrendenkollektive hinsichtlich der gefahrenen Schräglagen zu untersuchen. Die im Rahmen des Projektes entwickelte Smartphone-App „MotoLogger“ ist einfach und intuitiv zu bedienen, da durch die automatisierte Koordinatentransformation keine besonderen Bedingungen an die Smartphonemontage gestellt werden. Einzig einer Überhitzung durch fehlenden Sonnenschutz und Wärmeabfuhr muss vorgebeugt werden, wobei bei Fahrten über 4 Stunden eine externe Stromversorgung zu empfehlen ist. Durch die fortwährende Speicherung der relativ kompakten Messdaten (Megabyte-Bereich) während der Aufzeichnung wird einem Datenverlust vorgebeugt. Die in MATLAB entwickelte Postprocessing-Umgebung ermöglicht zudem eine jederzeit einfach wiederholbare und anpassbare Auswertung der Rohdaten auf Knopfdruck. Letzteres führt allerdings dazu, dass die Fahrenden während der Fahrt keine Rückmeldung über ihre aktuell gefahrenen Schräglagen erhalten.

Im Bereich der stationären Messtechnik wurde eine besondere Eignung des Monokamera-Konzepts innerhalb des Projektes nachgewiesen. Der Vorteil aus den geringen Anschaffungskosten kombiniert mit einer Vielzahl von Messmöglichkeiten durch aktuelle Bilderkennungssoftware überwiegt die Nachteile der nicht direkten Messbarkeit fahrdynamischer Größen. Kameras können zudem unauffällig am Straßenrand platziert werden, was innerhalb der Vergleichsfahrten mit Versuchspersonen als wichtiges Kriterium erarbeitet wurde. Je auffälliger ein am Straßenrand positioniertes Messsystem ist, desto unwahrscheinlicher ist eine unverfälschte Messbarkeit vorbeifahrender Fahrzeuge. Für weitere Untersuchungen mit Monokamerasystemen ist die Nutzung von Kameratypen ohne Verzerrung aufgrund der Linsenform (kein fish-eye-Effekt) empfehlenswert. Die Erkennung der Nummernschildumrandung vorbeifahrender Fahrzeuge und anschließende Entfernung des Inhaltes sichert eine Datenschutz-konforme Umsetzbarkeit und bietet eine ausreichende Untersuchbarkeit der gefahrenen Schräglage. Zur Verringerung des Messfehlers ist eine Nutzung mehrerer Kameras empfehlenswert. Eine zusätzliche Nutzung des Stereokamera-Effektes für die Erkennung von Fahrzeugspur und Geschwindigkeit ist empfehlenswert, jedoch wird hierbei auf die Nutzung einer alternativen zu der im Projekt verwendeten Hardware mit verbesserter Bildqualität verwiesen. Zudem ist eine weitere Arbeit an der automatisierten Erkennung und Verfolgung typischer Punkte am Fahrzeug zu empfehlen. Eine alleinige Nutzung von Radar-Sensorik zur Messung vorbeifahrender Fahrzeuge wird nicht empfohlen, da bis auf den Vorteil der Nutzbarkeit des Doppler-Effektes keine weiteren Vorteile innerhalb des Projektes erarbeitet werden konnten. Besonders die automatisierte Verfolgung desselben Punktes am Fahrzeug während der Kurvenfahrt stellt eine Herausforderung dar und war mit der innerhalb des Projektes genutzten Sensorik nicht möglich. Somit ist auch keine Einschätzung der Verlässlichkeit der ermittelten Messwerte möglich. Das Konzept der Nutzung von Lidar-Sensorik wird aus technischer Sicht positiv, jedoch aus Kosten-Nutzen-Sicht sowie aufgrund der großen Datenmengen und der Einschränkungen bei der Positionierung der Sensorik als negativ bewertet. Auch wenn gute Ergebnisse bei der Erkennung fahrdynamischer Größen vorbeifahrender Motorräder im Versuch ermittelt werden konnten, erscheint ein Einsatz im realen Straßenverkehr über einen längeren Zeitraum als nicht sinnvoll.

Auch wenn eine prinzipielle Eignung stationärer Messtechnik zur Erfassung von Motorrädern innerhalb des Projektes nachgewiesen wurde, erfolgte keine Messung im realen Straßenverkehr. Für die Fahrendenstudie auf dem Testgelände wurde aufgrund der exakteren Datenqualität die interne Sensorik des Messfahrzeuges genutzt.

## 4 Ergebnisse

Die im folgenden Kapitel beschriebenen Ergebnisse beziehen sich auf die Untersuchung der in Kapitel 1.3.1 aufgestellte Hypothese über die Existenz einer Schräglagenschwelle bei Motorradfahrenden und die daraus abgeleiteten Forschungsfragen nach der Situationsabhängigkeit dieser sowie der allgemein in Normalsituationen gefahrenen Schräglagen im Alltag.

Mit den im realen, alltäglichen Leben gefahrenen Schräglagen setzt sich das nachfolgende Kapitel 4.1 auseinander, wobei in Kapitel 4.1.1 explizit auf mögliche Korrelationen zwischen dem Alter des Fahrenden, der persönlichen Angsteinschätzung und den tatsächlich gefahrenen Schräglagen eingegangen wird. In Kapitel 4.2 wird auf die Ergebnisse der Untersuchung einer möglichen Existenz einer situationsabhängigen Schräglagenschwelle eingegangen. Zunächst wird hierfür in Kapitel 4.2.1 der jeweilige Komfortbereich des Fahrenden ermittelt. Kapitel 4.2.2 beschreibt die Umsetzung der in Kapitel 2.2.1 entwickelten Methodik zur Untersuchung pseudokritischer Manöver und das letzte Kapitel 4.2.3 behandelt die Untersuchung der genannten situationsabhängigen Schräglagenschwelle.

### 4.1 Realfahrstudie

Gemäß der Erläuterungen aus Kapitel 3.1.2 wurden alle in den Realfahrtstudien erfassten Daten aus dem Dresdener und Würzburger Raum einer Segmentierung auf Basis der Kurvenkrümmung zugeführt. Für die über 13.000 erfassten Segmente wird ein Satz an Kennwerten bestimmt, der in Tabelle 4-1 gelistet ist.

Da eine Analyse der verschiedenen Kennwerte jeweils große qualitative Übereinstimmung zeigt, wird im weiteren Verlauf dieses Berichtes in der Regel auf Auswertungen des Rollwinkelmaximums als Kernelement der „Schräglagenangst“ Untersuchun-

Kennwert	Einheit	Beschreibung
$ \hat{\varphi} $	°	Maximaler Rollwinkel innerhalb des Segments
$ \hat{\dot{\varphi}} $	°/s	Maximale Rollrate innerhalb des Segments
$\hat{v}_\varphi$	km/h	Geschwindigkeit bei größtem Rollwinkel
$\bar{v}$	km/h	Mittlere Segmentgeschwindigkeit
$[a_x]$	m/s <sup>2</sup>	Längsbeschleunigungsintervall im Segment
$ \overline{a_x} $	m/s <sup>2</sup>	Mittelwert des Längsbeschleunigungsbetrags im Segment
$ \kappa $	1/m	Maximale Trajektorienkrümmung

Tab. 4-1: Kennwerte von Kurvensegmenten

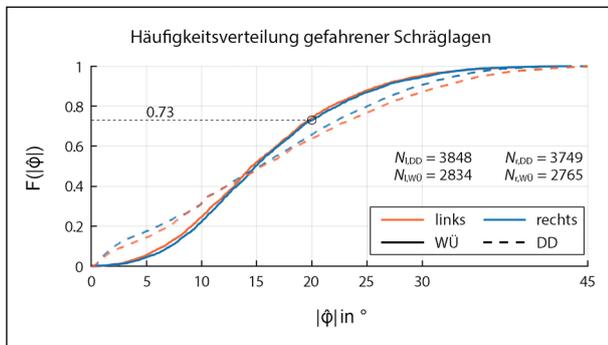


Bild 4-1: Beobachtete Schräglagenmaxima in Links- und Rechtskurven

gen zurückgegriffen. Sofern nicht anders beschrieben, gehen höhere Rollwinkelmaxima mit ebenso höheren anderen Dynamikkennwerten (Rollrate, Geschwindigkeit, Längsbeschleunigung) einher.

Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, setzen sich die jeweiligen Messstrecken in den zwei Erfassungsbereichen in etwa aus gleichen Anteilen an Links- und Rechtskurven zusammen. Dabei treten unterschiedliche Kurvenradien auf, wobei im Raum Dresden mit Streckenanteilen durch das Erzgebirge eine größere Häufigkeit engerer Kurven als im Raum Würzburg auftritt. Dies ist auch in der Häufigkeitsverteilung der beobachteten Schräglagenmaxima ersichtlich. Bild 4-1 stellt für beide Erfassungsräume die empirische Verteilungsfunktion getrennt nach der Kurvenrichtung dar. Das Schaubild zeigt, dass z. B. in 73 % der Würzburger Beobachtungen der Rollwinkel bis zu 20° beträgt.

Rollwinkel von über 30°, welche gemeinhin noch als ungefährlich gelten, werden demnach in gerade einmal 5 % der Beobachtungen überschritten. Die Dresdener Stichprobe zeigt geringere Anteile von Rollwinkeln kleiner als 13°, was auf die andere Streckenzusammensetzung zurückzuführen ist.

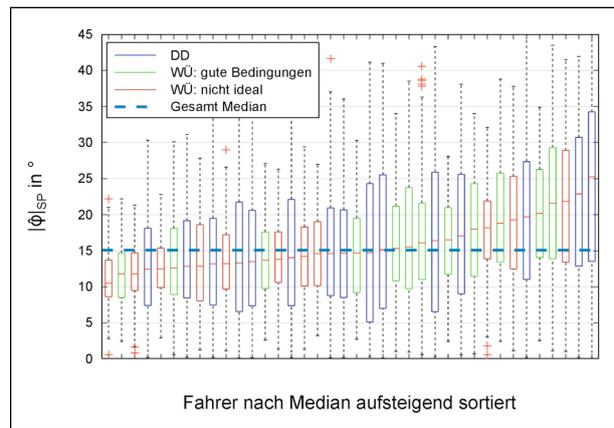


Bild 4-2: Verteilung der beobachteten Rollwinkelmaxima

Da kein signifikanter Unterschied zwischen den Verläufen von Links- und Rechtskurven erkennbar ist (DD zeigt statistisch etwas größere Rollwinkel nach links, WÜ minimal größere Rollwinkel nach rechts), wird nachfolgend bei der statistischen Auswertung der Kennwerte keine weitere Richtungsunterscheidung getroffen.

#### 4.1.1 Schräglagenverteilung

Die 23 Würzburger und 15 Dresdener Fahrer zeigen eine sehr heterogene Schräglagenverteilung.

Bild 4-2 zeigt – nach Median aufsteigend sortiert – die Verteilung der maximalen Rollwinkel je Kurvensegment in Form eines Boxplots. Darin ist der Median der Stichprobe (etwa 250 Werte je Fahrer in Würzburg, etwa 500 Werte je Fahrer in Dresden) als roter Querstrich markiert. Die umschließende Box stellt den Interquartilsabstand (25%-Quantil – 75%-Quantil) der Stichprobe dar. Die schwarz gestrichelten Linien umfassen Maxima und Minima der Stichprobe, sofern diese sich innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstandes befinden. Andernfalls werden solche Werte als Ausreißer durch rote „+“-Symbole dargestellt.

Aufgrund der größeren Stichprobe je Fahrer in der Dresdener Teilstudie sind hier größere Streuungen zu beobachten. Innerhalb des gesamten Fahrerkollektivs wurden nur von zwei Fahrern Rollwinkel von über 45° erreicht. Der größte Median liegt bei etwa 25° Rollwinkel, während vier Fahrer diesen Wert nicht einmal im Maximum erreichen. Bei einigen Fahrern sind leichte Richtungstendenzen (außermittiger Median) zu beobachten, welche ihren Ursprung, wie oben beschrieben, vermutlich nicht in einem unsymmetrischen Streckenver-

lauf haben. Vielmehr sind sie vermutlich auf Richtungsvorlieben der Fahrenden zurückzuführen. Der Median über alle Fahrenden hinweg (gestrichelte Horizontale) liegt bei einem Rollwinkelmaximum von  $15,1^\circ$  und deckt sich somit mit den Ergebnissen aus Bild 4-1 (siehe 50%-Perzentil).

