

# Reibwertprognose als Assistenzsystem

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 140

**bast**

# Reibwertprognose als Assistenzsystem

von

Claudia Leschik  
Nicolas Sieron  
Vincent Gregull  
Gerd Müller

Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Kraftfahrzeuge

Anna Trapp  
Stefan Brandenburg

Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Kognitionspsychologie & Kognitive Ergonomie

Diederik Haalman  
Eric Terpstra

METEO SERVICE weather research GmbH  
Teltow

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Fahrzeugtechnik Heft F 140**

**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 82.0691**  
Reibwertprognose als Assistenzsystem

**Fachbetreuung**  
Adrian Hellmann

**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 978-3-95606-587-3

Bergisch Gladbach, Juni 2021

## Kurzfassung – Abstract

### Reibwertprognose als Assistenzsystem

Die Abschätzung des Reibwertpotentials ist aus fahrdynamischer Sicht von großer Bedeutung. Sowohl fahrzeugseitige Systeme als auch der Fahrer selbst können von einer verlässlichen Information über das derzeitige Gripniveau erheblich profitieren. Dazu wurde im Rahmen einer umfassenden Probandenstudie untersucht, inwiefern eine Information über den aktuellen Reibwert die Fahrweise beeinflusst und möglicherweise einen Sicherheitsgewinn darstellt. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass diejenigen Fahrer, die über eine Reibwertinformation verfügen ihre Fahrgeschwindigkeit und den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug signifikant besser an feuchte und nasse Straßenzustände anpassen, als jene Fahrer, die über keine entsprechende Information verfügen.

Darüber hinaus wurde ein mathematisches Modell entwickelt, welches basierend auf früheren Forschungsarbeiten die Schätzung des Reibwerts insgesamt verbessert. Dabei wurde versucht insbesondere lokale Effekte wie beispielsweise die Vegetation und die Bebauung am Straßenrand sowie Brücken und Tunnel zu berücksichtigen. Die Ergebnisse dieser Rechnungen zeigen, dass eine relativ hohe Genauigkeit bei der Reibwertschätzung erreicht werden kann.

In ergänzenden Detailstudien wurde untersucht, welchen Einfluss die Abschattung durch Bäume einerseits und die Wärmeabstrahlung durch Häuser andererseits auf die Straßenoberflächentemperatur haben. Diese beeinflussen dann wiederum unmittelbar den Reibwert.

### Friction estimation as an advanced driver assistance system

The estimation of the friction potential is of great importance for driving dynamics. On board systems as well as the driver himself can benefit from reliable information on the current grip level significantly. As part of a comprehensive volunteer study, it was examined whether information about the current coefficient of friction influences the driving style and possibly results in a safety benefit. The results of this study show that those drivers who have a friction information adjust their driving speed and the distance to the vehicle in front significantly better to moist and wet road conditions, as the drivers without such information.

In addition, a mathematical model, based on previous research work, has been developed, which improves the estimation of the coefficient of friction. Attempts were made to take local effects such as vegetation and roadside buildings as well as bridges and tunnels into account. The results of these calculations show that a relatively high accuracy in the friction coefficient estimation can be achieved.

Furthermore, the influence of shadow caused by trees on the one hand and the heat emission caused by buildings on the other hand was investigated in detail. These effects directly influence the coefficient of friction.

## Summary

### Friction estimation as an advanced driver assistance system

The reliable and accurate knowledge of the friction potential can improve the safe longitudinal and lateral guidance of a vehicle significantly. For future generations of vehicles, which are likely to be at least partially automated, this knowledge is absolutely necessary. But even today it seems conceivable that the knowledge about the grip level also brings a safety gain for the driver himself. Therefore, the benefit that car drivers can actually receive from such a coefficient of friction was investigated in a pilot study in a driving simulator as part of this research work.

In the second work package the actual friction value estimation was in focus. While a concrete estimated coefficient of friction can be assumed to be given for the simulator study, in reality the question arises how an accurate estimation of the grip level can be achieved. While various preliminary studies have shown that a basic estimation with a sufficiently high accuracy is possible, it should be investigated in depth how the consideration of local factors such as vegetation at the roadside, the buildings near to the road, bridges and tunnels, etc., influences the coefficient of friction in detail. For this purpose, a mathematical model was developed, which attempts to take these influences into account and to incorporate them into an estimation of the friction coefficient.

### Influencing the driving behaviour by friction coefficient information

New in-vehicle information systems can influence driver behaviour in various ways. Drivers might use the additional source of information to drive more carefully in critical driving situations. However, literature suggests that new in-vehicle information systems can also lead to less careful driving behaviours because drivers might use the information to approach system limits. The current study examines the effects of a friction coefficient display on driver behaviour regarding the number of accidents, their choice of speed and their distance to a lead vehicle. It also assesses drivers' judgment of the criticality of the driving situation and their subjective evaluation of the display using a tech-

nology acceptance questionnaire and an interview.

A simulator study was set up using a fixed-base driving simulator. 36 participants drove a rural road with curves and straight road sections. During the study, the coefficient of friction changed multiple times because of rain of various intensities. The friction coefficient display was presented to one-half of the drivers. The other half completed the same drive without the display.

The results of the study showed that the friction coefficient display did not affect the drivers' rate of accidents. However, it affected their speed behaviour across driving situations with rain of various intensities in a positive way. Drivers slowed down more quickly and more intensely when the friction coefficient display was present. Yet, they did not increase their distance to a lead vehicle dependent on the weather condition. Exclusively during the last trial, they showed an increase of the distance due to the display, but only to the level of distance drivers without the display had chosen.

The analysis of the subjective data revealed that the display was rated positively regarding its utility and driver satisfaction. Drivers stated that the display is useful and that they value its simple design. However, drivers also said that they did not change their driving behaviour based on the friction coefficient display.

To conclude, the results of the study imply that the friction coefficient display increases driving safety. Drivers reduce their driving speed and increase partly their distance to a lead vehicle when the friction coefficient display is present. However, the results regarding the choice of distance indicate that drivers use the gain of safety due to the display to show more risky behaviour. In addition, their subjective evaluation of the display was positive although drivers stated that they did not use it actively. Future studies should examine this discrepancy.

### Development of an interlayer prediction model

A model was developed to forecast water on the road between the surface and the tiers of a car, the so-called intermediate layer. The amount of water was calculated from precipitation, seepage, condensation and evaporation. The following data was used for the model:

- 
- Visual categorization of the intermediate layer by the driver
  - Precipitation amount derived from a radar observation
  - Dew point temperature from a nearby weather station
  - Road surface temperature
  - Activity of the windshield wipers

was still between 0.5 and 1.0 °C difference. From the measurements we learn that buildings can influence the surface temperatures of surrounding roads by several degrees through shading and heat radiation.

The road surface temperature was measured using a street weather information sensor named MARWIS. In a future operational system this should be replaced with a forecast.

The reflectivity values of the radar image were converted to precipitation amounts and interpolated to the exact location of the measurements. Based on this, five binary predictors were defined for various time windows and precipitation amounts. The forecast of the intermediate layer was optimized using logistic regression and a simple decision tree. The predictors derived from radar observations are of mayor importance. Using a False-Alarm-Rate of 13%, a wet road is detected in 82% and a dry road in 96% of the cases. In two-thirds of the cases a dry road can be forecasted with a high probability of 99.6%. If the radar data is not used, only half the cases can be forecasted with 99.6% probability.

Case studies were used to investigate the influence of radiation from buildings and heat storage in the ground on the road surface temperature. South of the Berlin central station you will find 30-meter-high buildings that are surrounded by streets on all sides. Here the road surface temperature was measured at 4 UTC in the morning with values between 3 and 7.5 °C. These values were used to calculate a model of the road surface temperatures with an average absolute error of 0.4 °C. Please note that this model is valid only for the given measurements. In two locations a temperature profile was measured for a cross section of the road and pavement. On average the temperatures were falling with 0.3 °C per Meter before sunrise and 0.5 °C per Meter after sunrise, relative to the position of adjacent buildings. On the road named "Straße des 17. Juni", which has trees on both sides, the surface temperatures were measured. During the day the shade of the trees caused a difference of between 2 and 3 °C between the south lane and the most northern lane. In the early morning hours before sunrise, there



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	9	3.1.2	Vorangegangenes Teilprojekt – FU Berlin .....	26
<b>2</b>	<b>Beeinflussung des Fahrverhaltens durch Reibwertinformationen</b> .....	10	3.2	Datenerhebung und -aufbereitung . . . .	27
2.1	Methode .....	11	3.2.1	Beschreibung der Messstrecke .....	28
2.1.1	Versuchspersonen .....	11	3.2.2	Daten der Bremsmanöver .....	28
2.1.2	Simulationsumgebung .....	11	3.2.3	Kontinuierlich aufgezeichnete Mess- daten während der Messfahrten. ....	28
2.1.3	Experimentelles Design und Operationalisierung .....	13	3.2.4	Skyview .....	29
2.1.4	Prozedur. ....	13	3.3	Entwicklung des Zwischenschicht- modells. ....	31
2.1.5	Hypothesen und Analysestrategie . . . .	15	3.3.1	Meteorologie der Straße. ....	32
2.2	Ergebnisse .....	16	3.3.2	Datenvorbereitung .....	32
2.2.1	H1: Effekte der Reibwertanzeige auf die Unfallhäufigkeit. ....	16	3.3.3	Modell MS_MO. ....	34
2.2.2	H2: Effekte der Reibwertanzeige und der Wetterbedingung auf das Fahrverhalten. ....	16	3.3.4	Optimierte Modell MS_MO. ....	35
2.2.3	H3: Effekte der Reibwertanzeige auf die subjektive Kritikalität. ....	21	3.3.5	Validierung .....	36
2.2.4	Explorative Analysen .....	22	3.3.6	Schlussfolgerung Modell MS_MO . . . .	38
2.3	Diskussion .....	23	3.4	Fallstudien .....	38
2.3.1	Diskussion der Effekte der Reibwert- anzeige und des Fahrbahnzustandes auf die abhängigen Variablen Abstand und Geschwindigkeit auf den Ab- schnitten T1-T3 .....	23	3.4.1	Einfluss der Wärmestrahlung von Gebäuden auf die Straßenober- flächentemperatur .....	38
2.3.2	Diskussion der Effekte der Reibwert- anzeige auf die abhängigen Variablen Geschwindigkeit, Abstand und THW auf dem Abschnitt T4 .....	24	3.4.2	Wärmespeicher im Straßen- unterbau .....	39
2.3.3	Diskussion der Ergebnisse zur Bewertung der Reibwertanzeige .....	24	3.4.3	Empirisches Modell zur Abschät- zung des Einflusses von Gebäuden und Unterbau auf die Straßenober- flächentemperatur .....	39
2.3.4	Limitationen .....	24	3.4.4	Straßenquerschnitte .....	40
2.3.5	Ausblick .....	25	3.4.5	Schlussfolgerung der Fallstudien . . . .	42
<b>3</b>	<b>Entwicklung eines Modells zur Zwischenschichtschätzung</b> .....	25	3.5	Zusammenfassung. ....	42
3.1	Vorarbeiten. ....	26	<b>4</b>	<b>Fazit und Ausblick</b> .....	43
3.1.1	Wettermodell am Beispiel Deutscher Wetterdienst .....	26	<b>Literatur</b> .....	45	
			<b>Bilder</b> .....	47	
			<b>Tabellen</b> .....	49	
			<b>Anhang</b> .....	50	



## 1 Einleitung

Die Thematik, das Reibwertpotenzial auf Fahrbahnen abzuschätzen, wird in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten und industriellen Projekten behandelt und diskutiert. Im Allgemeinen können die Ansätze in zwei Methoden unterteilt werden. Die ursachenbasierten Ansätze messen die Parameter, die den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn verändern bzw. beeinflussen. Anhand dieser zeitweise konstanten und kontinuierlich verändernden Parameter wird das aktuelle Reibwertpotenzial abgeschätzt. Als Grundlage für eine genaue Schätzung dienen hier Erfahrungswerte vergangener Messungen oder auch Reibwertmodelle. Die effektbasierten Ansätze hingegen messen die Effekte, die während der Lenkzeit durch Reibung auftreten. Anhand dieser Daten werden die aktuellen Reibwertgrenzen extrapoliert.

Die gesamte Thematik der Reibwertschätzung erfährt eine steigende Aufmerksamkeit, was sich auch durch die Vielzahl von Veröffentlichungen zu diesem Thema in den letzten Jahren zeigt. In den folgenden Abschnitten wird etwas detaillierter auf die Grundideen der beiden Ansätze eingegangen, so wie deren Vor- und Nachteile diskutiert.

### Ursachenbasierte Schätzverfahren

In [BACHMANN, 1998] wird die Klassifikation der Einflussparameter, die eine Veränderung des maximalen Reibwertes  $\mu_{\max}$  verursachen, dargestellt. Hierzu gehören zum Beispiel Fahrzeugparameter, wie Geschwindigkeit, Sturzwinkel und Reifenlast. Als Reifenparameter werden u. a. das Reifenmaterial, der Reifentyp, die Profiltiefe und der Reifenfülldruck klassifiziert.

Zu den allgemeinen Straßenparametern gehören die unterschiedlichen Straßentypen (Asphalt, Beton, Kopfsteinpflaster) und ihre jeweiligen Oberflächeneigenschaften. Je nach Straßentyp besitzt eine Fahrbahn unterschiedliche Mikro- und Makrorauheiten und damit zusammenhängend ein anderes Drainage-Verhalten. Einige dieser Parameter, wie die Fahrzeuggeschwindigkeit und der Reifentyp, lassen sich relativ einfach bestimmen. Andere Parameter wiederum, wie zum Beispiel der Zustand der Straßenoberfläche oder andere Oberflächenbedingungen, müssen aufwendig über externe Sensoren gemessen und verarbeitet werden. Optisch messende Sensoren, wie in [BREUER, 1992] und [EICHHORN, 1992] beschrieben, können zum Bei-

spiel Wasserfilmdicken und das Vorhandensein anderer Zwischenschichtarten bestimmen. Hierfür senden die Sensoren Lichtimpulse aus und analysieren das von der Straßenoberfläche gestreute und oder teilabsorbierte zurückreflektierte Licht. Aktuelle Sensoren, wie der Marwis UMB-Mobile Sensor der Firma Lufft und der Vaisala DSP211, liefern eine Vielzahl an gemessenen Parametern. Darunter gehören u. a. die Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Oberflächentemperatur und ebenso Fahrbahneigenschaften, wie Wasserfilmdicke und Eisgehalt auf der Fahrbahn. Jedoch sind beide Sensoren zu teuer und zu groß, um sie in aktuellen Serienfahrzeugen zu integrieren.

Sind für den ursachenbasierten Ansatz, die einflussreichsten Variablen des Reibwertes bekannt, können diese in eine Methode zur Reibwertabschätzung übergeben werden. In der Literatur finden sich einige Methoden, die auf die Grundideen von Neuronalen Netzen und anderen selbstlernenden Algorithmen zurückgreifen [PASTERKAMP1, 1997]; [PASTERKAMP2, 1997]; [HALGAMUGE, 1993].

In [EICHHORN, 1992] wird eine Methode beschrieben, die Daten aus Feuchtigkeits- und Oberflächenrauheitssensoren in einer Kombination aus Interpolation, assoziativen Speicher und Techniken der Systemidentifikation verarbeitet, um Aussagen über das aktuelle Reibwertpotenzial zu liefern. Diese Methode führt zu einer Genauigkeit, in der der berechnete und tatsächliche Reibwert ( $\mu_{\max}$ -Wert) um einen maximalen Wert von 0,1 voneinander abweichen. Dies gelang in 92 % der analysierten Fälle.

Der Hauptvorteil des ursachenbasierten Ansatzes ist, dass diese Methode unabhängig vom aktuellen Fahrzustand (z. B. Schlupf) ist. Es ist dadurch möglich eine Reibwertschätzung auch für Bereiche vor dem Fahrzeug zu treffen. Zu den wesentlichen Nachteilen gehören, dass in der Regel zusätzliche Sensorik und ein intensives Anlernen der Algorithmen notwendig ist, um genaue Ergebnisse zu erhalten.

### Effektbasierte Schätzverfahren

Beim effektbasierten Ansatz werden Effekte gemessen, die während der Fahrt durch Reibung zwischen Fahrbahn und Reifen auftreten. Eine Möglichkeit dabei ist, mithilfe von Akustikmessungen, Informationen zu erhalten und dadurch Rückschlüsse auf den  $\mu_{\max}$ -Wert zu ziehen. Hierfür wird ein Mikrofon am Fahrzeug installiert, welches die Abrollgeräu-

sche der Reifen erfasst. Die Geräusche können Hinweise über Laufflächenverformungen der Reifen, aktuelle Oberflächenbedingungen (nass, trocken etc.) sowie die Straße und den Straßentyp (Asphalt, Kopfsteinpflaster etc.) liefern. In [BREUER, 1992] wird so ein Verfahren beschrieben und in [EICHHORN, 1992] ebenso erläutert, dass eine Schätzung des  $\mu_{\max}$ -Wertes aufgrund der Komplexität der Reifengeräusche eher schwierig ist.

Ein weiteres Verfahren des effektbasierten Ansatzes ist es, Reifenlaufflächenverformung bzw. Profilverformung im rotierenden Reifen zu messen und zu analysieren. Diese Methode nutzt Sensoren, die in die Lauffläche der Reifen eingebettet werden. Ein Beispiel dafür ist der Darmstädter Reifensensor. Über die gemessene Profilverformung ermittelt dieser eine Vielzahl an dynamischen Größen, wie zum Beispiel Radlasten, Antriebs-, Brems- und Seitenkräfte. Auch Informationen über den aktuellen Reibwert und dessen Ausnutzung können über diesen Sensor kabellos an Steuergeräte übermittelt werden. In [BREUER, 1992], [EICHHORN, 1992], [BACHMANN, 1995], [BREUER, 2000] und [BECHERER, 2000] werden solche Sensoren beschrieben und deren experimentelle Ergebnisse der Reibwertabschätzung vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen u. a. die hohe Messgenauigkeit der Sensorik. Diese erfasst auch bei einem Reifenschlupf von nahezu 0 % minimalste Reifenverformungen durch kleinste Teilstücke/Teilbereiche der Straße. Damit gehört diese Methode zu den vielversprechendsten Ansätzen. Für den Serieneinsatz benötigt diese allerdings eine stabile kabellose Datenverbindung zum Fahrzeug und eine ebenfalls kabellose Energieversorgung.

Ein weiterer Ansatz, der ohne weitere Zusatztechnik auskommt, nutzt Messungen aus Brems- und Lenkmanövern. Hierbei werden der Reibungskoeffizient und das Schlupfverhältnis identifiziert und genutzt um auf den maximalen Reibwert zu schließen. Einige Beispiele sind in [DIECKMANN, 1992], [GUSTAFSSON, 1997], [KIENCKE, 1994], [MÜLLER, 2001] und [LEX, 2015] nachzulesen. Die Grundidee ist hierbei durch niedrige  $\mu$ -Messwerte anhand des Verlaufs der  $\mu$ -Kurve (Reibwert über Schlupf) auf den tatsächlichen Wert zu schätzen. Um allerdings halbwegs genaue Schätzwerte zu erhalten, ist es notwendig Messdaten zu verwenden, die relativ nah am tatsächlichen Wert liegen. Da der Normalfahrer in der Regel selten in Bereiche mit hohen Reibungskoeffizienten kommt, sind die Ergebnisse oft nicht ausreichend.

## Gesamtziel

Das Gesamtziel des Projektes ist es einerseits den möglichen Nutzen von Echtzeitreibwertschätzungen zu bewerten. Dazu werden in einer Simulatorstudie verschiedene, möglichst realistische Szenarien abgebildet, bei denen Probanden auf einzelne Fahraufgaben zu bewältigen haben. Dabei wird untersucht, inwiefern sie sich dabei von geschätzten Reibwerten beeinflussen lassen und welchen Effekt das auf die Fahrsicherheit hat.

Andererseits werden die bisher entwickelten Methoden zur Reibwertschätzung verbessert. Dazu wird ein kleinskaliges Wettermodell erarbeitet, welches lokale Effekte, die den Reibwert beeinflussen, berücksichtigen soll. Dazu zählen Abschattungen durch Gebäude und Bewuchs genauso wie Senken oder Brücken, an denen durch lokale Luftfeuchtigkeits- und Windeinflüsse der Reibwert von dem seiner unmittelbaren Umgebung abweichen kann. Weiterhin wird das entwickelte Wettermodell Daten zur Wetterhistorie berücksichtigen. Hat es beispielsweise in den letzten Stunden geregnet oder war die Luftfeuchtigkeit sehr hoch, so hat das unmittelbaren Einfluss auf den aktuellen Zustand der Zwischenschicht. Gleiches gilt für starken Wind oder hohe Temperaturen.