Da die Segmentierung der Messfahrten zunächst bewusst nicht sehr selektiv ist (unabhängig von Rollwinkel oder Geschwindigkeit wird ab einer Kurswinkeländerung von  $10^\circ$  ein eigenständiges Datensegment erstellt), zeigen die Stichproben bisweilen sehr kleine Rollwinkel bis nahe  $0^\circ$  an.

### Umgebungsbedingungen

Die in Dresden aufgezeichneten Daten (blaue Boxen in Bild 4-2) wurden bei durchgehend guten Wetterbedingungen aufgezeichnet, während in der Würzburger Teilstudie unterschiedliche Bedingungen herrschten. Kam es durch Kälte, Nässe oder Nebel zu nennenswerten Beeinträchtigungen in der Messfahrt, ist dies als „nicht Ideal“ (rote Boxen) dargestellt, während die unter guten Bedingungen erfassten Daten in grünen Boxen dargestellt sind.

Es ist erkennbar, dass zwar eine Häufung der unter nicht idealen Bedingungen erfassten Daten im Bereich kleinerer Rollwinkelmaxima auftritt, gleichzeitig sind solche Bedingungen offensichtlich nicht alleine ausschlaggebend, da sowohl (sehr) geringe Rollwinkelmaxima auch bei guten Umgebungsbedingungen auftreten als auch (sehr) große Rollwinkelmaxima bei nicht idealen Bedingungen.

Das in Bild 4-3 dargestellte Scatterhistogramm stellt für alle beobachteten Kurvensegmente in der Würzburger Teilstudie den jeweiligen maximalen Rollwinkel sowie die dabei gefahrene Geschwindigkeit als einzelne Punkte dar. Dabei wird zwischen trockener Fahrt (blaue Rauten) und regnerischer Fahrt (rote Kreuze) unterschieden. An den jeweiligen Achsen sind zusätzlich die Häufigkeitsverteilungen der beiden Variablen aufgezeigt. Da sich bei konstanten Kurvenradien und Geschwindigkeiten jeweils ein definierter Rollwinkel einstellt, ist dieser Zusammenhang durch schwarze, gestrichelte Linien abgebildet. Für verschiedene Kurvenradien  $R$  und Fahrzeuggeschwindigkeiten  $v$  ergibt sich:

$$\varphi_{th} = \operatorname{atan} \frac{v^2}{Rg}$$

So ist z. B. zu erkennen, dass entlang der Linie mit 150 m Radius eine Häufung von Messpunkten existiert – sowohl bei trockener als auch nasser Fahrt. Dies verdeutlicht, dass zwangsläufig bei langsameren Geschwindigkeiten auch niedrigere Rollwinkel gefahren werden müssen. Beide Größen können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Eine Bewertung des beobachteten Rollwinkels ist also – bei vorgegebenem Kurvenverlauf – stets analog zu einer Bewertung der beobachteten Geschwindigkeit.

Die Histogramme in Bild 4-3 zeigen in der Würzburger Studie erwartungsgemäß einen Rückgang der beobachteten Rollwinkel und eine Abnahme der Kurvengeschwindigkeiten bei Nässe. Um einen Zusammenhang zwischen dem beobachteten Rückgang von Rollwinkelmaxima und Geschwindigkeit bei Nässe zu der subjektiv erfassten Angstbewertung herzustellen, werden in Bild 4-4 das 95%-Perzentil des Rollwinkelmaximums je Fahrenden sowie die mittlere Scheitelpunktgeschwindigkeit je Fahrenden betrachtet. Dabei zeigt sich, dass unter nachlassenden Umgebungsbedingungen diejenigen Fahrenden größere Leistungseinbußen aufweisen, die höhere Angstbewertungen abgeben. Während also ein hinsichtlich des Schräglagenverhaltens eher als „nicht ängstlich“ einzustufender Fahrer unter schlechten Bedingungen nur eine kleine Verringerung von Rollwinkel und Geschwindigkeit zeigt, fällt ein in diesem Zusammenhang als „eher ängstlich“ zu bezeichnender Fahrer von seinem bereits niedrigeren Rollwinkel- und Geschwindigkeitsniveau deutlich ab, wenn die Umgebungsbedingungen schlechter werden. Die hier gezeigten Daten können jedoch aufgrund der gerin-

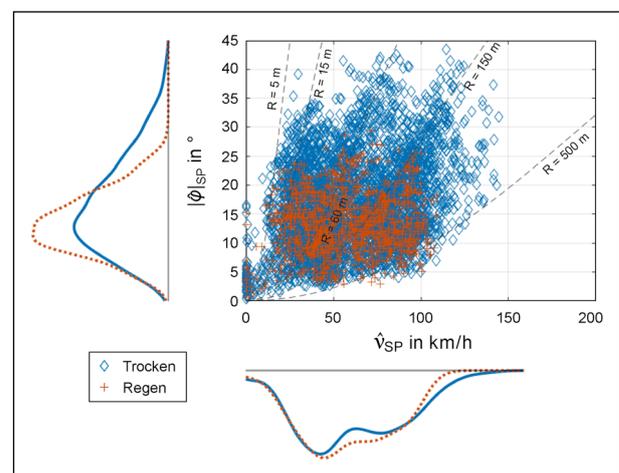


Bild 4-3: Scatterhistogramm der gefahrenen Rollwinkelmaxima und Scheitelpunktgeschwindigkeiten

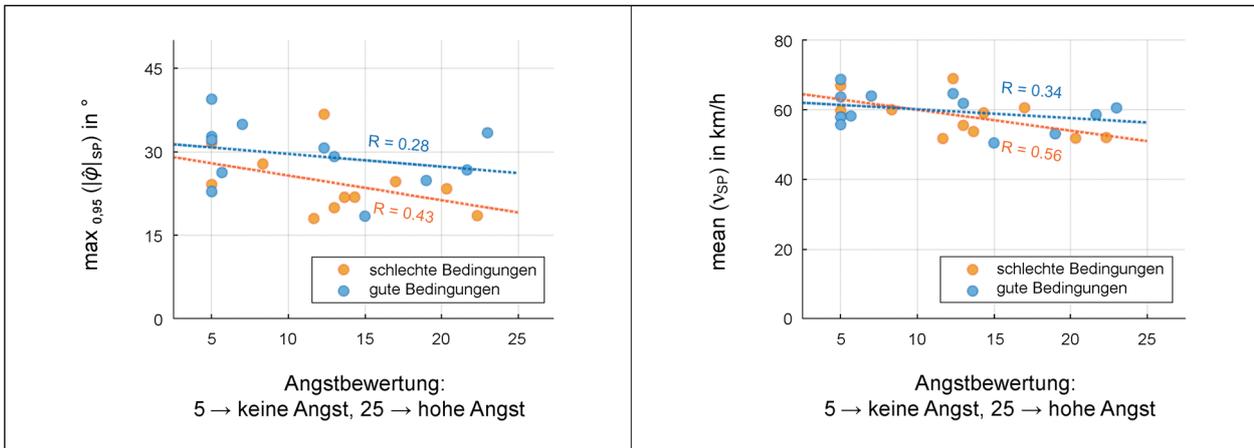


Bild 4-4: Leistungsabnahme durch schlechte Wetterbedingungen bei unterschiedlichen Angstbewertungen

gen Stichprobenzahl lediglich einer deskriptiven Betrachtung dienen und sind nicht statistisch repräsentativ.

**Angstbewertung**

Die in Bild 4-4 genutzte Angstbewertung basiert auf den Antworten der Fahrenden auf den fünf Fragebogen-Items zur Schräglagenangstbewertung (Kapitel 2.1.2), die vor der Fahrt abgefragt wurden. Bei der Suche nach einer etwaigen angstbedingten Schräglagenschwelle liegt es nah, die beobachteten Rollwinkel des Fahrendenkollektivs in Bezug zu dieser Angstbewertung zu stellen. Bild 4-5 zeigt erneut in Form eines Boxplots die Verteilung der beobachteten Rollwinkelmaxima auf. Dabei werden diejenigen Fahrenden in gemeinsame Gruppen aggregiert, die – in Fünferschritten gerundet – dieselbe Angstbewertung erreichen. Dabei entspricht eine Angstbewertung von 5 keiner Zustimmung auf die fünf abgefragten Items zum Umgang mit Schräglagen, während 25 der maximalen Zustimmung, also hoher erwarteter Schräglagenangst, entspricht.

Da durch die Aggregation mehrerer Fahrenden in gemeinsame Balken diesen eine ungleiche Stichprobenzahl zukommt, ist zur Verdeutlichung jeder in eine einzelne Box gehörige Datenpunkt farblich gekennzeichnet. So setzt sich bspw. die Box bei einer Angstbewertung von 10 aus allen Fahrenden zusammen, die eine Angstbewertung zwischen 7,5 und 12,4 abgegeben haben.

Des Weiteren werden nun nicht mehr alle Kurvensegmente zur Bewertung herangezogen. Stattdessen werden nur diejenigen Segmente betrachtet, bei denen die Kurswinkeländerung mehr als 90° und die mittlere Geschwindigkeit mehr als 50 km/h

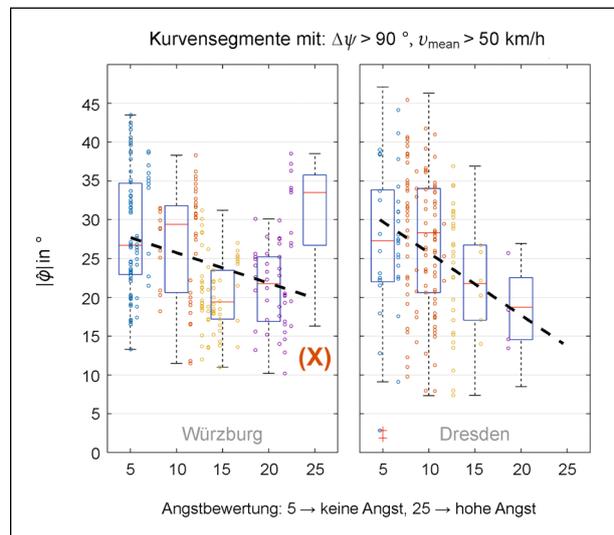


Bild 4-5: Rollwinkelmaxima in Abhängigkeit zur subjektiven Angstbewertung

beträgt. Diese Einschränkung zielt darauf, solche Kurvensegmente aus der Auswertung herauszuhalten, von denen keine besondere Erkenntnis in Bezug auf Schräglagenangst erwartet wird. So kann beispielsweise die Hypothese untersucht werden, dass Rollwinkel, die über längere Zeit konstant gehalten werden müssen, von ängstlichen Fahrenden gemieden werden.

In Bild 4-5 ist deutlich die gute Korrelation von subjektiv erfasster Angstbewertung mit den erreichten Rollwinkelmaxima zu erkennen. Diese Korrelation tritt in beiden Stichproben (DD & WÜ) gleichermaßen auf und zeigt auch eine ähnliche Größenordnung. Ein einzelner Datensatz (Fahrender X) in der Würzburger Teilstudie zeigt trotz maximaler Angstbewertung auch sehr große gefahrene Schräglagen. Ein wahrheitsgemäßes Beantworten des Fra-

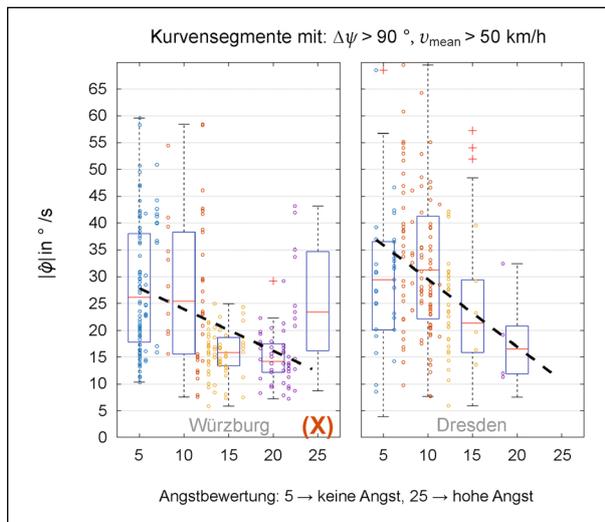


Bild 4-6: Rollratenmaxima in Abhängigkeit zur subjektiven Angstbewertung

gebogens vorausgesetzt, kann dies zwei Gründe haben:

- Fahrer X unterschätzt seine eigenen Fahrleistungen und wähnt sich in Sicherheit, wenn gleich er offenbar das gesamte Probandenpanel mit seinen gefahrenen Schräglagen übertrifft.
- Fahrer X empfindet möglicherweise tatsächlich Angst oder zumindest Respekt vor hohen Schräglagen, befährt diese jedoch dennoch, statt diesen fernzubleiben.