In den folgenden Kapiteln wird der Projektstand der beiden Arbeitspakete „Fahrerinformation“ und „Zwischenschichtkarte“ dargestellt und zusammengefasst.

## 2 Beeinflussung des Fahrverhaltens durch Reibwertinformationen

Neue Unterstützungssysteme lösen häufig Verhaltensänderungen bei den Führern von Fahrzeugen aus. [VAN NES, 2010] zeigten beispielsweise, dass eine dynamische Anzeige der Höchstgeschwindigkeit zu einer homogeneren Geschwindigkeitswahl bezüglich der auf einem Straßenabschnitt gültigen Höchstgeschwindigkeit führt. Dadurch entsteht ein Zugewinn an Sicherheit. Neben positiven Effekten von Fahrerassistenzsystemen sind jedoch auch negative Effekte bekannt. Nach der Einführung des Antiblockiersystems (ABS) blieb der erwartete Rückgang von Unfällen aus. Der durch das System entstandene Sicherheitsgewinn wurde durch riskantere Fahrmanöver kompensiert [ASCHEN-

BRENNER, 1992]. Neue Technologien können also das Fahrverhalten positiv beeinflussen, aber „[...] ungünstige Verhaltensänderungen sind zu erwarten, wenn Fahrzeugführer durch die Maßnahme einen erweiterten Handlungsspielraum wahrnehmen und wenn es ihnen nützlich erscheint, diesen auszufüllen“ [SCHLAG, 2006, S. 38].

Die vorliegende Studie stellt sich daher die folgenden Forschungsfragen:

- Welches Verhalten wird durch die Reibwertprognose bzw. -anzeige ausgelöst?
- Bewirkt die Anzeige der Information zum aktuellen Reibwert, dass Fahrer ihr Verhalten (Geschwindigkeit und Abstand) an den Zustand der Fahrbahn anpassen?
- Wie schätzen Fahrer die Kritikalität der Fahrsituation in Abhängigkeit von den Wetterbedingungen und dem Vorhandensein bzw. Fehlen der Reibwertinformation ein?
- Wie fallen Fahrerbewertungen einer derartigen Anzeige bezüglich Akzeptanz, Nützlichkeit und Verständlichkeit aus?

## 2.1 Methode

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurde eine Studie im fixed-base Fahrsimulator des Fachgebiets Kraftfahrzeuge der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Eine Studie zum Reibwert im Simulator durchzuführen, ist mit einigen Herausforderungen verbunden. Der Reibwert kann beispielsweise nicht für die Probanden direkt sichtbar manipuliert werden. Vielmehr müssen in einer spezifischen Fahrsituation Gegebenheiten geschaffen werden, aus denen die Fahrer auf den aktuellen Reibwert schließen können. Hierfür eignen sich u. a. die Charakteristika der Fahrstrecke (z. B. Kurvigkeit) und die Glattheit der Straße, die z. B. durch ihren Feuchtigkeitsgrad manipuliert werden kann. Daher wurde für das vorliegende Experiment eine kurvige Landstraße mit verschiedenen Wetterbedingungen im Simulator verwendet.

### 2.1.1 Versuchspersonen

Insgesamt nahmen  $n = 36$  Versuchspersonen an der Untersuchung teil (17 weiblich, 19 männlich). Diese Stichprobengröße wurde aufgrund einer

a priori Poweranalyse (Power  $1-\beta = 80\%$ , Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 5\%$ , mittelgroße Effektstärke) und unter Berücksichtigung der Ausgeglichenheit des Versuchsdesigns festgelegt. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug  $M = 27$  Jahre ( $SD = 6$  Jahre) und die Altersspannweite reichte von 18 bis 45 Jahren. Im Mittel waren die Probanden seit 8 Jahren ( $SD = 6$  Jahre) im Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis. Ihre wöchentliche Fahrpraxis betrug durchschnittlich 1,9 Tage ( $SD = 1,5$  Tage). Keine der Versuchspersonen wies fahrrelevante Einschränkungen auf. Die Probanden erhielten für ihre Teilnahme wahlweise vier Euro oder eine halbe Versuchspersonenstunde pro angefangener halben Stunde als Aufwandsentschädigung. Die Ethikkommission des Instituts für Psychologie und Arbeitswissenschaft (IPA) der TU Berlin begutachtete die Studie und beurteilte sie als positiv bezüglich Forschungsvorhaben, Versuchsmaterialien, Umgang mit Daten, Information der Teilnehmenden etc. Die Stellungnahme der Kommission ist im Anhang in Bild A-1 einzusehen.

### 2.1.2 Simulationsumgebung

Der Versuch wurde im statischen Fahrsimulator des Fachgebiets Kraftfahrzeuge der TU Berlin durchgeführt. Dieser Fahrsimulator besteht aus einem realen Fahrzeug als Mock-Up, einer echtzeitfähigen Fahrdynamiksimulation und einer Visualisierungssoftware für den Entwurf der Szenarien und zur Erzeugung der eigentlichen Fahrbilder (Bild 2-1).

Darüber hinaus beinhaltet er ein komplettes Fahrzeug (Audi A4), das vor einer Projektionsfläche platziert ist, die  $180^\circ$  des visuellen Feldes des Fahrers abdeckt (Bild 2-2). Zusätzlich dazu ist eine Rückprojektion hinter dem Fahrzeug installiert, die es ermöglicht, den rückwärtigen Verkehr durch die Spie-



Bild 2-1: Schematischer Aufbau des Fahrsimulators

gel zu betrachten. Die Fahrumgebung wird mit der Software SILAB 5.0 des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften GmbH umgesetzt. Die Fahrzeugdynamik wird mit CarMaker 6.0 gesteuert. Motorgeräusche und Fahrtwind werden simuliert und über einen Lautsprecher im Inneren des Fahrzeugs ausgegeben. Die Kommunikation von Proband und Versuchsleiter wird über Mikrofon und Kamera sichergestellt. Im Versuchsauto sind ein Force-Feedback Lenkrad und eine aktive Pedalerie verbaut. Darüber hinaus verfügt das Fahrzeug über aktuelle Fahrerassistenzsysteme, wie bspw. Adaptive Cruise Control (ACC) und ABS. Für den Versuch wurde in der Mittelkonsole des Fahrzeuges zusätzlich ein Tablet angebracht, auf den Informationen für den Fahrer zum aktuellen Reibwert eingeblendet werden konnten.

Die genutzte Fahrumgebung bestand aus einer zweispurigen, abwechslungsreichen Landstraße, die kurvige und gerade Abschnitte enthielt. Während der Fahrt wechselten die Wetterbedingungen



Bild 2-2: Fahrsimulator des Fachgebiets Kraftfahrzeuge der TU Berlin

und damit auch die Fahrbahnzustände. Neben einer trockenen Fahrbahn wurden eine nasse Fahrbahn durch Regen sowie eine sehr nasse Fahrbahn durch Starkregen simuliert. Der Reibwert der Bedingungen lag für die trockene Fahrbahn bei  $\mu_{trocken} = 1$ , für die nasse Fahrbahn bei  $\mu_{Regen} = 0,5$  und für die sehr nasse Fahrbahn bei  $\mu_{Starkregen} = 0,3$ . Die Zahlenwerte der Reibwerte waren beliebig einstellbar und wurden so gewählt, dass die drei Fahrbahnzustände deutliche Unterschiede in der Fahrzeugdynamik des simulierten Fahrzeugs aufwiesen. Ein Ausbrechen des Fahrzeugs beim maximalen Reibwert musste provoziert werden, während beim niedrigen Reibwert die Fahrereingaben behutsam erfolgen mussten, um das Fahrzeug in der Spur zu halten. Bild 2-3 zeigt die Fahrstrecke, die in vier Messabschnitte (T1 bis T4) unterteilt wurde. Die Messabschnitte T1 bis T3 setzten sich jeweils aus einer Geraden und einer Kurve zusammen. Die Gerade war immer durch eine trockene Fahrbahn gekennzeichnet, wohingegen die Kurve trocken, nass oder sehr nass sein konnte. Die Reihenfolge dieser drei Fahrbahnzustände in den Messabschnitten T1 bis T3 war über die Probanden ausbalanciert. In Bild 2-3 ist durch einen senkrechten Strich der Übergang zur Kurve jeweils markiert, der gleichzeitig auch den Punkt des Wetterumschwungs kennzeichnet. Im letzten Messabschnitt (T4) gab es ebenfalls einen Wetterumschwung (von trocken zu Starkregen), jedoch keine Kurve.

Vor dem Ego-Fahrzeug befand sich ein Führungsfahrzeug. Die Probanden wurden instruiert, diesem Fahrzeug ohne Überholen zu folgen. Sie sollten die Strecke „so zügig wie möglich und so sicher wie nötig“ durchfahren. Bei Situationen, die subjektiv als gefährlich erschienen, konnten sie sich zurückfallen lassen. Das Führungsfahrzeug fuhr mit einer kons-

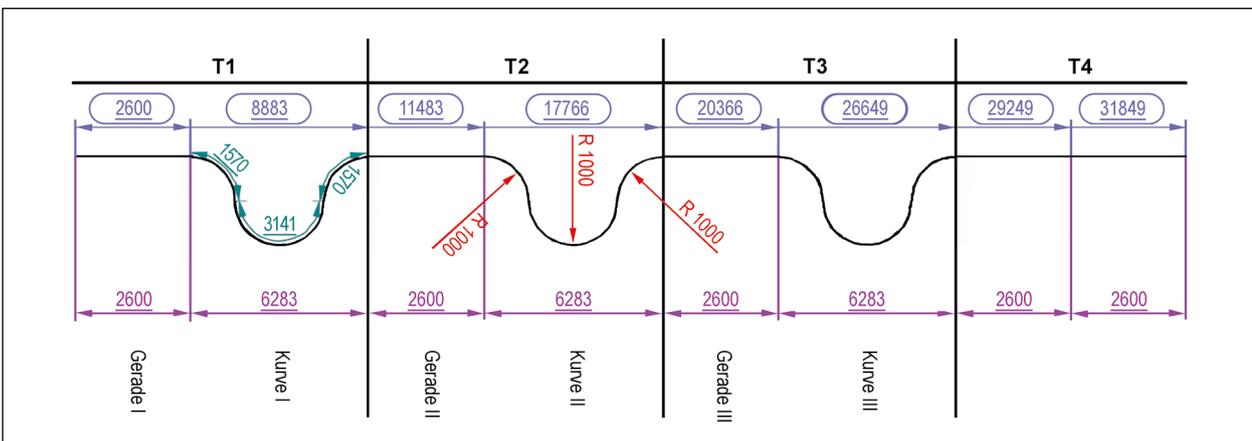


Bild 2-3: Ablauf der Testfahrt mit den vier Abschnitten T1-T4

tanten Geschwindigkeit von 120 km/h, passte sich jedoch ohne starkes Abbremsen an die jeweilige Wetterbedingung an. So verringerte das Führungsfahrzeug seine Geschwindigkeit jeweils kurz nach der Einfahrt in eine Kurve auf 100 km/h bei Regen bzw. auf 80 km/h bei Starkregen. Die Entschleunigung erfolgte durch das Motorbremsen, dies führte folglich zu keinem Aufleuchten der Bremsleuchten. Diese Variation der Geschwindigkeit war notwendig, da eine konstante Fahrt mit 120 km/h bei reduziertem Reibwert sehr unrealistisch und das unfallfreie Folgen bei dieser Geschwindigkeit fast unmöglich wäre. Bei trockener Fahrbahn und bei T4 behielt das Führungsfahrzeug seine Geschwindigkeit von 120 km/h bei.