Als weitere – hypothetische – Option besteht die Möglichkeit, dass Fahrer X den Fragebogen entgegen seiner tatsächlichen Einstellungen beantwortet hat, um sich dort als besonders vorsichtigen und umsichtigen Fahrer darzustellen.

Auch die beobachteten maximalen Rollraten und mittleren Segmentgeschwindigkeiten zeigen dieselbe Tendenz zu niedrigeren Größen bei steigender Angstbewertung. Auf die Darstellung von letzteren wird verzichtet, erstere sind in Bild 4-6 zu sehen. Grundsätzlich zeigt sich dasselbe Bild wie bereits zuvor. Bemerkenswert ist, dass Fahrer X, der zuvor im Median den höchsten Rollwinkel aufwies, nun bei den Rollraten hinter dem Median der Gruppen mit Angstbewertungen von 5 & 10 zurückbleibt.

Angenommen, dass Fahrer X tatsächlich eine große Schräglagenangst besitzt, entwickelt sich die Annahme, dass sich bei alltäglicher Fahrt die Angst möglicherweise nicht durch das Fernbleiben großer Schräglagen, sondern durch das zaghaftere Anfahren derselben zeigt.

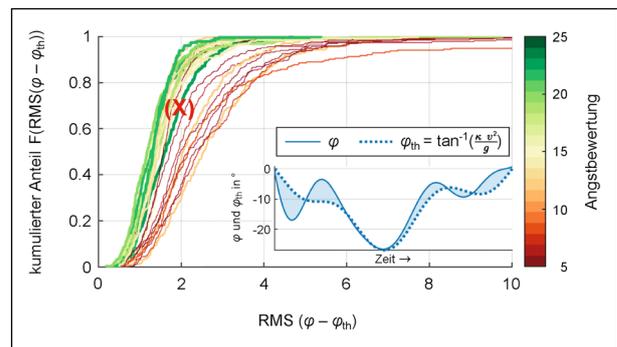


Bild 4-7: Kumulierte Häufigkeit des RMS der Rollwinkelabweichung, mit größeren Abweichungen vom quasistationären Rollwinkel bei niedrigeren Schräglagenangstbewertungen

Um diese These zu untersuchen, wird für jedes der Kurvensegmente aus der gegebenen Kurvenkrümmung (basierend auf den jeweiligen GPS-Messdaten, siehe Kapitel 3.1.1) und der Fahrgeschwindigkeit ein theoretischer Rollwinkel unter Annahme quasistationären Fahrens berechnet:

$$\varphi_{th} = \arctan\left(\frac{\kappa v^2}{g}\right)$$

Bei anschließender Betrachtung der Differenz des real gemessenen Rollwinkels und des entsprechenden theoretischen Rollwinkels zeigen sich je Fahrer unterschiedliche Abweichungen. Für ein einzelnes Segment eines einzelnen Fahrers ist diese Differenz in Bild 4-7 dargestellt. Während die durchgezogene Linie den gemessenen Rollwinkel zeigt, ist der quasistationäre, theoretische Rollwinkel nach obiger Formel punktiert dargestellt. Die Differenz ist als blaue Fläche hervorgehoben. Wird nun das quadratische Mittel (RMS) der Differenz aus tatsächlichem und theoretischem Rollwinkel für jedes Kurvensegment errechnet und dessen kumulierte Häufigkeit betrachtet, ergibt sich eine gut sichtbare Trennung zwischen denjenigen Fahrern, die hohe oder niedrige Angstbewertungen abgegeben haben.

## Reife & Fahrerfahrung

Neben der Angstbewertung sind weitere Faktoren im Zusammenhang mit den beobachteten maximalen Rollwinkeln interessant. Das obige Beispiel von Fahrer X zeigt, dass die Angstbewertung allein noch keinen Schluss auf die erreichten Schräglagen in der Realfahrt zulässt. Um das Verhalten des Fahrers genauer verstehen zu können, könnten andere Faktoren wie das Alter oder die Fahrerfahrung einen größeren Einfluss besitzen. Die beiden

Diagramme (Bild 4-8 und Bild 4-9) zeigen analog zu Bild 4-5 und Bild 4-6 die Rollwinkelmaxima in Box-plots, diesmal gruppiert nach dem Alter der Fahrerinnen und deren Jahresfahrleistung. Es deutet sich zwar an, dass mit steigendem Alter die maximal erreichten Rollwinkel leicht zurückgehen, jedoch weisen die gezeigten Daten eine sehr große Streuung auf und eine lineare Regression genügt keiner statistischen Prüfung.

Auch der Bezug zwischen Jahresfahrleistung und Rollwinkelmaxima zeigt einen erwartungsgemäßen Anstieg in der linearen Regression der Daten. Jedoch sind auch hier größere Stichproben nötig, um statistisch relevante Ergebnisse gewährleisten zu können.

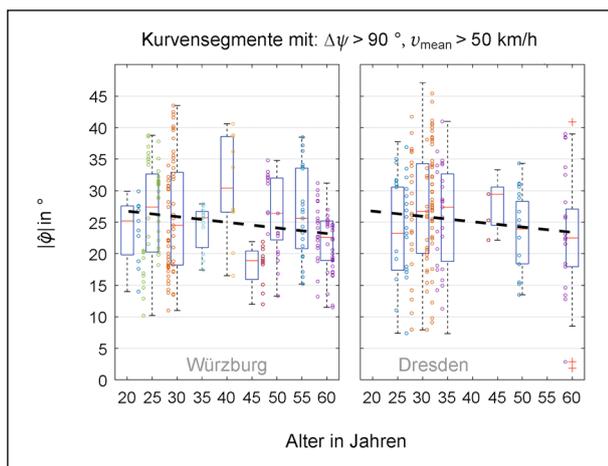


Bild 4-8: Rollwinkelmaxima in Abhängigkeit zum Alter

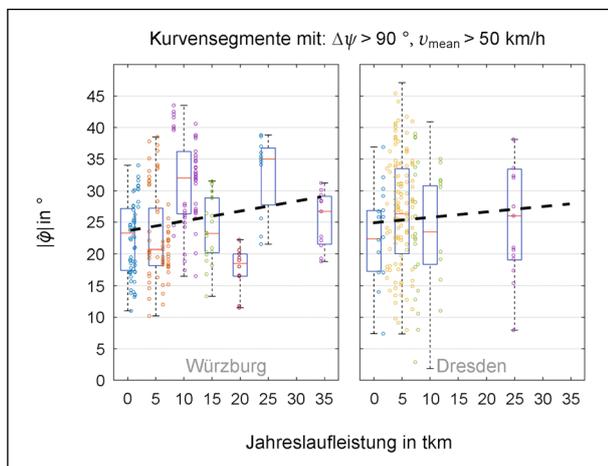


Bild 4-9: Rollwinkelmaxima in Abhängigkeit zur Jahreslaufleistung

## Kurzzusammenfassung Realfahrtstudien

Insgesamt nahmen in Dresden 15 Fahrerinnen und in Würzburg 23 Fahrerinnen an der Fahrerinnenstudie teil. Aufgrund der geringen Stichprobenmenge gilt, dass die Studienergebnisse nur bedingt für eine übergeordnete Population aussagekräftig sind.

Durch die gezeigte Segmentierungsmethode ist es möglich, Kennwerte für eine große Anzahl Fahrerinnen und Kurven miteinander in Bezug zu setzen, statt deskriptive Analysen von Zeitverläufen durchzuführen. Dadurch wird auch bei der Anwendung größerer Stichproben die Datenauswertung effizient möglich.

Das Fahrerinnenkollektiv, das zur Durchführung der Studie zur Verfügung stand, repräsentiert größtenteils defensiv Fahrerinnen. Kein Fahrerinnen erlebte während der Kurvenfahrt ein Schleifen von Motorradanteilen auf dem Asphalt oder geriet in andere heikle Situationen. Die geometrisch/physikalisch bedingte Schräglagengrenze wurde somit bei keinem Fahrerinnen überschritten. Individuelle Schräglagenschwellen sind indes schwieriger zu bewerten.

Allgemein wurde beobachtet, dass – für Links- und Rechtskurven einheitlich – mindestens 50 % aller beobachteten Rollwinkel unter  $15^\circ$  und mindestens 75 % aller beobachteten Rollwinkel unter  $25^\circ$  liegen. Rollwinkel über  $30^\circ$  konnten trotz ihrer dynamischen Unbedenklichkeit lediglich in 5 – 10 % der Stichprobe beobachtet werden.

Einzelne Fahrerinnen zeigten Auffälligkeiten bei der Auswertung ihrer gefahrenen Schräglagen und den abgegebenen Bewertungen ihrer Schräglagenangst oder des Risikopotenzials. Jedoch wurde insgesamt eine gute Korrelation zwischen höheren Angstbewertungen und niedrigeren Rollwinkelmaxima beobachtet.

Der Erwartung widersprechend haben wenige Fahrerinnen trotz einer erhöhten Schräglagenangst auch eine höhere Risikobereitschaft berichtet. Die durchschnittliche Risikobereitschaft über alle Fahrerinnen hinweg lag mit einem Wert von 2,5 genau in der Mitte des Antwortintervalls.

Die Erkenntnisse aus der Untersuchung der Jahresfahrleistungen decken sich mit denen von WATANABE et al. (WATANABE & YOSHIDA, 1973) und CARTER et al. (CARTER, ROSE & PENTECOST, 2015), die den durchschnittlichen Rollwinkel

für unerfahrene Fahrende (geringe Laufleistung) mit  $23^\circ$  und einem Spektrum von  $15^\circ$  bis  $25^\circ$  angeben. Weiterhin geben sie an, dass erfahrene Fahrende ein breiteres Spektrum abdecken sowie Maximalwerte von über  $40^\circ$  erreichen.

Abschließend können folgende Aussagen bezüglich der durchgeführten Machbarkeitsstudie festgehalten werden:

1. 75 % aller beobachteten Rollwinkel liegen unter einem Schwellwert von  $25^\circ$ .
2. Die von den Fahrenden eingestellten Rollwinkel sind abhängig von Kurvenverläufen, zulässigen Geschwindigkeiten und Umgebungseinflüssen.
3. Fahrende mit höherer berichteter Schräglagenangst fahren durchschnittlich geringere maximale Rollwinkel und bilden ein geringeres maximales Rollwinkelspektrum ab. Die abgefragten Items lassen somit bereits eine erste Einschätzung über das Schräglagenverhalten der Fahrenden zu.
4. Unter den Fahrenden ist eine altersbedingte Abhängigkeit der gefahrenen Schräglage erkennbar, jedoch ist eine größere Stichprobe nötig, um statistische Relevanz zu erreichen.
5. Fahrende mit geringen Jahresfahrleistungen ( $\leq 5.000$  km) fahren durchschnittlich geringere maximale Rollwinkel. Das Erreichen großer Fahrleistungen allein ist jedoch nicht hinreichend zur Erreichung großer Rollwinkel.

## 4.2 Probandenstudie Messgelände

Die Probandenstudie zur Überprüfung der entwickelten Methodik für die Untersuchung von potenziell gefährlichen Situationen in sicherem Umfeld (pseudokritische Manöver) wurde im Oktober 2019 auf dem Flugplatz in Griesheim, Nähe Darmstadt durchgeführt. Hierfür standen insgesamt 10 Fahrende im Alter von 21 bis 29 Jahren zur Verfügung, wovon 7 Teilnehmer männlich und 3 weiblich sind. Eine nähere Beschreibung der Fahrenden befindet sich in Kapitel 3.2.1. Grundvoraussetzung für die Teilnahme an der Studie war der Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis für das Messmotorrad Honda NC 700 X, das in Kapitel 3.3.1. beschrieben ist. Die Planung und Durchführung der Versuche sind Kapitel 3.2.2 und Kapitel 3.2.3 zu entnehmen.

### 4.2.1 Komfortbereich

Zur Ermittlung des individuellen Komfortbereichs eines Fahrenden wurde die bereits beschriebene  $180^\circ$ -Kurve mehrfach gegen und im Uhrzeigersinn durchfahren.

In Bild 4-10 ist der während der zehn Kurvendurchfahrten jeweils maximal erreichte Rollwinkel aufgetragen. Hierbei wird getrennt nach Links- und Rechtskurve unterschieden, wobei links einer gegen den Uhrzeiger- und rechts im Uhrzeigersinn durchfahrenen Kurve entspricht. Im Gegensatz zu den in Kapitel 4.1 beschriebenen Ergebnissen der Realfahrstudie sind klare Unterschiede zwischen den jeweiligen Fahrenden je nach Kurvenrichtung zu erkennen. Eine mögliche Erklärung ist die geringere Anzahl der untersuchten Kurven. Im Falle der Realfahrstudien gleicht sich ein möglicher Unterschied über die Menge der Daten statistisch aus, was bei den Messgelände Untersuchungen nicht der Fall ist.