Das angestrebte Verhalten des Führungsfahrzeuges sowie die Unterscheidbarkeit der Wetterbedingungen und die Realitätsnähe der Simulation (Wetter, Umgebung, Ruckelfreiheit) wurden mithilfe einer Vortestung mit  $n = 4$  Probanden sichergestellt.

### 2.1.3 Experimentelles Design und Operationalisierung

Im Versuch wurden zwei unabhängige Variablen (UVn) manipuliert:

- Der Zustand der Fahrbahn (trocken, nass, Starkregen) diene als Within-Faktor.
- Die Anzeige des Reibwertes (mit, ohne) diene als Between-Faktor.

Die beiden UVn wurden in einem Kontrollgruppendesign kombiniert. Gruppe 1 (G1) fungierte als Experimentalgruppe ( $n_1 = 18$ ), Gruppe 2 (G2) als Kontrollgruppe ( $n_2 = 18$ ). Die Experimentalgruppe absolvierte den Versuch mit der Reibwertanzeige, die Experimentalgruppe ohne die Anzeige. Alle Versuchspersonen erlebten die drei Wetterbedingungen. Tabelle 2-1 fasst das experimentelle Design zusammen.

Die Darstellung des Reibwertes erfolgte für die entsprechende Gruppe auf dem Tablet in der Mittelkonsole des Fahrzeuges. Hierzu wurde eine dreifarbige

Fahrbahn/Anzeige	mit	ohne
trocken (t)	G1	G2
nass (n)	G1	G2
Starkregen (s)	G1	G2

Tab. 2-1: Experimentelles Design der Untersuchung

Anzeige nach dem Ampelsystem gewählt, die über die Farben grün, gelb und rot einen hohen, mittleren und geringen Reibwert symbolisierte (Vergleich Bild 2-5). Der Wechsel von einer Farbe zur anderen erfolgte stufenlos und wurde von einem Hinweiston begleitet. Bei den Streckenabschnitten T1 bis T3 sprang die Anzeige jeweils 100 m (entspricht 3 Sekunden bei 120 km/h) vor dem Wetterumschwung um. Auf der geraden Strecke stand die Anzeige also auf Grün und sprang kurz vor der Einfahrt in die kurvige Strecke auf Gelb bzw. auf Rot, wenn die folgende Kurve mit Regen bzw. Starkregen durchfahren werden musste. Beim Verlassen der kurvigen Strecke erfolgte die Anzeigenänderung auf Grün zum Zeitpunkt des Wetterumschwungs zu trockenem Wetter. Bei T4 erfolgte eine frühere Warnung. Hier wurde die Gruppe mit Reibwertanzeige 200 m (entspricht 6 Sekunden bei 120 km/h) vor dem Wetterumschwung gewarnt.

Als abhängigen Variablen (AVn) wurden objektive und subjektive Daten erhoben. Das objektive Fahrerverhalten wurde über die Geschwindigkeits- und Abstandswahl erfasst. Der Abstand wurde als Abstand in Metern und in Sekunden als Time Headway (THW) berücksichtigt. Explorativ wurde darüber hinaus die Unfallhäufigkeit registriert. Im Rahmen der Vortestungen zur Simulationsumgebung wurde a priori sichergestellt, dass die Aufzeichnung aller relevanten Messwerte zuverlässig erfolgte und dass die Datenqualität für die geplanten Analysen ausreichend war. Subjektive abhängige Variablen waren die Bewertung der Kritikalität der Fahrsituation per single item und die subjektive Beurteilung der Anzeige hinsichtlich Zufriedenheit und Nützlichkeit mit dem Akzeptanz-Fragebogen von [Van der LAAN, 1997]. Dieser Fragebogen liegt in Form eines semantischen Differenzials vor, bei dem die Probanden ihre Zustimmung zu 9 Wortpaaren durch Ankreuzen auf einer Skala von -2 bis 2 zum Ausdruck bringen. Er ist im Anhang in Tabelle A-1 abgebildet. Über das Kamerabild kontrollierte der Versuchsleiter die Blickzuwendung zur Reibwertanzeige als Kontrollvariable in der Experimentalgruppe. Diese Art der Erhebung für die Blickzuwendung wurde im Rahmen der Vortestungen mit einem eye tracker validiert.

### 2.1.4 Prozedur

Zu Beginn der Untersuchung wurden die Versuchspersonen durch den Versuchsleiter begrüßt. Anschließend wurden sie mit den Zielen und den Vor-



4. Waren Sie mit der Gestaltung des Fahrerinformationssystems zufrieden? (Nach einer Begründung fragen.)
5. Sollte eine solche Anzeige sensitiv sein, also frühzeitig warnen oder sich erst bei erheblich schlechteren Straßenverhältnissen einschalten, z. B. bei stark erhöhtem Bremsweg?

Die Gruppe ohne Reibwertanzeige beantwortete lediglich die erste Frage, während die Gruppe mit Reibwertanzeige alle fünf Fragen beantwortete. Abschließend wurden die Teilnehmer beider Gruppen nochmals vollständig über die Ziele der Studie informiert und dann verabschiedet.

### 2.1.5 Hypothesen und Analysestrategie

Die Fragestellungen des Versuchs führten zu den Hypothesen H1-H3, die sich wiederum in Unterhypothesen aufgliedern.

- H1: Die Unfallhäufigkeit hängt von der Gruppenzugehörigkeit (mit, ohne Reibwertanzeige) ab. Dies zeigt sich für T1 bis T3 (H1a) sowie für T4 (H1b).
- H2: Wie stark die Probanden ihr Fahrverhalten an den Fahrbahnzustand (trocken, nass, Starkregen) anpassen, ist unterschiedlich für die beiden Gruppen (mit, ohne Reibwertanzeige). Dies entspricht einem Interaktionseffekt zwischen Wetterbedingung und Reibwertanzeige. Der Effekt zeigt sich in Bezug auf T1 bis T3 für die abhängigen Maße Geschwindigkeitswahl (H2a) sowie Abstandswahl in Metern (H2b) und in THW (H2c). Bei T4 zeigt sich ebenfalls eine unterschiedliche Anpassung des Fahrverhaltens an die Veränderung des Fahrbahnzustands von trocken zu Starkregen für die Geschwindigkeitswahl (H2d), die Abstandswahl in Metern (H2e) und für THW (H2f).
- H3: Der Effekt der Fahrbahnzustände auf die subjektiv eingeschätzte Kritikalität ist unterschiedlich für die beiden Gruppen (mit, ohne Reibwertanzeige). Dies zeigt sich in einem Interaktionseffekt zwischen Wetterbedingung und Reibwertanzeige für T1 bis T3 (H3a) und einem Haupteffekt der Reibwertanzeige für T4 (H3b).

Explorativ wird darüber hinaus der korrelative Zusammenhang zwischen dem Fahrverhalten und der subjektiv eingeschätzten Kritikalität betrachtet. Die

Bewertung der Reibwertanzeige und das Interview werden ebenfalls explorativ analysiert. Zusätzlich wird im Rahmen der explorativen Analyse die Kontrollvariable Blickzuwendung zur Reibwertanzeige berücksichtigt.

Zur Analyse der Unfälle wurden durch den Versuchsleiter Unfälle während des Experiments protokolliert. Diese Protokollierung wurde mithilfe der Fahrdaten (Geschwindigkeit, Abstand zum Führungsfahrzeug, Längs- und Querschleunigung) validiert. Für die Analyse der Geschwindigkeits- und Abstandswahl wurden alle Durchgänge ausgeschlossen, in denen Unfälle passierten oder die nach einem Unfall erhoben wurden. Darüber hinaus wurde für die Analyse der Fahrdaten nur der kritische Bereich des Beginns der Kurvenfahrt bzw. der Bereich des Wetterumschwungs betrachtet. Dazu wurde für die Messabschnitte T1 bis T4 der Bereich von 200 m vor bis 400 m nach Reibwertänderung berücksichtigt. Dieser Bereich wurde in 12 Streckenteilabschnitte von 50 m unterteilt. In Bild 2-6 ist diese Unterteilung dargestellt.

Die Analyse des Fahrverhaltens erfolgte mithilfe von linearen, gemischten Modellen. Für die Messabschnitte T1 bis T3 wurde der Einfluss der Reibwertanzeige, der Wetterbedingung und des Streckenteilabschnitts untersucht. Für den Messabschnitt T4 gab es nur eine Wetterbedingung (Starkregen). Daher wurde hier lediglich der Einfluss der Reibwertanzeige und des Teilabschnitts betrachtet. Der Streckenteilabschnitt wurde als zusätzlicher Prädiktor in das Modell integriert, da nach den Hypothesen eine Anpassung des Fahrverhaltens erwartet wurde. Eine solche Anpassung kann sich nur über den zeitlichen Verlauf der Fahrt zeigen. Die drei Prädiktoren Reibwertanzeige, Wetterbedingung und Streckenteilabschnitt wurden so kodiert, dass der Intercept des Modells als Gesamtmittelwert der Daten im Streckenteilabschnitt 0 interpretiert werden kann. Das  $\beta$ -Gewicht des Haupteffekts der Reibwertanzeige stellt den Mittelwertunter-

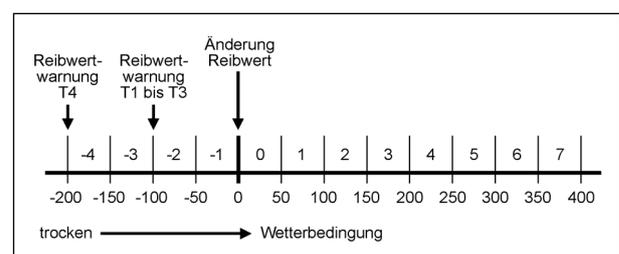


Bild 2-6: Aufteilung eines Messabschnitts in unterschiedliche Streckenteilabschnitte

schied zwischen den Gruppen mit und ohne Reibwertanzeige dar. Das  $\beta$ -Gewicht des Haupteffekts des Streckenteilabschnitts kann als mittlere Veränderung interpretiert werden, wenn das Fahrzeug sich um 50 m nach vorne bewegt. Die Wetterbedingung wurde als Polynomialkontrast kodiert. Dieser Kontrast prüft, ob der Effekt der Wetterbedingung auf das Fahrverhalten durch einen linearen und einen quadratischen Kurvenverlauf beschrieben werden kann. Eine schematische Darstellung solcher Kurvenverläufe zeigt Bild 2-7. In der linken Grafik ist eine Datenlage dargestellt, die sich alleine durch lineare Trends beschreiben lässt. In der rechten Grafik folgen die Daten einem linearen und quadratischen Trend, da die abhängigen Werte zwar mit schlechter werdendem Wetter ansteigen (linearer Trend), der Unterschied zwischen den Stufen jedoch verschieden groß ist (quadratischer Trend). Diese Art der Kodierung wurde gewählt, um zu prüfen, ob sich der Effekt der Reibwertanzeige unterschiedlich stark über die verschiedenen Wetterbedingungen hinweg zeigt.

Neben den Haupteffekten wurden auch die Interaktionen zwischen den Prädiktoren Reibwertanzeige, Wetterbedingung und Streckenteilabschnitt betrachtet. Aufgrund der Hypothesen sind für die Analyse der Messabschnitte T1 bis T3 besonders die Interaktionen zwischen der Reibwertanzeige und der Wetterbedingung (linear und quadratisch) sowie die Dreifach-Interaktion zwischen Reibwertanzeige, Wetterbedingung (linear und quadratisch) und Streckenteilabschnitt informativ. Für Messabschnitt T4 sind vor allem der Haupteffekt der Reibwertanzeige und die Interaktion zwischen Reibwertanzeige und Streckenteilabschnitt von Relevanz. Diese Effekte werden im Ergebnisteil geprüft und vorgestellt.

Die Analysen wurden mit dem Statistikprogramm R [R CORE, 2018] durchgeführt. Hierzu wurden die folgenden Pakete genutzt: ggplot2 [WICKHAM, 2016], lme4 [BATES, 2015], MASS [VENABLES, 2002], reshape [WICKHAM, 2007], rmcrr [BAKDASH, 2018] und tidyverse [FOX, 2011], [WICKHAM, 2017].

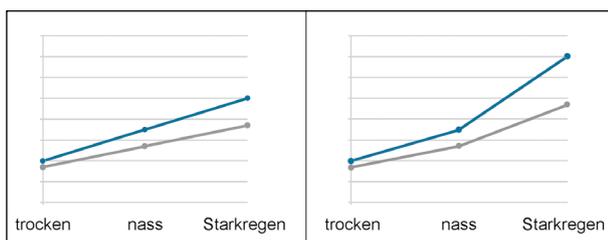


Bild 2-7: Schematische Darstellung des Polynomialkontrasts für die Wetterbedingung

## 2.2 Ergebnisse

### 2.2.1 H1: Effekte der Reibwertanzeige auf die Unfallhäufigkeit

Bei den Messabschnitten T1 bis T3 kam es insgesamt bei 13 von 36 Probanden zu einem Unfall. Diese Unfälle bestanden aus einem Kontrollverlust des Fahrzeuges, woraufhin das Fahrzeug in den meisten Fällen eine erhöhte Querbeschleunigung erfuhr und die Spur verließ. Alle Unfälle ereigneten sich zu Beginn der Kurve unter der Bedingung Starkregen. Ein Vergleich der Unfallhäufigkeit mit Reibwertanzeige (7 von 18 Probanden) mit der Unfallhäufigkeit ohne Reibwertanzeige (6 von 18 Probanden) zeigte keinen signifikanten Effekt der Reibwertanzeige,  $\chi^2(1) = 0,12$ ,  $p > 0,05$ . Bei T4 ereignete sich kein Unfall. Daher können die Hypothesen H1a zum Effekt der Reibwertanzeige bei T1 bis T3 und H1b zum Effekt der Reibwertanzeige bei T4 abgelehnt werden. Die Unfallwahrscheinlichkeit wurde also nicht durch die Reibwertanzeige beeinflusst.

### 2.2.2 H2: Effekte der Reibwertanzeige und der Wetterbedingung auf das Fahrverhalten

In der Analyse des Fahrverhaltens bezüglich Abstand und Geschwindigkeit gingen für T1 bis T3 insgesamt 83 Fahrsituationen mit je 12 Streckenteilabschnitten verteilt über 33 Versuchspersonen ein. Für T4 wurden 23 Probanden mit je einer Fahrsituation betrachtet.

#### H2a: Effekte der Reibwertanzeige und des Fahrbahnzustandes auf die Geschwindigkeitswahl bei T1 bis T3

Die Ergebnisse der Analyse zur Geschwindigkeitswahl bei T1 bis T3 sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst.

Tabelle 2-2 zeigt, dass die mittlere Geschwindigkeit der Probanden in den 50 Metern nach der Reibwertänderung bei 116 km/h lag (siehe Intercept). Darüber hinaus war die Geschwindigkeit im Mittel mit jeder Abstufung der Wetterbedingung um 3,5 km/h geringer (siehe Wetter linear). Diese Abnahme war jedoch nicht symmetrisch von trocken zu nass und von nass zu Starkregen (siehe Wetter quadratisch). Mit jedem Streckenteilabschnitt zu je 50 m nahm die Geschwindigkeit im Mittel um 1,7 km/h ab (Abschnitt). Hypothesenrelevant sind die Interaktionen zwischen Anzeige und Wetterbedingung sowie zwi-

Term	Schätzung	Standardfehler	t-Wert	
Intercept	116,12	0,63	183,32	*
Anzeige	0,78	1,27	0,62	
Wetter linear	-3,52	0,48	-7,34	*
Wetter quadriert	1,48	0,46	3,18	*
Abschnitt	-1,70	0,07	-24,18	*
<b>Anzeige:Wetter linear</b>	<b>1,41</b>	<b>0,96</b>	<b>1,47</b>	
<b>Anzeige:Wetter quadratisch</b>	<b>-2,20</b>	<b>0,93</b>	<b>-2,37</b>	*
Anzeige:Abschnitt	0,30	0,14	2,11	*
Abschnitt:Wetter linear	-1,54	0,12	-12,52	*
Abschnitt:Wetter quadratisch	0,44	0,12	3,62	*
<b>Anzeige:Wetter linear:Abschnitt</b>	<b>0,84</b>	<b>0,25</b>	<b>3,42</b>	*
<b>Anzeige:Wetter quadratisch:Abschnitt</b>	<b>0,00</b>	<b>0,24</b>	<b>0,01</b>	

Anmerkung:  
Effekte, die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5\%$  als signifikant angenommen werden, sind durch \* gekennzeichnet.  
Die hypothesenrelevanten Effekte sind fettgedruckt.

Tab. 2-2: Ergebnisse der Analyse zur Geschwindigkeitswahl der Probanden bei T1 bis T3

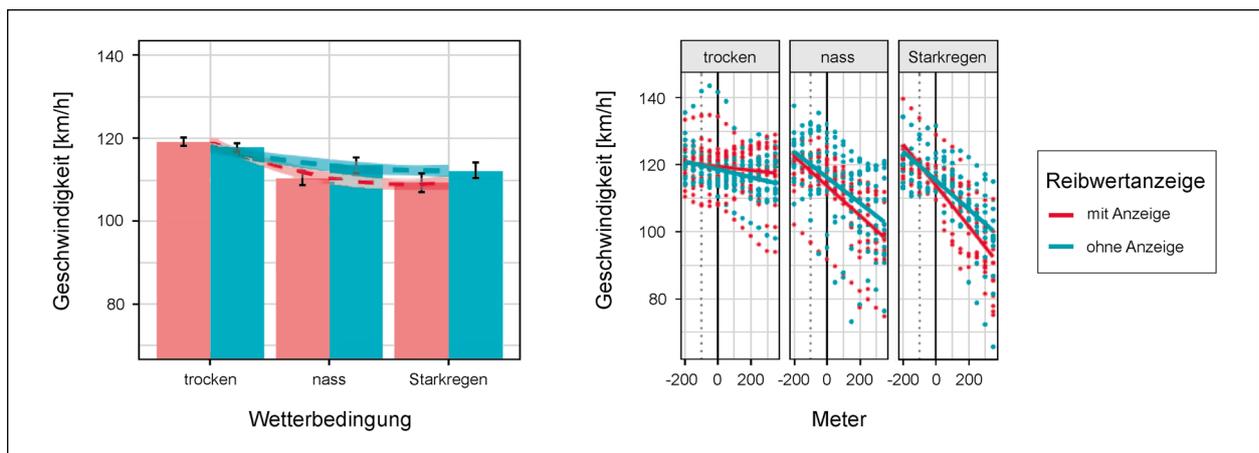


Bild 2-8: Effekte der Anzeige und der Wetterbedingung (links) sowie der Anzeige, der Wetterbedingung und des Streckenteilabschnitts (rechts) auf die Geschwindigkeitswahl der Probanden. Durchgezogene Linien: lineare Trends, gestrichelte Linien: quadratische Trends

schen Anzeige, Wetterbedingung und Streckenteilabschnitt. Beide sind in Bild 2-8 dargestellt.

Die linke Grafik in Bild 2-8 zeigt, dass die Probanden ihre mittlere Geschwindigkeit an die Wetterbedingung anpassten und dass diese Anpassung stärker in der Gruppe mit Reibwertanzeige geschah. Die rechte Grafik zeigt darüber hinaus, dass die Anpassung der Geschwindigkeit über die Streckenteilabschnitte hinweg unterschiedlich stark je nach Wetterbedingung und Gruppenzugehörigkeit war. So zeigte die Gruppe mit Reibwertanzeige eine stärkere Anpassung an die Wetterbedingungen über die Streckenabschnitte hinweg als die Gruppe ohne Reibwertanzeige. Dies wird durch die stärkere

negative Steigung der roten Geraden verdeutlicht. Aufgrund dieser signifikanten Interaktionen kann die Hypothese H2a angenommen werden.