Bei manchen Fahrenden ist der Unterschied je nach Kurvenrichtung deutlicher ausgeprägt, wohingegen andere sehr gleichartig Links- und Rechtskurven durchfahren, wie zum Beispiel Fahrender Nummer 2. Auffällig ist besonders bei Fahrender Nummer 5 ein sehr großer Unterschied zwischen den beiden Kurvenrichtungen. Eine mögliche Erklärung ist ein Zusammenhang mit einem kürzlich vergangenen Unfallereignis des Fahrenden in einer Linkskurve.

Zudem sind Unterschiede in dem absoluten, maximal gefahrenen Rollwinkel, wie auch der Varianz dieser Werte, beziehungsweise dem Interquartilsabstand festzustellen. Dieser gibt an, wie gleichmäßig der jeweilige Fahrende dieselbe Kurve jedes

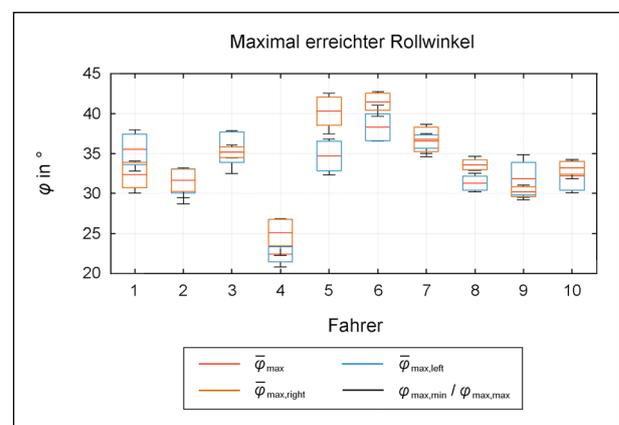


Bild 4-10: Ermittlung des Komfortbereichs über die maximalen Rollwinkel in Links- und Rechtskurven

Mal durchfährt. Ein großer Interquartilsabstand bedeutet hier ein herantasten an das persönliche Maximum, wohingegen ein kleiner Abstand dafür spricht, dass ab der ersten Durchfahrt immer wieder eine ähnliche Maximalschräglage gefahren wird. Dies ist häufig bei versierteren Fahrern zu finden, wie bei Fahrer Nummer 8, nach Tabelle 3-3 der Teilnehmer an der Studie mit längster Fahrpraxis. Zudem bestehen deutlich unterschiedlich ausgeprägte Komfortrollwinkel, wie sich zwischen den Fahrern 4 und 6 zeigt. Für die weiteren beispielhaften Ergebnisse wird Fahrerin 4 als defensive Fahrerin mit einer persönlich niedrigen Schräglagenschwelle und Fahrer 8 als versierter, sportlicher Fahrer ausgewählt.

#### 4.2.2 Kritikalitätsbewertung

Nach Durchfahrt eines pseudokritischen Manövers wurde jeweils eine subjektive Einschätzung der Kritikalität durch den Fahrer mittels eines Fragebogens gegeben. Hierdurch wird eine individuelle Bewertung der Situation im Vergleich zu den real gemessenen Beschleunigungen möglich.

In Bild 4-11 sind die Quer- und Längsbeschleunigungswerte des Fahrers 4 während des ersten pseudokritischen Manövers dargestellt. Als blaue Punkte sind jeweils die Beschleunigungswerte der vorherigen Durchfahrten, im Gegensatz dazu die Werte des pseudokritischen Manövers als kleine rote Kreise dargestellt. Zusätzlich ist das real mögliche Kraftschlusspotenzial, konservativ geschätzt, als äußerer Kreis eingetragen sowie der Mittelwert

der Beschleunigungen während des Manövers und die Subjektivbewertung der Probanden, normiert auf das Kraftschlussmaximum. Hierbei ist ersichtlich, dass bei Fahrer 4 eine kritischere Subjektiveinschätzung der Situation zu finden ist als bei Fahrer 8, dessen Bewertung und Beschleunigungswerte in Bild 4-12 dargestellt sind. Dies bedeutet, dass Fahrer 4 bei einer geringeren Schräglage schneller an oder über seine persönliche Wohlfühl-Grenze kommt. Dies deckt sich mit dem in Bild 4-10 ermittelten Komfortbereich.

Bei Fahrer 8 liegt eine deutlich weniger kritische Einschätzung vor, bei gleichzeitig größeren Beschleunigungswerten. Das bedeutet nach der Methodik aus Kapitel 2.2.1, dass keine pseudokritische Situation vorliegt. Zu erkennen ist dies in den Abbildungen, wenn sich der Subjektivbewertungskreis innerhalb des Messdaten Kreises befindet, wie in Bild 4-12.

Das kann zum einen heißen, dass wie in diesem Fall die Situation als sehr unkritisch wahrgenommen wird, andererseits auch, dass realkritisch sehr hohe Werte erreicht wurden. Das erste pseudokritische Manöver wurde auf diese Weise nur durch drei von zehn Fahrern als pseudokritisch bewertet. Eine Erklärung hierfür ist die frühe Sichtbarkeit der veränderten Situation.

Bei dem zweiten pseudokritischen Manöver, der Kurve mit im Verlauf veränderlichem Radius, fällt die Bewertung anders aus. Hier bewerten 7/10 Fahrer die Situation als pseudokritisch. Dies liegt sowohl an der späteren Sichtbarkeit des Ereignis-

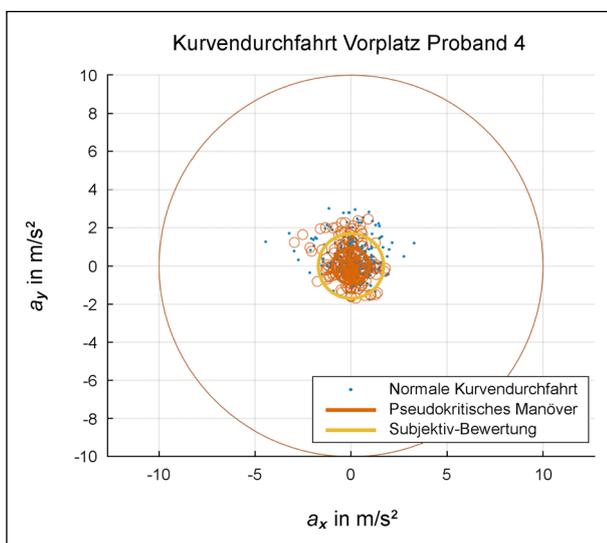


Bild 4-11: Kritikalitätsbewertung pseudokritisches Manöver Vorplatz, Proband 4

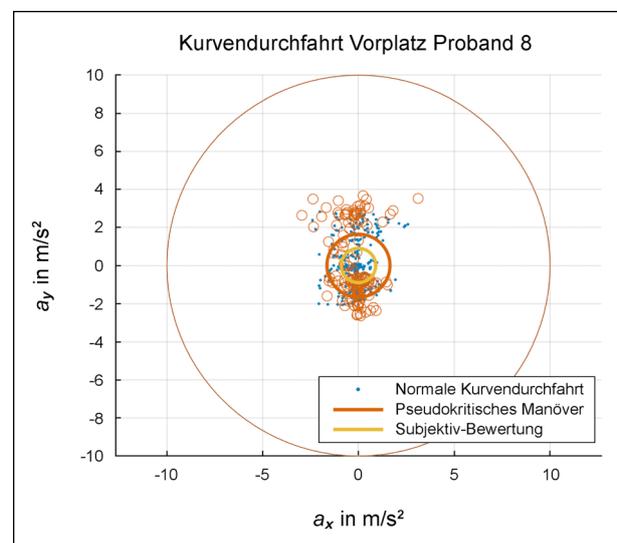


Bild 4-12: Kritikalitätsbewertung pseudokritisches Manöver Vorplatz, Proband 8

ses als auch an der höheren Dynamik der Situation. Eine noch stärkere Reaktion der Fahrenden hätte durch eine stärkere Änderung des Radius hervorgerufen werden können. Dies ist auf dem zur Verfügung stehenden Flugplatz aus räumlichen Gründen und zur Wahrung der nötigen Auslauflächen nicht möglich.

Ebenso wird das dritte pseudokritische Manöver bewertet. Auch hier bewerten 7/10 Fahrenden die Situation als pseudokritisch. Der Unterschied ist jedoch, dass aufgrund der hohen Dynamik der Situation eine teils sehr starke Reaktion auf das verdeck-

te, plötzlich auftauchende Hindernis verzeichnet wurde. Dies spiegelt sich zum Beispiel in der Bewertung durch Fahrenden 4 wider, wie sie in Bild 4-13 zu sehen ist.

### 4.2.3 Schräglagenschwelle

Zur Untersuchung der Existenz einer Schräglagenschwelle in potenziell kritischen Situationen wurden gezielt die Reaktionen der Fahrenden während eines pseudokritischen Manövers untersucht.

Hier zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bei der Bewertung der Manöver. Bei dem Manöver veränderlicher Radius und Hundekurve ist vergleichsweise wenig Reaktion zu beobachten. Die häufigste Reaktion ist die Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit, sowohl über veränderte Gasgriffstellung als auch zum Teil über Bremsengriffe. Interessant ist hierbei, dass alle drei Probandinnen ähnliche Reaktionen zeigten und moderater als die männlichen Probanden verzögerten. Das bedeutete, dass explizit bei keinem der Manöver ein Bremsengriff vorgenommen wurde, im Gegensatz zu den männlichen Probanden. Hierbei sei jedoch auf die geringe Stichprobengröße und damit fehlende statistische Relevanz hingewiesen.

Beispielhaft dargestellt sind die Eingriffe aller Fahrender in Bild 4-14 und Bild 4-15. Hierbei ist jeweils der maximale Rollwinkel aufgetragen, in blau während der Fahrten ohne Ereignis und in orange wäh-

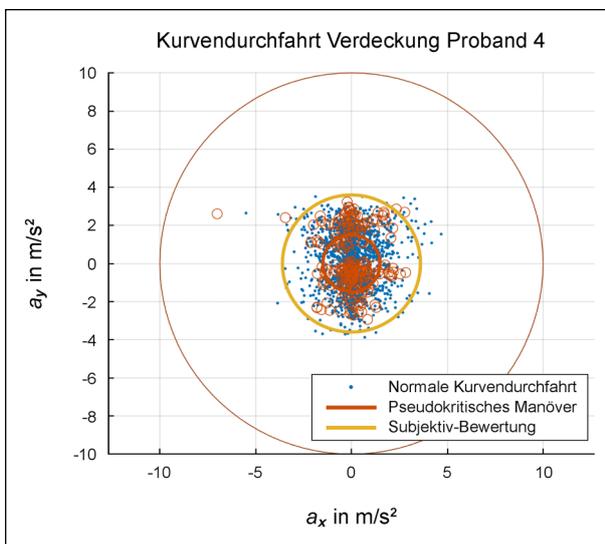


Bild 4-13: Kritikalitätsbewertung Proband 4, verdecktes Hindernis

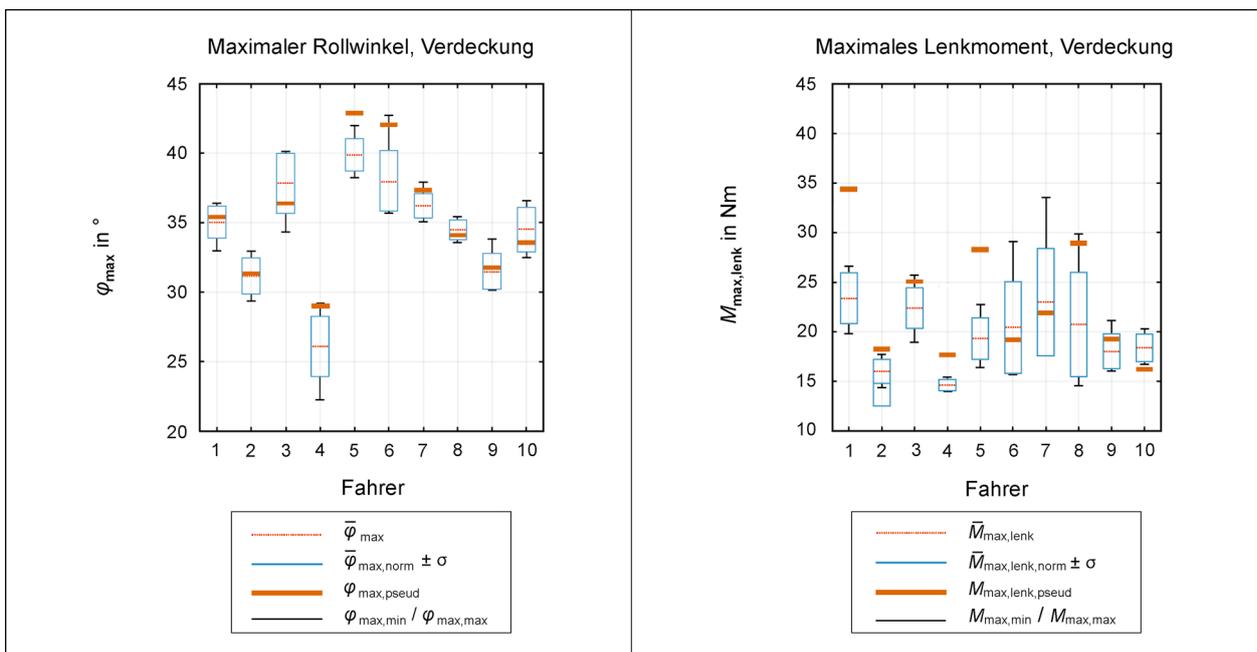


Bild 4-14: Vergleich maximaler Rollwinkel und maximales Lenkmoment, verdeckte Kurve

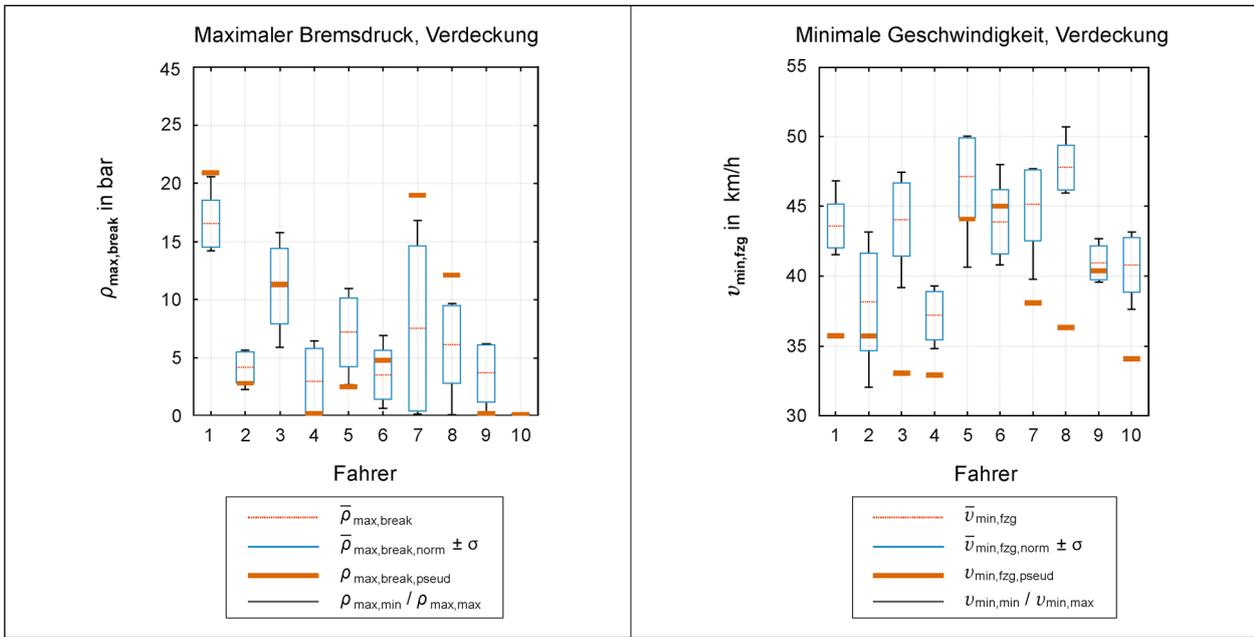


Bild 4-15: Vergleich maximaler Rollwinkel und maximales Lenkmoment, verdeckte Kurve

rend des pseudokritischen Manövers. Hervorzuheben ist hierbei, dass während der Manöver keine geringeren Schräglagen als bei den Normalfahrten festzustellen sind. Ein deutlicher Unterschied besteht bei dem Manöver verdecktes Hindernis im maximalen Lenkmoment. Hier sind sichtbare, hohe Ausschläge zu verzeichnen. Ebenso bauten alle Fahrenden deutlich Geschwindigkeit ab. Dies geschah teils parallel mit einem Bremsengriff, was auch die Veränderung im Lenkmoment aufgrund des zu kompensierenden Bremslenkmoments plausibilisiert.

Sichtbar wird das veränderte Verhalten auch bei einem Auftragen der Schräglagenverteilung der Fahrenden mittels einer kumulierten Dichtefunktion.

Dargestellt ist dies in Bild 4-16 und Bild 4-17. Hier wird besonders bei Fahrendem 8 eine deutliche Veränderung zu der ansonsten sehr gleichmäßigen Schräglagenverteilung sichtbar. Zudem fällt bei Fahrendem 4 ein Knick in der Verteilung bei maximal 20° Rollwinkel auf, was für ein Verlassen des persönlichen Komfortbereichs spricht. Ebenso ist bei Fahrendem 8 während des pseudokritischen Manövers ein Knick bei 20° Rollwinkel zu verzeichnen. Dieser spricht für ein kurzes Verharren bei dieser Schräglage. Dieser Haltepunkt mit anschließendem Nachregeln beim Schräglagenaufbau ist möglicherweise ein sinnvoller Kennwert für die Untersuchung von Schräglagenschwellen. Ein ähnliches Verhalten wie bei Fahrendem 8 ist bei insgesamt 8 von 10 Fahrenden zu beobachten.

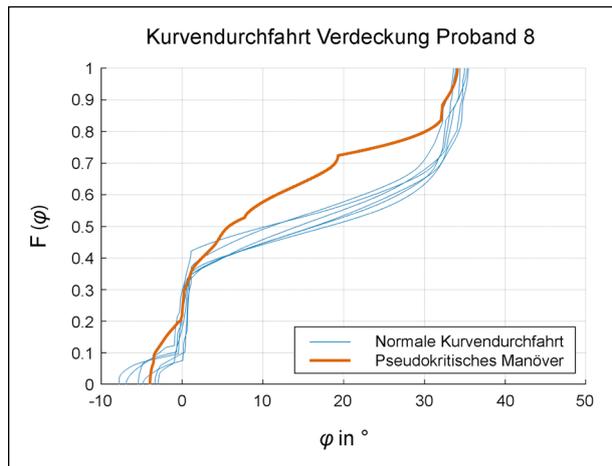


Bild 4-16: CDF-Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 8

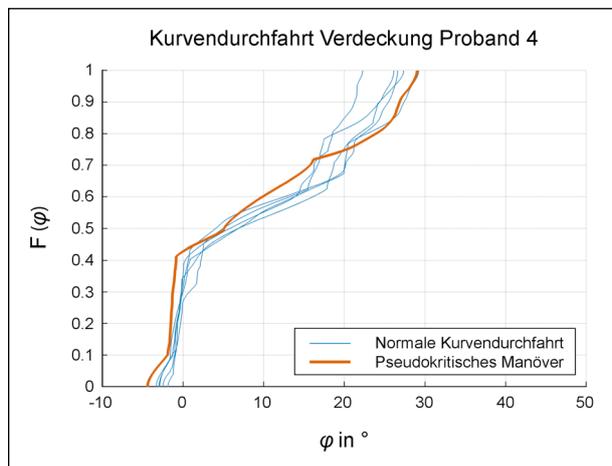


Bild 4-17: CDF-Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 4

Deutlich sichtbar wird das veränderte Verhalten bei einer Betrachtung der Rollrate über dem Rollwinkel in Bild 4-18 bis Bild 4-26. Im Vergleich zu den in blau dargestellten Verläufen einer Ein- und Ausrollbewegung in die durchfahrene Rechtskurve ohne pseudokritisches Manöver sieht der Verlauf bei einem plötzlich auftauchenden Hindernis stark verändert aus. Der Verlauf einer solchen Durchfahrt des pseudokritischen Manövers ist mit Pfeilen in Bild 4-18 gekennzeichnet.

Die Rechtskurve wird bei  $0^\circ$  Rollwinkel mit positiver Rollrate in positive Richtung initiiert. Der in blau dargestellte Verlauf der Normalfahrten fällt ein Phänomen auf, das auch bei anderen Fahrenden zu beobachten ist. Der Zielrollwinkel wird stufenweise aufgebaut, wobei während einer „Rollwinkelstufe“ nicht nur verharrt, sondern auch kurzzeitig wieder Rollwinkel reduziert wird. So tastet sich der Fahrende an seine persönlich maximal akzeptierte Schräglage heran. Nach Erreichen der maximalen Schräglage beginnt die Abbauphase der Schräglage. Hierbei sind die eben beschriebenen Stufen nicht erkennbar, was wiederum für eine Art Schräglagenschwelle spricht. Denn eine Schräglagenabnahme bringt den Fahrenden augenscheinlich wieder in einen sicheren, aufrechten Zustand zurück.

Im Falle des pseudokritischen Manövers verdecktes Hindernis ist bei 7/10 Fahrenden ein ähnliches Verhalten wie in Bild 4-18 gezeigt sichtbar. Hier wird zunächst ohne Änderungen des Verhaltens in die Kurve eingefahren, bis zum Entdecken des Hindernisses. Zu diesem Zeitpunkt erstarrt die Rollbewegung schlagartig und ein Aufstellen des Fahrzeuges zum Ausweichen beginnt. Parallel mit den bereits beschriebenen Bremseingriffen fallen diese Bewe-

gungen teils sehr stark aus. Interessanterweise wird bei dem im Anschluss erneut aufgebauten Rollwinkel der persönliche Maximalrollwinkel sehr direkt wieder angefahren, ohne weitere Schwellen oder Stufen. Bei drei von zehn Fahrenden ist eine deutlich gemäßigte Reaktion zu beobachten. Hier ist zum Teil gar kein Unterschied zwischen Normalfahrt und pseudokritischem Manöver zu beobachten.

Die normale Kurvenfahrt von Fahrendem 8 unterscheidet sich stark zu den Messungen der anderen Fahrenden. Hier ist dauerhaft eine sehr konstante Rollbewegung zu beobachten, was sich auch mit der Verteilung in Bild 4-19 deckt. Besonders der Rollwinkelaufbau auf den persönlichen Komfortrollwinkel (positive Rollwinkel bei einer Rechtskurve) erfolgt bei Fahrendem 8 ohne größere Haltepunkte und sehr konstant. Im Vergleich hierzu sind bei allen anderen Fahrenden Haltepunkte während des Rollwinkelaufbaus beobachtbar, also Punkte an denen die Rollrate stark abnimmt oder gegen Null geht. Somit tasten sich die meisten Fahrenden, besonders bei nicht direkt einsehbaren Situationen, auf ihr persönliches Maximum vor. Dies ermöglicht einen ersten Interpretationsansatz für die Existenz einer Art situationsabhängiger Schräglagenschwelle.

Die Reaktion auf das plötzlich auftauchende Hindernis ist bei Fahrendem 8 jedoch ähnlich stark ausgeprägt wie bei den anderen Fahrenden. Im Vergleich ist die Reaktion auf das verdeckte Hindernis von Fahrendem 9 in Bild 4-20 dargestellt. Die Reaktion auf das Hindernis fällt sehr moderat aus. Nach einem kurzen Verharren bei  $20^\circ$  Schräglage ohne Aufstellbewegung wird ohne weitere Stufe die persönliche Maximalschräglage erreicht.