### H2b und H2c: Effekte der Reibwertanzeige und des Fahrbahnzustandes auf den Abstand in Metern und den THW in Sekunden bei T1 bis T3

Die im Versuch gemessenen Abstände in Metern und in Sekunden (THW) bei T1 bis T3 waren nicht normalverteilt. Sie zeigten eine starke Rechtsschiefe. Zwar wählten 75 % der Probanden einen Abstand von unter 100 m bzw. einen THW von unter 3,5 Sekunden ( $Median_{\text{Abstand}} = 61 \text{ m}$ ,  $Median_{\text{THW}} =$

1,9 s), doch gab es auch Probanden, die einen Abstand bis zu 350 m bzw. einen THW bis zu 11,9 s in einzelnen Streckenteilabschnitten einhielten. Da die Normalverteilung der Messwerte eine Voraussetzung für die inferenzstatistische Analyse ist, wurden die Rohwerte der Abstandswahl und des THW für die Analysen logarithmiert. Für alle grafischen Darstellungen der Daten werden die logarithmierten Daten mit zurücktransformierter Beschriftung der Y-Achse präsentiert, damit eine direkte Interpretation der Werte erfolgen kann. Die Ergebnisse der

Analyse der Abstandswahl in Metern für die Messabschnitte T1 bis T3 sind in Tabelle 2-3 zusammengefasst, die der Analyse des THW für die Messabschnitte T1 bis T3 in Tabelle 2-4.

Tabelle 2-3 und Tabelle 2-4 zeigen, dass das Wetter und der Abschnitt der Messung bereits allein einen signifikanten Effekt auf den Abstand sowie auf den THW bei T1 bis T3 hatten. Darüber hinaus gab es signifikante Interaktionen zwischen den Faktoren Anzeige und Wetter, Abschnitt und Wetter sowie

Term	Schätzung	Standardfehler	t-Wert	
Intercept	4,14	0,12	35,34	*
Anzeige	0,31	0,23	1,32	
Wetter linear	-0,02	0,02	-1,23	
Wetter quadriert	0,07	0,02	4,11	*
Abschnitt	-0,02	0,00	-6,85	*
<b>Anzeige:Wetter linear</b>	<b>0,13</b>	<b>0,03</b>	<b>3,87</b>	<b>*</b>
<b>Anzeige:Wetter quadratisch</b>	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>	<b>2,01</b>	<b>*</b>
Anzeige:Abschnitt	0,00	0,00	-0,38	
Abschnitt:Wetter linear	-0,03	0,00	-7,15	*
Abschnitt:Wetter quadratisch	0,02	0,00	4,31	*
<b>Anzeige:Wetter linear:Abschnitt</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,76</b>	
<b>Anzeige:Wetter quadratisch:Abschnitt</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>2,22</b>	<b>*</b>

Anmerkung:  
Effekte, die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5\%$  als signifikant angenommen werden, sind durch \* gekennzeichnet.  
Die hypothesenrelevanten Effekte sind fettgedruckt.

Tab. 2-3: Ergebnisse der Analyse zum logarithmierten Abstand der Probanden bei T1 bis T3

Term	Schätzung	Standardfehler	t-Wert	
Intercept	0,67	0,12	5,66	*
Anzeige	0,30	0,24	1,29	
Wetter linear	0,01	0,02	0,71	
Wetter quadriert	0,05	0,02	3,13	*
Abschnitt	0,00	0,00	-0,47	
<b>Anzeige:Wetter linear</b>	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	<b>3,35</b>	<b>*</b>
<b>Anzeige:Wetter quadratisch</b>	<b>0,09</b>	<b>0,03</b>	<b>2,47</b>	<b>*</b>
Anzeige:Abschnitt	-0,01	0,01	-0,97	
Abschnitt:Wetter linear	-0,02	0,00	-3,59	*
Abschnitt:Wetter quadratisch	0,01	0,00	3,27	*
<b>Anzeige:Wetter linear:Abschnitt</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>-1,60</b>	
<b>Anzeige:Wetter quadratisch:Abschnitt</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>2,14</b>	<b>*</b>

Anmerkung:  
Effekte, die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5\%$  als signifikant angenommen werden, sind durch \* gekennzeichnet.  
Die hypothesenrelevanten Effekte sind fettgedruckt.

Tab. 2-4: Ergebnisse der Analyse zum logarithmierten THW der Probanden bei T1 bis T3

eine Dreifachinteraktion aller Prädiktoren. Hypothesenrelevant sind die Interaktionen zwischen Anzeige und Wetter und die Dreifachinteraktion. Diese sind für beide abhängige Maße in gleicher Weise signifikant. Die beiden Maße verhalten sich damit konsistent.

In Bild 2-9 ist die Interaktion zwischen Anzeige und Wetter auf den Abstand in Metern und den THW in Sekunden für den linearen und quadratischen Trend dargestellt. Die Interaktion mit dem linearen Trend (durchgezogene Linien) zeigt, dass Probanden mit Reibwertanzeige ihren Abstand bzw. THW mit Verschlechterung der Wetterbedingungen im Mittel verringerten. Probanden ohne Anzeige vergrößerten ihren Abstand bzw. THW im Mittel. Der quadratische Trend (gestrichelte Linien) zeigt darüber hinaus, dass die fast lineare Abnahme des Abstands und der THW in der Gruppe mit Anzeige über die drei Wetterbedingungen hinweg so nicht für die Gruppe ohne Anzeige gezeigt werden konnte. Pro-

banden mit Anzeige zeigten deskriptiv leicht kleinere Abstände bzw. THW bei Nässe gegenüber trockener Fahrbahn. Bei sehr nasser Fahrbahn aufgrund von Starkregen hielten sie im Mittel jedoch einen größeren Abstand bzw. erzeugten einen größeren THW.

Bild 2-10 zeigt die signifikante Dreifachinteraktion bei T1 bis T3. Hier wird deutlich, dass sich die gemeinsamen Effekte von Abschnitt und Anzeige über die Wetterbedingungen hinweg verändern. Bei trockener Straße zeigten die Probanden eine Vergrößerung des Abstands zum Führungsfahrzeug bzw. eine Vergrößerung des THW, während sie den Abstand bei Nässe und Starkregen verkleinerten. Diese Verkleinerung war unterschiedlich stark für die beiden Gruppen mit und ohne Reibwertanzeige. So zeigen die Probanden mit Anzeige einen konstanten THW bei Nässe und bei Starkregen, während die Probanden ohne Anzeige eine Verringerung des THW unter diesen Bedingungen zeigten. Diese

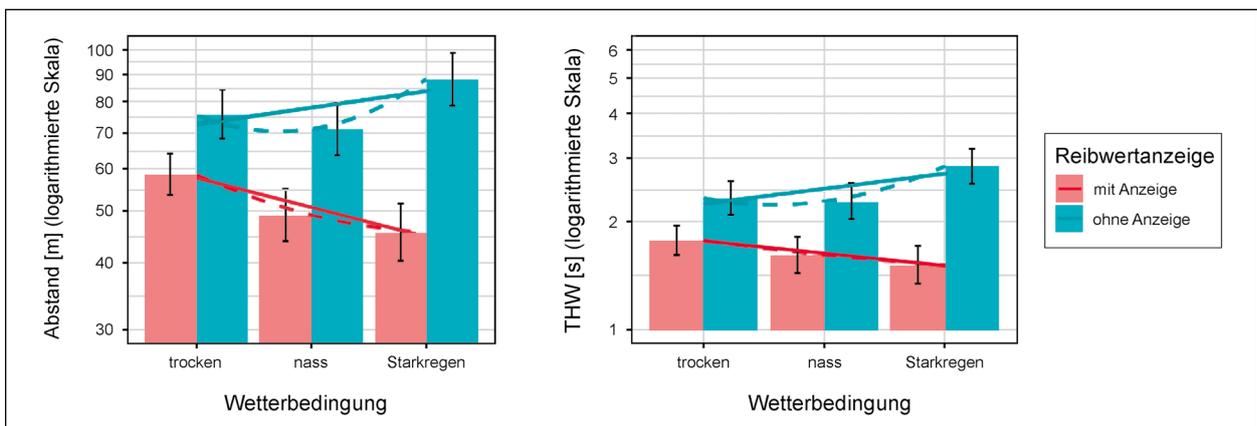


Bild 2-9: Effekte der Wetterbedingung und der Anzeige auf den Abstand der Versuchspersonen zum Führungsfahrzeug als Abstand in Metern und als Time Headway in Sekunden. Durchgezogene Linien: lineare Trends; Gestrichelte Linien: quadratische Trends

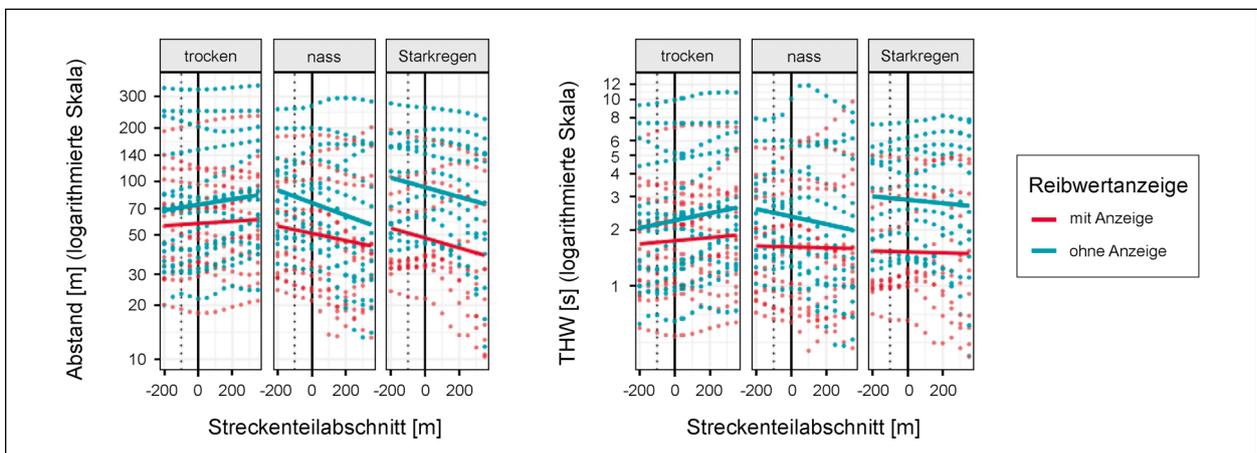


Bild 2-10: Effekte der Wetterbedingung, der Anzeige und des Streckenteilabschnitts auf den Abstand der Versuchspersonen zum Führungsfahrzeug als Abstand in Metern und als Time Headway in Sekunden. Durchgezogene Linien: lineare Trends

THW-Werte entsprachen bei beiden Bedingungen einer Abnahme des Abstands in Metern, da die Geschwindigkeit hier aufgrund des langsameren Führungsfahrzeugs abnahm. Insgesamt hielten die Probanden mit Reibwertanzeige deskriptiv einen geringeren Sicherheitsabstand in Metern und in Sekunden (THW).

Zusammengefasst heißt das, dass sich die Probanden unterschiedlich stark an die Wetterbedingungen bei T1 bis T3 anpassten, je nachdem ob sie mit oder ohne Reibwertanzeige fuhren. Die Hypothesen H2b und H2c können daher angenommen werden.

**H2d: Effekte der Reibwertanzeige auf die Geschwindigkeitswahl bei T4**

Die Ergebnisse der Analyse zur Geschwindigkeitswahl bei T4 sind in Tabelle 2-5 zusammengefasst.

Tabelle 2-5 zeigt, dass die mittlere Geschwindigkeit der Probanden in den 50 Metern nach der Reibwertänderung bei 118 km/h lag (siehe Intercept). Darüber hinaus gab es keinen signifikanten Unterschied in der mittleren Geschwindigkeit der Probanden

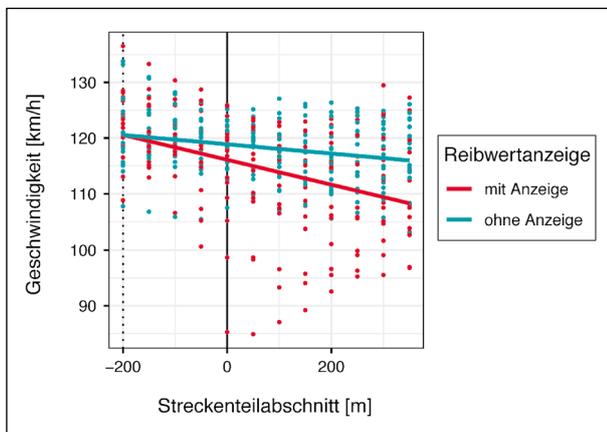


Bild 2-11: Effekte der Anzeige und des Streckenteilabschnitts auf die Geschwindigkeitswahl der Probanden. Durchgezogene Linien: Lineare Trends

Term	Schätzung	Standardfehler	t-Wert	
Intercept	117,50	0,95	124,07	*
<b>Anzeige</b>	<b>2,78</b>	<b>1,89</b>	<b>1,47</b>	
Abschnitt	-0,77	0,08	-9,82	*
<b>Anzeige:Abschnitt</b>	<b>0,70</b>	<b>0,16</b>	<b>4,49</b>	*

Anmerkung:  
Effekte, die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5\%$  als signifikant angenommen werden, sind durch \* gekennzeichnet.  
Die hypothesenrelevanten Effekte sind fettgedruckt.

Tab. 2-5: Ergebnisse der Analyse zur Geschwindigkeitswahl der Probanden bei T4

zwischen den Bedingungen der Reibwertanzeige. Die Probanden verringerten jedoch ihre Geschwindigkeit signifikant über die Streckenteilabschnitte hinweg und taten dies unterschiedlich stark in den beiden Reibwertanzeigegruppen. Dieser Interaktionseffekt ist in Bild 2-11 dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Probanden mit Reibwertanzeige einen stärkeren Abfall in der mittleren Geschwindigkeit aufweisen. Das heißt, dass sie bereits zum Zeitpunkt der Reibwertänderung im Mittel langsamer sind. Hypothese H2d kann daher angenommen werden.

**H2e und H2f: Effekte der Reibwertanzeige auf den Abstand in Metern und den THW in Sekunden bei T4**

Auch die Werte des Abstands in Metern und des THW zu T4 waren nicht normalverteilt. Daher wurden auch diese Werte für die Analyse logarithmiert. Die Ergebnisse der Analyse zur Abstandswahl in Metern bei T4 sind in Tabelle 2-6, die Ergebnisse der Analyse zum THW bei T4 in Tabelle 2-7 zusammengefasst.

Tabelle 2-6 und Tabelle 2-7 zeigen, dass sich die Probanden im Mittel nicht signifikant in ihrem Abstand zum Führungsfahrzeug bzw. in ihrem THW zwischen den Gruppen mit und ohne Reibwertanzeige unterschieden. Sie zeigten jedoch einer Erhöhung des Abstands bzw. des THW, der unterschiedlich stark in den beiden Gruppen war. Bild 2-12 stellt diese Interaktion grafisch dar. Hier wird deutlich, dass die Probanden ohne Anzeige ihren Abstand und ihren THW nicht dem Wetterumschwung anpassten, während dies in der Gruppe mit Reibwertanzeige im Mittel durch eine Erhöhung des Abstands bzw. des THW geschah. Hypothesen H2e und H2f können daher angenommen werden.

Term	Schätzung	Standardfehler	t-Wert	
Intercept	4,17	0,12	33,74	*
<b>Anzeige</b>	<b>0,22</b>	<b>0,25</b>	<b>0,90</b>	
Abschnitt	0,02	0,00	10,55	*
<b>Anzeige:Abschnitt</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>-7,76</b>	*

Anmerkung:  
Effekte, die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5\%$  als signifikant angenommen werden, sind durch \* gekennzeichnet.  
Die hypothesenrelevanten Effekte sind fettgedruckt.

Tab. 2-6: Ergebnisse der Analyse zur logarithmierten Abstandswahl der Probanden bei T4

Term	Schätzung	Standardfehler	t-Wert	
Intercept	0,69	0,13	5,04	*
<b>Anzeige</b>	<b>0,20</b>	<b>0,26</b>	<b>0,77</b>	
Abschnitt	0,03	0,00	12,22	*
<b>Anzeige:Abschnitt</b>	<b>-0,04</b>	<b>0,00</b>	<b>-8,26</b>	*

Anmerkung:  
Effekte, die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5\%$  als signifikant angenommen werden, sind durch \* gekennzeichnet.  
Die hypothesenrelevanten Effekte sind fettgedruckt.

Tab. 2-7: Ergebnisse der Analyse zum logarithmierten THW bei T4

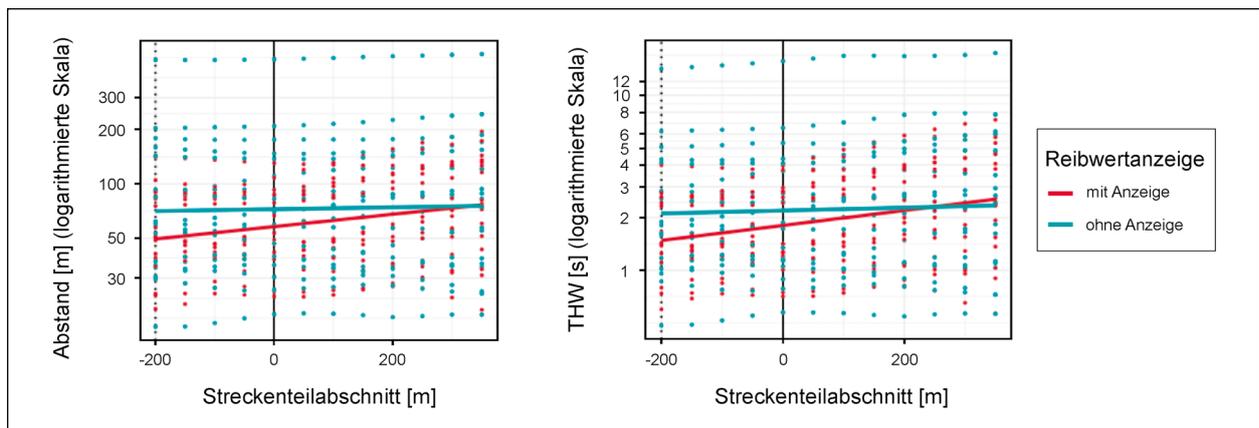


Bild 2-12: Effekte der Anzeige und des Streckenteilabschnitts auf die Geschwindigkeitswahl der Probanden. Durchgezogene Linien: Lineare Trends

### 2.2.3 H3: Effekte der Reibwertanzeige auf die subjektive Kritikalität

Für die subjektive Kritikalität wurden ebenfalls nur Messabschnitte betrachtet, bei denen kein Unfall vorangegangen war. Sie war für die Messabschnitte T1 bis T3 sowie für T4 nicht normalverteilt, sondern zeigte eine Rechtsschiefe. Daher wurden die Werte für die Auswertung logarithmiert. Die Analyse des Effekts der Reibwertanzeige und der Wetterbedingung für T1 bis T3 ist in Tabelle 2-8 dargestellt. Hier zeigte sich ein marginaler Effekt der Reibwertanzeige: Probanden ohne Reibwertanzeige stufen die jeweilige Fahrsituation im Mittel als marginal kritischer ein. Darüber hinaus zeigte sich ein signifikan-

ter Haupteffekt der Wetterbedingung als linearer Trend. Beide Effekte sind in Bild 2-13 subjektiven Kritikalität für T1 bis T3 wurde anschließend mit allen Messabschnitten wiederholt, wobei auch die Durchgänge mit vorangegangenem Unfall betrachtet wurden. Die Schlussfolgerungen der Analyse veränderten sich durch die zusätzlichen Messabschnitte nicht, der Effekt der Reibwertanzeige erreichte in dieser Analyse jedoch keine marginale Signifikanz mehr. Die erwartete Interaktion zwischen Reibwertanzeige und Wetterbedingung erreichte ebenfalls keine Signifikanz. Daher muss Hypothese H3a abgelehnt werden.

Term	Schätzung	Standardfehler	t-Wert	
Intercept	0,78	0,07	11,34	*
Anzeige	0,27	0,14	1,97	+
Wetter linear	0,55	0,10	5,52	*
Wetter quadriert	-0,04	0,10	-0,42	
<b>Anzeige:Wetter linear</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,20</b>	<b>-0,13</b>	
<b>Anzeige:Wetter quadriert</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,20</b>	<b>-0,30</b>	

Anmerkung:  
Effekte, die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5\%$  als signifikant angenommen werden, sind durch \* gekennzeichnet. Effekte, die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 10\%$  als marginal signifikant angenommen werden, sind durch + gekennzeichnet. Die hypothesenrelevanten Effekte sind fettgedruckt.