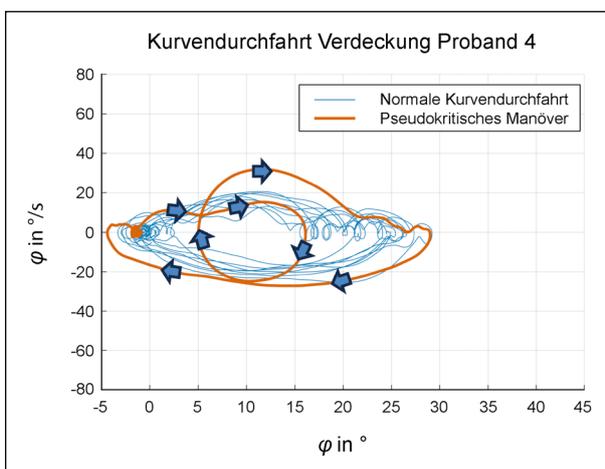


Bild 4-18: Rollrate über Rollwinkel, verdecktes Hindernis, Proband 4

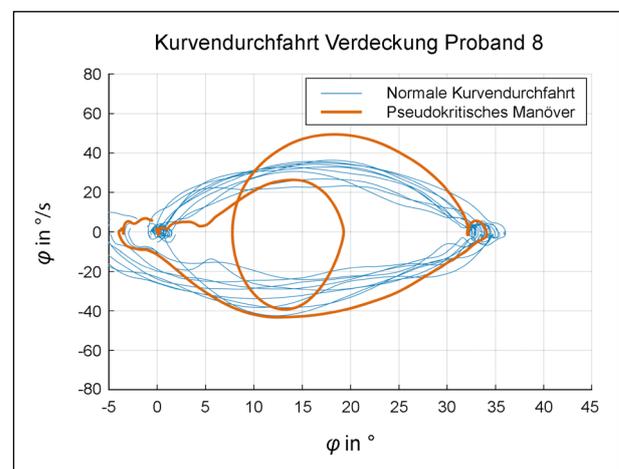


Bild 4-19: Rollrate über Rollwinkel, verdecktes Hindernis, Proband 8

Dies zeigt, dass die Reaktionen auf ein pseudokritisches Manöver nicht direkt mit dem persönlichen Komfortbereich zusammenhängen oder der Art einer Kurvendurchfahrt in Normalsituationen und spricht wiederum für eine situationsabhängige Schwelle.

Ein Unterschreiten der persönlichen Schräglagenschwelle direkt im Anschluss an ein pseudokritisches Manöver ist bei keinem Fahrenden zu beobachten, jedoch auch umgekehrt kein Überschreiten. Somit ist die Hypothese der Existenz einer situationsabhängigen Schräglagenschwelle nicht eindeutig durch die Untersuchungen belegbar.

In den Bildern 4-21 bis 4-27 sind die Reaktionen der restlichen 7 Fahrenden auf das pseudokritische Manöver verdecktes Hindernis dargestellt.

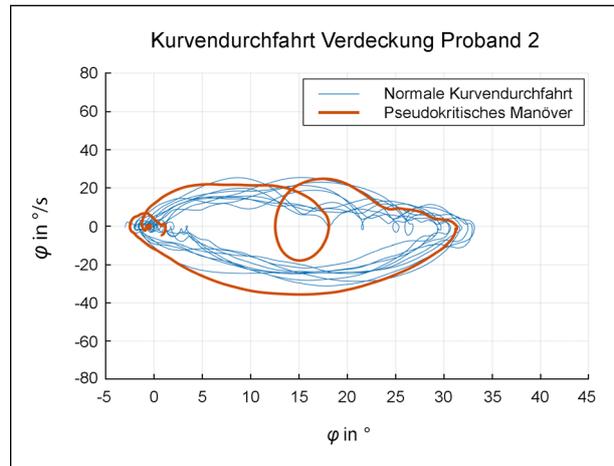


Bild 4-22: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 2

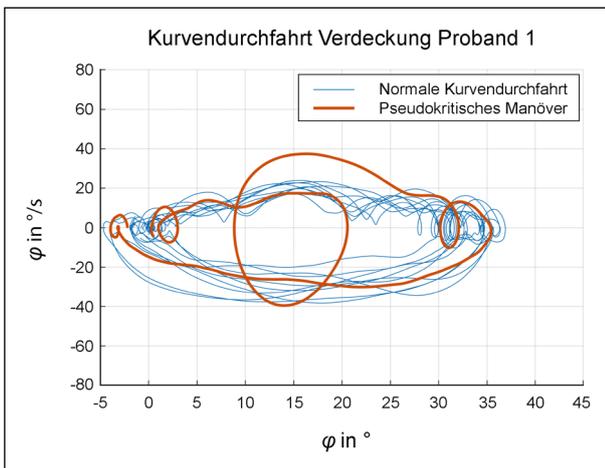


Bild 4-20: Rollrate über Rollwinkel, verdecktes Hindernis, Proband 1

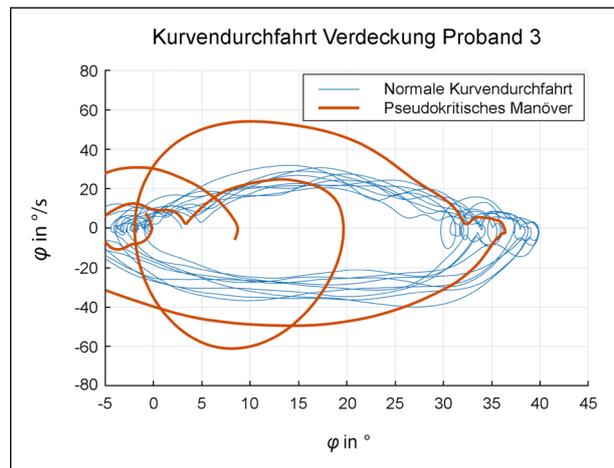


Bild 4-23: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 3

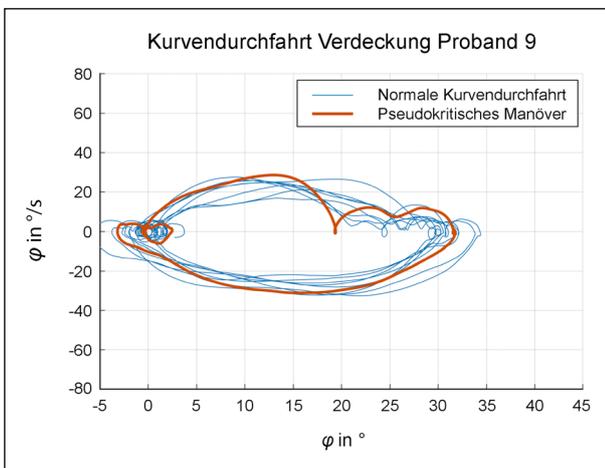


Bild 4-21: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 9

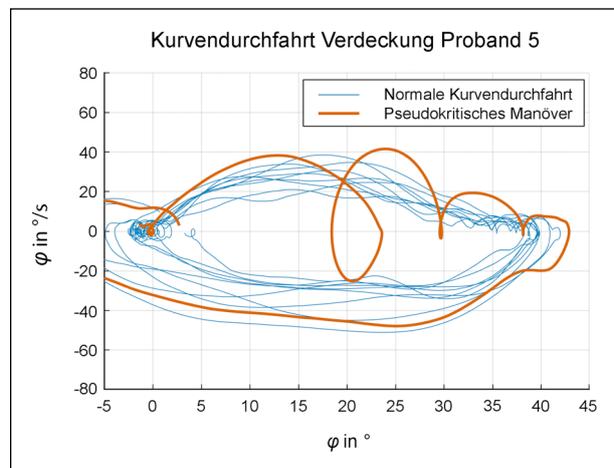


Bild 4-24: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 5

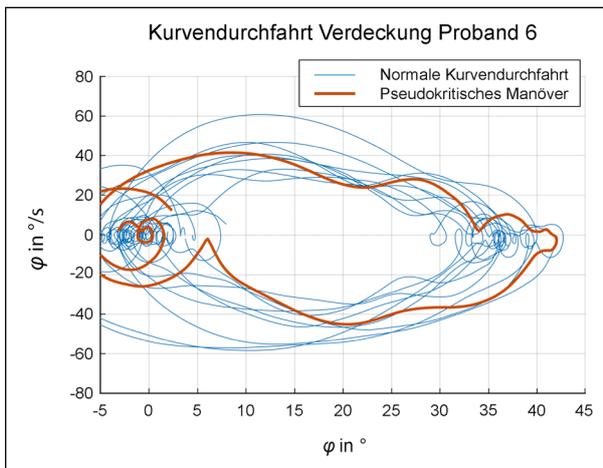


Bild 4-25: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 6

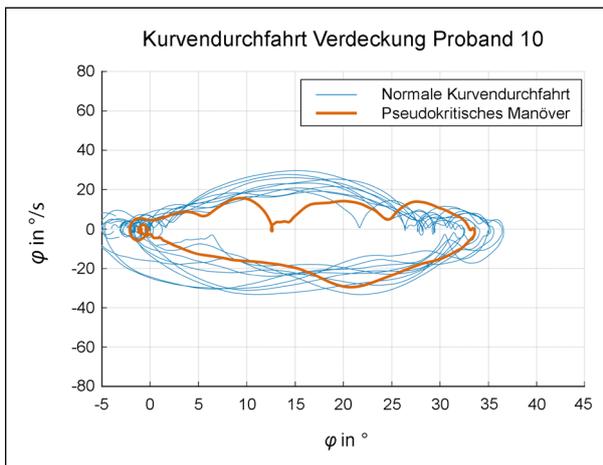


Bild 4-26: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 10

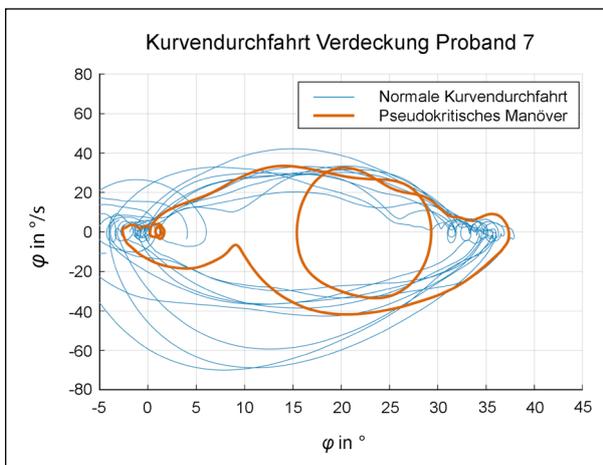


Bild 4-27: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 7

#### 4.2.4 Zusammenfassung Messgelände-Untersuchungen

Die insgesamt 10 Fahrenden sind aufgrund der geringen Stichprobenmenge nicht statistisch belastbar zu interpretieren.

Die Untersuchungen haben eine prinzipielle Eignung der in Kapitel 2.2 erarbeiteten Methodik zur Durchführung und Bewertung pseudokritischer Manöver gezeigt. Jedoch sind auch Verbesserungsmöglichkeiten der entsprechenden Methodik zu Tage getreten. So befindet sich ein wenig dynamisches Manöver wie die Kurve mit geändertem Radius aufgrund der geringen Subjektivbewertung durch die Fahrenden häufig nicht mehr im Bereich der Pseudokritikalität. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass besonders Manöver mit einem verdeckten, plötzlich auftauchenden Hindernis die beste Eignung zur Untersuchung von Fahrreaktionen aufweisen.

Im Gegensatz zu den Realfahrt-Untersuchungen ist bei der Ermittlung des Komfortbereichs auf dem Messgelände ein Unterschied zwischen der Richtung der Kurvendurchfahrt zu beobachten. Zudem liegen die ermittelten Grenzrollwinkel durchschnittlich höher als bei den Realfahrt-Messungen. Eine mögliche Erklärung ist die sehr gute Einsehbarkeit und Berechenbarkeit der Situation auf dem freien Messgelände im Vergleich zur Realfahrt.

Die in Kapitel 1.3.1 aufgestellten Forschungsfragen können nicht eindeutig innerhalb des Projektes beantwortet werden. Definitiv sind deutlich individuelle, fahrendenabhängige Unterschiede der Schräglagenschwelle zu beobachten. Jede/r Fahrende hat ein individuelles Schräglagenmaximum, was in keiner Situation überschritten wird. Es konnte innerhalb des Projektes keine situationsabhängige Veränderung der Schräglagenschwelle beobachtet werden. Alle Fahrenden erreichten auch nach einer Schrecksituation, wenn auch nach teils starken Eingriffen in das Fahrverhalten, wieder ihren persönlichen Grenzrollwinkel.

Eine erste Vermutung einer Art Schräglagenangst ist beim Vergleich der Rollraten zwischen Ein- und Ausfahren in die Kurve beobachtet worden. Dies ist jedoch auch wieder sehr fahrendenindividuell und bedarf weiterer Untersuchungen.

### 4.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend konnten durch die Versuche eine Eignung der Manöver zur Untersuchung von Schräglagenangst-Phänomenen bestätigt werden. Eine allgemein gültige Reaktion auf eine bestimmte Situation konnte nicht nachgewiesen werden. Die Reaktionen sind sehr individuell und abhängig von dem sonstigen Fahrstil.

Das Manöver „verdecktes Hindernis“ zeigte die stärksten Reaktionen bei den Fahrenden, da hier die Vorhersehbarkeit am geringsten ist. Hieraus ergibt sich die Empfehlung für weitere Untersuchungen der Schräglagenangst Versuchsaufbauten dieser Art zu nutzen. Eine mögliche Variation besteht hier zum Beispiel in der Wahl des Hindernisses oder einer Kombination mehrerer Hindernisse auf dem eigenen und fremden Fahrstreifen. Jedoch ist stets eine genaue Abwägung der Risiken vorab durchzuführen, da die Reaktionen unvorbereiteter Fahrender sehr variieren und wenig vorherberechenbar sind.

Im Rahmen der Fahrstudien in Würzburg und Dresden konnte aufgezeigt werden, dass sich im Alltag 75 % aller gefahrenen Schräglagen unter einem Schwellwert von 25° befinden. Hierbei weisen Fahrende mit höherer berichteter Schräglagenangst durchschnittlich geringere maximale Rollwinkel und Rollwinkelspektren auf. Weiterhin konnten erste alters- und fahrleistungsbedingte Abhängigkeiten der Schräglagen beobachtet werden, wobei diese jeweils durch eine größere und repräsentative Stichprobe zu überprüfen sind.

## 5 Fazit und Ausblick

Ziel des Projektes „Schräglagenangst“ war die Untersuchung der bereits durch SPIEGEL (2015) antizipierten und innerhalb des Projektes erarbeiteten Hypothese über die Existenz einer Schräglagenschwelle bei Motorradfahrern. Zur Untersuchung der Hypothese wurden als Schwerpunkte die Erfassung eines möglichst großen Fahrendenkollektivs und einhergehend die Untersuchung der Eignung entsprechender Messtechnikkonzepte hierfür sowie die Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung des Verhaltens von Motorradfahrenden in potenziell kritischen Situationen festgelegt.

Zur Untersuchung verschiedener Messtechnikkonzepte wurden diese nach Bild 2-2 hinsichtlich der zu

erwartenden Qualität und Quantität in die Kategorien „Versuchsgelände, Privatfahrzeug und Stationär“ unterteilt. Insbesondere in den Kategorien „Privatfahrzeug“ und „Stationär“ wurden innerhalb des Projektes neuartige Messtechnikkonzepte entwickelt und untersucht, die eine Erfassung eines großen Fahrendenkollektivs ermöglichen.

Für die Kategorie „Privatfahrzeug“ wurden handelsübliche Mittelklasse-Smartphones in Kombination mit einer stationären Postprocessing-Umgebung genutzt. In einem akzeptablen Fehlerbereich konnte eine Eignung zur Untersuchung gefahrenener Schräglagen nachgewiesen werden. Im Rahmen des Projektes wurde die Smartphone-App „Moto-Logger“ entwickelt, ausgezeichnet durch eine einfache und intuitive Bedienbarkeit. Durch eine automatisierte Koordinatentransformation werden keine besonderen Bedingungen an die Smartphone-Montage gestellt. Thermischer Überbeanspruchung der Smartphones muss mittels eines Sonnenschutzes und ausreichender Wärmeabfuhr vorgebeugt werden. Bei Fahrten über 4 Stunden Dauer ist eine externe Stromversorgung empfehlenswert. Durch die fortwährende Speicherung der Messdaten während der Aufzeichnung wird einem Datenverlust vorgebeugt. Die in MATLAB entwickelte Postprocessing-Umgebung ermöglicht zudem eine jederzeit einfach wiederholbare und anpassbare Auswertung der Rohdaten auf Knopfdruck. Die fehlende Rückmeldung der aktuellen Schräglagenwerte ist für eine großflächig über die führenden App-Stores vertriebene Forschungs-App zusammen mit weiteren Nutzer-Anreizen noch zu implementieren.

Im Bereich der stationären Messtechnik wurde eine besondere Eignung des Monokamera-Konzepts innerhalb des Projektes nachgewiesen. Der Vorteil aus den geringen Anschaffungskosten kombiniert mit einer Vielzahl von Messmöglichkeiten durch aktuelle Bilderkennungssoftware überwiegt die Nachteile der nicht direkten Messbarkeit fahrdynamischer Größen. Kameras können zudem unauffällig am Straßenrand platziert werden, was innerhalb der Vergleichsfahrten mit Versuchspersonen als wichtiges Kriterium erarbeitet wurde. Je auffälliger ein am Straßenrand positioniertes Messsystem ist, desto unwahrscheinlicher ist eine unverfälschte Messbarkeit vorbeifahrender Fahrzeuge. Für weitere Untersuchungen mit Monokamerasystemen ist die Nutzung von Kameratypen ohne Verzerrung aufgrund der Linsenform (kein fish-eye-Effekt) empfehlenswert. Die Erkennung der Nummernschildumrandung vorbeifahrender Fahrzeuge und an-

schließende Entfernung des Inhaltes sichert eine Datenschutz-konforme Umsetzbarkeit und bietet eine ausreichende Untersuchbarkeit der gefahrenen Schräglage. Zur Verringerung des Messfehlers ist eine Nutzung mehrerer Kameras empfehlenswert. Eine zusätzliche Nutzung des Stereokamera-Effektes für die Erkennung von Fahrzeugspur und Geschwindigkeit ist empfehlenswert, jedoch wird hierbei auf die Nutzung einer alternativen zu der im Projekt verwendeten Hardware mit verbesserter Bildqualität verwiesen. Zudem ist eine weitere Arbeit an der automatisierten Erkennung und Verfolgung typischer Punkte am Fahrzeug zu empfehlen. Eine alleinige Nutzung von Radar-Sensorik zur Messung vorbeifahrender Fahrzeuge wird nicht empfohlen, da bis auf den Vorteil der Nutzbarkeit des Doppler-Effektes keine weiteren Vorteile innerhalb des Projektes erarbeitet werden konnten. Besonders die automatisierte Verfolgung desselben Punktes am Fahrzeug während der Kurvenfahrt stellt eine Herausforderung dar und war mit der innerhalb des Projektes genutzten Sensorik nicht möglich. Somit ist auch keine Einschätzung der Verlässlichkeit der ermittelten Messwerte möglich. Das Konzept der Nutzung von Lidar-Sensorik wird aus technischer Sicht positiv, jedoch aus Kosten-Nutzen-Sicht sowie aufgrund der großen Datenmengen und den Einschränkungen bei der Positionierung der Sensorik als negativ bewertet. Auch wenn gute Ergebnisse bei der Erkennung fahrdynamischer Größen vorbeifahrender Motorräder im Versuch ermittelt werden konnten, erscheint ein Einsatz im realen Straßenverkehr über einen längeren Zeitraum als nicht sinnvoll.

Unabhängig von der Untersuchung geeigneter Messtechnikkonzepte wurden innerhalb des Projektes zwei Realfahrtstudien zur Untersuchung eines möglichst großen Fahrendenkollektivs durchgeführt. Insgesamt nahmen in Dresden 15 Fahrende und in Würzburg 23 Fahrende an der Fahrstudie teil. Aufgrund der geringen Stichprobenmenge gilt, dass die Studienergebnisse nur bedingt für eine übergeordnete Population aussagekräftig sind. Eine automatisierte Segmentierungsmethode zur vereinfachten Auswertung großer Datenmengen wurde entwickelt. Hierdurch ist ein Vergleich von Kennwerten einer großen Anzahl an Fahrenden und Kurven miteinander möglich.

Das Fahrendenkollektiv, das zur Durchführung der Studie zur Verfügung stand, repräsentiert größtenteils defensiv Fahrende. Kein Fahrender erlebte während der Kurvenfahrt ein Schleifen von Motor-

radanbauteilen auf dem Asphalt oder geriet in andere heikle Situationen. Die geometrisch/physikalisch bedingte Schräglagengrenze wurde somit bei keinem Fahrenden überschritten. Individuelle Schräglagenschwellen sind indes schwieriger zu bewerten. Allgemein wurde beobachtet, dass – für Links- und Rechtskurven einheitlich – mindestens 50 % aller beobachteten Rollwinkel unter  $15^\circ$  und mindestens 75 % aller beobachteten Rollwinkel unter  $25^\circ$  liegen. Rollwinkel über  $30^\circ$  konnten trotz ihrer dynamischen Unbedenklichkeit lediglich in 5 – 10 % der Stichprobe beobachtet werden. Einzelne Fahrende zeigten Auffälligkeiten bei der Auswertung ihrer gefahrenen Schräglagen und den abgegebenen Bewertungen ihrer Schräglagenangst oder des Risikopotenzials. Jedoch wurde insgesamt eine gute Korrelation zwischen höheren Angstbewertungen und niedrigeren Rollwinkelmaxima beobachtet. Der Erwartung widersprechend haben wenige Fahrende trotz einer erhöhten Schräglagenangst auch eine höhere Risikobereitschaft berichtet. Die durchschnittliche Risikobereitschaft über alle Fahrenden hinweg lag mit einem Wert von 2,5 genau in der Mitte des Antwortintervalls. Die Erkenntnisse aus der Untersuchung der Jahresfahrleistungen decken sich mit denen von WATANABE et al. (WATANABE & YOSHIDA, 1973) und CARTER et al. (CARTER, ROSE & PENTECOST, 2015), die den durchschnittlichen Rollwinkel für unerfahrene Fahrende (geringe Laufleistung) mit  $23^\circ$  und einem Spektrum von  $15^\circ$  bis  $25^\circ$  angeben. Weiterhin geben sie an, dass erfahrene Fahrende ein breiteres Spektrum abdecken sowie Maximalwerte von über  $40^\circ$  erreichen.

Wie bei der beschriebenen Realfahrtstudie ist auch die innerhalb des Projektes durchgeführte Untersuchung auf dem Messgelände in erster Linie als Pilotstudie für weitere Forschungsarbeit zu sehen. Die insgesamt 10 Fahrenden sind aufgrund der geringen Stichprobenmenge nicht statistisch belastbar zu interpretieren.

Die Untersuchungen auf dem Messgelände haben eine prinzipielle Eignung der erarbeiteten Methodik zur Durchführung und Bewertung pseudokritischer Manöver gezeigt. Jedoch sind auch Verbesserungsmöglichkeiten der entsprechenden Methodik zu Tage getreten. So befindet sich ein wenig dynamisches Manöver wie die Kurve mit geändertem Radius aufgrund der geringen Subjektivbewertung durch die Fahrenden häufig nicht mehr im Bereich der Pseudokritikalität. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass besonders Manöver mit einem verdeckten, plötzlich auftauchenden Hindernis die beste

Eignung zur Untersuchung von Fahrreaktionen aufweisen.

Im Gegensatz zu den Realfahrt-Untersuchungen ist bei der Ermittlung des Komfortbereichs auf dem Messgelände ein Unterschied zwischen der Richtung der Kurvendurchfahrt zu beobachten. Zudem liegen die ermittelten Grenzrollwinkel durchschnittlich höher als bei den Realfahrt-Messungen. Eine mögliche Erklärung ist die sehr gute Einsehbarkeit und Berechenbarkeit der Situation auf dem freien Messgelände im Vergleich zur Realfahrt.

Die aufgestellten Forschungsfragen können nicht eindeutig innerhalb des Projektes beantwortet werden. Definitiv sind deutlich individuelle, fahrendenabhängige Unterschiede der Schräglagenschwelle zu beobachten. Jeder Fahrende hat ein individuelles Schräglagenmaximum, was in keiner Situation überschritten wird. Es konnte innerhalb des Projektes keine situationsabhängige Veränderung der Schräglagenschwelle beobachtet werden. Alle Fahrenden erreichten auch nach einer Schrecksituation, wenn auch nach teils starken Eingriffen in das Fahrverhalten, wieder ihren persönlichen Grenzrollwinkel.

Eine erste Vermutung einer Art Schräglagenangst ist beim Vergleich der Rollraten zwischen Ein- und Ausfahren in die Kurve beobachtet worden. Dies ist jedoch auch wieder fahrendenindividuell und bedarf weiterer Untersuchungen.

Zusammenfassend kann die Hypothese der Existenz einer Schräglagenschwelle bestätigt werden, jedoch ist diese nicht, wie durch SPIEGEL (2015) vermutet, allgemein gültig und einem bestimmten Rollwinkelwert zuzuordnen. Vielmehr handelt es sich um eine persönliche und individuelle Schwelle, die jeder Fahrende aufgrund der eigenen Vorlieben und des eigenen Sicherheitsbewusstseins nicht überschreitet.

## Literatur

- BANET, A.; BELLET, T. (2008): Risk awareness and criticality assessment of driving situations: a comparative study between motorcyclists and car drivers, in: IET Intelligent Transport Systems (4), Jahrgang 2, S. 241
- BAUER, K.; PELDSCHUS, S. & SCHICK, S. (2014): Retrospektive Analyse toedlicher Motorradunfaelle und Ableitung von Schutzmassnahmen bei komplexen Bremsmanoevern. Forschungshefte Zweiradsicherheit, (16)
- BÄUMER, M.; HAUTZINGER, H.; PFEIFFER, M.; STOCK, W.; LENZ, B.; KUHNIMHOF, T. & KÖHLER, K. (2014): Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko
- BRÄUTIGAM, J.; HELLMANN, A. & SEINIGER, P. (2018): Aktive Motorradsicherheit durch Fahrerassistenz-Forschung der BAST. Forschungshefte Zweiradsicherheit, (18)
- CARTER, N.; ROSE, N. A. & PENTECOST, D. (2015): Validation of equations for motorcycle and rider lean on curve. SAE International Journal of Transportation Safety, 3(2), 126-135
- Continental Engineering Services GmbH: ARS 408 Long Range Radar Sensor Datenblatt, (2019)
- GeneSys Elektronik GmbH (2019): URL: <https://www.genesys-offenburg.de/produkte/adma-familie-gnssinertialsystem-automotivebahn/>
- GORGES, C.; ÖZTÜRK, K. & LIEBICH, R. (2018): Road classification for two-wheeled vehicles. Vehicle system dynamics, 56(8), 1289-1314
- HÄDRICH, C. (2012): Messung der Schräglage von Motorrädern bei Kurvendurchfahrt, Diplomarbeit, RHTW Aachen University, Aachen
- ORTLEPP, J. & BUTTERWEGGE, P. (2016): Unfalltypen-Katalog. Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltyps. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Berlin
- PRASCHL, M. (2000): Ride easy – Erhöhung der Sicherheit der Motorradfahrer in Niederösterreich Strategieentwicklung auf Basis der Motiv- & Argumentationsforschung. Wien/St.Pölten
- PROKOP, G. & KÖBE, M. (2017): Zur Bewertung sicherheitserhöhender Fahrfunktionen; 3. Interdisziplinärer Expertendialog Aktive Sicherheit und Automatisiertes Fahren, Essen
- SCHELEWSKY, M.; JONUSCHAT, H.; BOCK, B. & STEPHAN, K. (2014): Smartphones unterstützen die Mobilitätsforschung. Smartphones unterstützen die Mobilitätsforschung-Neue Einblicke in das Mobilverhalten durch Wege-Tracking
- SCHREER, O. (2005): Stereoanalyse und Bildsynthese. Springer-Verlag

- SCHWIFCZ, M. (2018). Motorradunfälle – Ursachen und Mögliche Lösungsansätze
- SCHLIPSING, M.; SALMEN, J.; LATTKE, B.; SCHRÖTER, K. G. & WINNER, H. (2012): Roll angle estimation for motorcycles: Comparing video and inertial sensor approaches. In 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (pp. 500-505). IEEE
- SPIEGEL, B. (2015): Die obere Hälfte des Motorrads. Motorbuch-Verlag, Stuttgart
- Statistisches Bundesamt, Destatis (2019): Verkehrsunfälle. Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr 2018
- Stereolabs. URL: <https://cdn.stereolabs.com/assets/datasheets/zed-camera-datasheet.pdf>
- Velodyne. URL: <https://velodynelidar.com/products/ultra-puck/>
- WATANABE, Y. & YOSHIDA, K. (1973): Motorcycle handling performance for obstacle avoidance (No. Paper# 73033 Proceeding)
- WEIDELE, A. (2018): Skriptum Motorradtechnik
- WINKELBAUER, M. (2014): Riding left hand corners: Facts and measures. Forschungshefte Zweiradsicherheit, (16)
- WINKELBAUER, M.; SOTEROPOULOS, A.; TOMASCH, E. (2017): Unfallursachen bei Motorradunfällen, KfV – Sicher leben. Band #4, Wien
- Bild 1-6: g-g Diagramme zweier Motorradfahrer (BIRAL, 2010)
- Bild 1-7: Von durchschnittlichen Fahrenden ausgenutzter Bereich des Kamm'schen Kreises
- Bild 1-8: Bildfolge Schräglagenangst
- Bild 2-1: Datengrundlagen und Untersuchungsmethoden nach Granularität im Verkehr und zeitlichem Ablauf (PROKOP, 2017)
- Bild 2-2: Datenqualität unterschiedlicher Messmethoden (qualitative Darstellung)
- Bild 2-3: Erfassung des Fahrentyps
- Bild 2-4: Subjektivbewertungen des Probandenpanels
- Bild 2-5: Likert-Skala und Skala zur Auswertung der Kritikalität
- Bild 2-6: Alleinunfälle nach SCHWIFCZ (2018)
- Bild 2-7: Einflussfaktoren, die zu potenziell kritischen Situationen führen können
- Bild 3-1: Messtrecken und deren Höhenverläufe (Kartenmaterial ©OpenStreetMap contributors)
- Bild 3-2: Automatisiert erfasste Kurvensegmente
- Bild 3-3: Häufigkeitsverteilung der minimalen Kurvenkrümmungen beider Messtrecken, links Würzburg, rechts Dresden
- Bild 3-4: Messmotorrad Honda NC 700X
- Bild 3-5: Messmotorrad KTM Duke 790 des WIVW
- Bild 3-6: Aufbau der Messtechnik am Messmotorrad des WIVW
- Bild 3-7: Messaufbau BMW R1200 GS für Vergleichs-/Validierungsmessungen
- Bild 3-8: Ausschnitt Ergebnisdatensatz berechneter Smartphone-Rollwinkel (aus Kreuzvalidierung)
- Bild 3-9: Beispielhafte Darstellung einer Rohdaten Lidar Aufnahme eines vorbeifahrenden Motorrades (roter Kreis)
- Bild 3-10: Ausschnitt Vergleichsmessungen ADMA Monokamera, Rollwinkelverlauf

## Bilder

- Bild 1-1: Rollwinkel und Kräftegleichgewicht während stationärer Kurvenfahrt
- Bild 1-2: Zusammenhang zwischen theoretischem Rollwinkel und Zusatzrollwinkel (nach WEIDELE, 2018)
- Bild 1-3: Beispielhafte Darstellung eines Kamm'schen Kreises
- Bild 1-4: Verschiedene Fahrstile: lean in, lean out und lean with
- Bild 1-5: Motorradunfälle, gegliedert nach Unfallsituation, Statistisches Bundesamt (2019), S. 38

Bild 4-1: Beobachtete Schräglagenmaxima in Links- und Rechtskurven

Bild 4-2: Verteilung der beobachteten Rollwinkelmaxima

Bild 4-3: Scatterhistogramm der gefahrenen Rollwinkelmaxima und Scheitelpunktgeschwindigkeiten

Bild 4-4: Leistungsabnahme durch schlechte Wetterbedingungen bei unterschiedlichen Angstbewertungen

Bild 4-5: Rollwinkelmaxima in Abhängigkeit zur subjektiven Angstbewertung

Bild 4-6: Rollratenmaxima in Abhängigkeit zur subjektiven Angstbewertung

Bild 4-7: Kumulierte Häufigkeit des RMS der Rollwinkelabweichung

Bild 4-8: Rollwinkelmaxima in Abhängigkeit zum Alter

Bild 4-9: Rollwinkelmaxima in Abhängigkeit zur Jahreslaufleistung

Bild 4-10: Ermittlung des Komfortbereichs über die maximalen Rollwinkel in Links- und Rechtskurven

Bild 4-11: Kritikalitätsbewertung pseudokritisches Manöver Vorplatz, Proband 4

Bild 4-12: Kritikalitätsbewertung pseudokritisches Manöver Vorplatz, Proband 8

Bild 4-13: Kritikalitätsbewertung Proband 4, verdecktes Hindernis

Bild 4-14: Vergleich maximaler Rollwinkel und maximales Lenkmoment, verdeckte Kurve

Bild 4-15: Vergleich maximaler Rollwinkel und maximales Lenkmoment, verdeckte Kurve

Bild 4-16: CDF-Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 8

Bild 4-17: CDF-Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 4

Bild 4-18: Rollrate über Rollwinkel, verdecktes Hindernis, Proband 4

Bild 4-19: Rollrate über Rollwinkel, verdecktes Hindernis, Proband 8

Bild 4-20: Rollrate über Rollwinkel, verdecktes Hindernis, Proband 1

Bild 4-21: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 9

Bild 4-22: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 2

Bild 4-23: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 3

Bild 4-24: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 5

Bild 4-25: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 6

Bild 4-26: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 10

Bild 4-27: Rollrate über Rollwinkel, Manöver verdecktes Hindernis, Proband 7

## Tabellen

Tab. 3-1: Übersicht der Probanden der Dresdner Fahrstudie

Tab. 3-2: Übersicht der Probanden der Würzburger Fahrstudie

Tab. 3-3: Übersicht der Probanden der Darmstädter Fahrstudie

Tab. 3-4: Einzelschritte des Smartphone-Postprocessings

Tab. 4-1: Kennwerte von Kurvensegmenten

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

#### 2014

**F 93: Entwicklung eines Verfahrens zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung beim Motorradfahren**  
Buld, Will, Kaussner, Krüger € 17,50

**F 94: Biokraftstoffe – Fahrzeugtechnische Voraussetzungen und Emissionen**  
Pellmann, Schmidt, Eckhardt, Wagner € 19,50

**F 95: Taxonomie von Fehlhandlungen bei der Fahrzeugführung**  
Oehme, Kolrep, Person, Byl € 16,50

**F 96: Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von Pkw**  
Schönemann, Henze € 15,50

**F 97: Matrix von Lösungsvarianten Intelligenter Verkehrssysteme (IVS) im Straßenverkehr Matrix of alternative implementation approaches of Intelligent Transport Systems (ITS) in road traffic**  
Lotz, Herb, Schindhelm, Vierkötter  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 98: Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung**  
Weitzel, Winner, Peng, Geyer, Lotz Sefati € 16,50

**F 99: Study on smoke production, development and toxicity in bus fires**  
Hofmann, Dülsen € 16,50

#### 2015

**F 100: Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver**  
Powelleit, Muhrer, Vollrath, Henze, Liesner, Pawellek € 17,50

**F 101: Altersabhängige Anpassung von Menschmodellen für die passive Fahrzeugsicherheit**  
Wagner, Segura, Mühlbauer, Fuchs, Peldschus, Freßmann € 19,00

**F 102: 6th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“**  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 103: Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Nutzfahrzeugen**  
Süßmann, Lienkamp  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 104: Abbiege-Assistenzsystem für Lkw – Grundlagen eines Testverfahrens**  
Schreck, Seiniger € 14,50

**F 105: Abgasverhalten von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Feldüberwachung**  
Schmidt, Georges € 14,50

**F 105b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – In-service conformity**  
Schmidt, Johannsen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 106: Untersuchung des Abgasverhaltens von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Austauschkatalsatoren**  
Schmidt, Johannsen € 13,50

**F 106b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – Replacement catalytic converters**  
Schmidt, Johannsen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 107: Sicherheitsaspekte beim Laden von Elektrofahrzeugen**  
Vogt, Link, Ritzinger, Ablingyte, Reindl € 16,50

**F 108: Interoperabilität zwischen öffentlichem Verkehrsmanagement und individuellen Navigationsdiensten – Maßnahmen zur Gewährleistung**  
von der Ruhren, Kirschfink, Ansorge, Reusswig, Riegelhuth, Karina-Wedrich, Schopf, Sparmann, Wöbbeking, Kannenberg € 17,50

**F 109: Ermittlung des Umfangs von Abweichungen bei Durchführung der Abgasuntersuchung zwischen Messung am Auspuff und Abfrage des On-Board-Diagnosesystems**  
Schröder, Steickert, Walther, Ranftl  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 110: Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen**  
Altinsoy, Landgraf, Rosenkranz, Lachmann, Hagen, Schulze, Schlag  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 111: Geräuschminderung von Dünnschichtbelägen**  
Schulze, Kluth, Ruhnau, Hübel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 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, Schmeiler  
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: Motorradshutzhelme – 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 Elektrokleinfahrzeugen

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, Kaussner, 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, Heintl, 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, Zwickel, Schade, Petzold € 16,50

### F 139: Einfluss von Notbremsystemen 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, Stanglmaier, Bäumlner, Siebke, Prokop € 14,50

---

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.