Tab. 2-8: Ergebnisse der Analyse zur logarithmierten subjektiven Kritikalität bei T1 bis T3

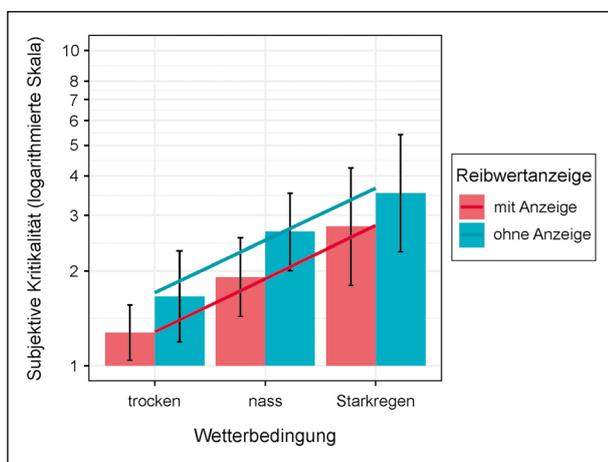


Bild 2-13: Signifikanter Haupteffekt der Wetterbedingung und marginaler Haupteffekt der Reibwertanzeige auf die subjektive Kritikalität bei T1 bis T3. Durchgezogene Linien: Lineare Trends

Für den Messabschnitt T4 zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen mit und ohne Reibwertanzeige,  $t = -0,6$ ,  $p > 0,05$ . Daher muss auch Hypothese H3b abgelehnt werden.

## 2.2.4 Explorative Analysen

### Korrelative Zusammenhänge zwischen Fahrverhalten und subjektiver Kritikalität

Für die explorative Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Fahrerverhalten und subjektiv eingeschätzter Kritikalität wurden Innersubjektkorrelationen berechnet. Diese beschreiben, inwieweit eine Veränderung der subjektiven Kritikalität innerhalb einer Versuchsperson mit der Veränderung des Fahrverhaltens innerhalb derselben Versuchsperson kovariert. Signifikante Korrelationen würden aufzeigen, dass es Zusammenhänge zwischen der subjektiv eingeschätzten Kritikalität einer Fahrsitua-

tion und dem objektiv erfassbaren Fahrverhalten in der gleichen Fahrsituation gibt (z. B. wird die subjektive Kritikalität umso höher eingeschätzt, je geringer der Abstand zum Führungsfahrzeug gewählt wurde). Die Ergebnisse zeigten jedoch keine signifikanten Zusammenhänge zwischen subjektiver Kritikalität und Geschwindigkeitswahl,  $r(49) = -0,19$ ,  $p > 0,05$ , zwischen subjektiver Kritikalität und Abstandswahl,  $r(49) = -0,02$ ,  $p > 0,05$ , sowie zwischen subjektiver Kritikalität und THW,  $r(49) = -0,02$ ,  $p > 0,05$ . Variationen im Fahrverhalten der Versuchsperson spiegeln sich also nicht in der Bewertung der subjektiven Kritikalität wieder.

### Ergebnisse zur Bewertung der Reibwertanzeige

Die Versuchspersonen bewerteten die Reibwertanzeige positiv hinsichtlich Nützlichkeit und Zufriedenheit, die mit dem Fragebogen von [Van der LAAN, 1997] erhoben wurden. Die Nützlichkeitsbewertung erreichte einen mittleren Wert von 1,2 ( $SD = 0,8$ ). Vergleichbar hohe Werte erhielt die Zufriedenheit mit einem Mittel von 0,99 ( $SD = 0,8$ ). Damit liegen die Werte beider Dimensionen signifikant über dem Skalenmittelpunkt von 0,  $V_{Nützlichkeits} = 6,25$ ,  $p < 0,001$  und  $V_{Zufriedenheit} = 158,5$ ,  $p < 0,01$ .

Bezüglich der Interviewfrage 1, was die Fahrer bei der Wahl der Geschwindigkeit berücksichtigt haben, antworteten die meisten ( $n = 35$  Antworten), dass sie das Führungsfahrzeug bezüglich Abstand und Geschwindigkeit als Referenz nahmen. Auf dem zweiten Platz wurde der Fahrbahnzustand genannt ( $n = 26$  Antworten), gefolgt von Fahrbahncharakteristika, wie Kurven und Leitpfosten ( $n = 18$  Antworten). Nur 2 Probanden gaben an, dass sie die Reibwertanzeige berücksichtigt hätten und einer nannte sein Bauchgefühl.

Insgesamt empfanden 14 von 18 Probanden die Reibwertanzeige als hilfreich (Interviewfrage 2). Als Gründe für diese Bewertung gaben sie ihren Warncharakter als Vorbereitung einer Reaktion auf die Wetterveränderung an ( $n = 14$  Antworten). Darüber hinaus sagten sie, dass sie die Anzeige nur bei Starkregen als hilfreich empfanden ( $n = 5$  Antworten) und die Reibwertinformation als Information über Stärke der Nässe bzw. Ergänzung der Wahrnehmung verstanden ( $n = 5$  Antworten) hätten. Drei Probanden berichteten, dass sie die Anzeige explizit zum Zeitpunkt T4 als hilfreich empfanden hätten; ein Proband gab an, dass die grüne Farbe ihm versicherte habe, dass die Fahrbahnzustände ausreichend gut seien.

Auf die dritte Interviewfrage, ob die Fahrer die Reibwertanzeige als störend empfanden, sagten jeweils zwei, dass sie die Blickabwendung von der Straße fördern würde und dass der Warnton ablenkt. Ein Proband gab an, dass er sich erst an die Anzeige gewöhnen müsste.

Die vierte Interviewfrage eruierte, ob die Probanden mit der Gestaltung der Reibwertanzeige zufrieden waren. Insgesamt gaben 16 von 18 Fahrer an, zufrieden zu sein. Gründe für die positive Bewertung umfassten die einfache Gestaltung (inkl. leichte Verständlichkeit ohne zu viele Informationen;  $n = 12$  Antworten) und die leichte Verständlichkeit der Farbkodierung ( $n = 10$  Antworten). Negativ fiel dagegen auf, dass die tiefe Positionierung der Anzeige in der Mittelkonsole dazu führte, dass der Blick von der Straße abgewendet werden musste ( $n = 3$  Antworten). Weiterhin ist ein dynamischerer Übergang zwischen den einzelnen Stufen/mehr Stufen gewünscht ( $n = 3$  Antworten); auch eine Sprachausgabe wäre wünschenswert ( $n = 2$  Antworten).

Die letzte der fünf Interviewfragen fragte danach, ob die Reibwertanzeige besonders sensitiv sein sollte. Das heißt, ob sie frühzeitig warnen sollte oder ob sie sich erst bei erheblich schlechteren Fahrbahnzuständen einschalten sollte. 14 von 18 Probanden sagten, dass sie eine möglichst sensitive Anzeige wünschen würden.

### **Blickzuwendung zur Reibwertanzeige**

Bei der Reibwertänderung von trocken zu Regen in T1 bis T3 zeigten 14 von 18 Probanden eine Blickzuwendung zur Reibwertanzeige. Bei der Änderung hin zu Starkregen waren es 11 von 18. Auch in T4

zeigten die meisten Probanden eine Blickzuwendung zur Reibwertanzeige, als diese sich änderte, und zwar 16 von 18 Probanden.

## **2.3 Diskussion**

Das geschilderte Experiment untersuchte die zu Beginn in Kapitel 2 genannten Forschungsfragen. Hierzu wurde eine Studie im Fahrsimulator durchgeführt, in der die Hälfte der Versuchspersonen eine Reibwertanzeige drei Sekunden vor Änderung des Fahrbahnzustandes erlebten. Die andere Hälfte der Probanden verfügte über kein solches Fahrerinformationssystem. Alle Teilnehmer durchfuhren Straßenabschnitte mit trockener Fahrbahn, nasser Fahrbahn und sehr nasser Fahrbahn bei Starkregen. Durch diese Wetterbedingung variierte der Reibwert zwischen einem hohen und einem sehr niedrigen Wert. Im letzten Abschnitt der Testfahrt wurde die Reibwertanzeige in der entsprechenden Gruppe sechs Sekunden vor der Änderung des Fahrbahnzustandes angezeigt. Erfasst wurden neben den Parametern des objektiven Fahrverhaltens (Geschwindigkeit, Abstand, Time Headway und Unfallhäufigkeit) auch die subjektive Kritikalitätsbewertung der Fahrer und eine qualitative Bewertung der Anzeige.

### **2.3.1 Diskussion der Effekte der Reibwertanzeige und des Fahrbahnzustandes auf die abhängigen Variablen Abstand und Geschwindigkeit auf den Abschnitten T1-T3**

Die Ergebnisse der Untersuchung legen nahe, dass die Anzeige allein keinen Effekt auf die objektiven Fahrparameter Abstand und Geschwindigkeit in den Abschnitten T1-T3 hat. Vielmehr wirkt sie sich stärker auf das Verhalten der Fahrer aus, je schlechter der Fahrbahnzustand wurde. Für den Abstand bedeutet dies, dass die Probanden ihn mit Verschlechterung des Wetters verringerten, wenn sie die Reibwertanzeige zur Verfügung hatten. Dieses Verhalten entspricht einem Verlust an Verkehrssicherheit. Im Gegenzug dazu verringerten die Fahrer mit zunehmenden Regen auch ihre Geschwindigkeit stärker, wenn die Reibwertanzeige vorhanden war, was einem Zugewinn an Verkehrssicherheit entspricht. Die Anzahl der Unfälle war mit und ohne Reibwertanzeige vergleichbar. Ein eindeutiger Effekt der Reibwertanzeige ist demnach für die Messabschnitte T1-T3 nicht festzustellen.

Bezüglich der Kritikalitätsbewertung der Fahrsituationen zeigte sich, dass eine Zunahme an Glätte durch stärkeren Regen auch zunehmend als kritischer bewertet wurde. Die Reibwertanzeige hatte jedoch keinen Effekt auf die Kritikalitätsbewertung.

### **2.3.2 Diskussion der Effekte der Reibwertanzeige auf die abhängigen Variablen Geschwindigkeit, Abstand und THW auf dem Abschnitt T4**

Im letzten Abschnitt der Testfahrt (T4) wurde den Probanden mit Reibwertanzeige diese sechs Sekunden vor der Änderung des Fahrbahnzustands gezeigt. In den vorherigen Abschnitten (T1-T3) geschah dies immer drei Sekunden vorher. Hiermit sollte überprüft werden, ob die Fahrer ihr Verhalten an die Information der Anzeige bereits anpassen, bevor sie eine baldige Änderung des Fahrbahnzustands durch Witterungsbedingungen (mehr Wolken am Himmel) absehen konnten. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Anzeige positive Effekte auf das Fahrverhalten der Probanden hatte. Diese passeten ihren Abstand und ihre Geschwindigkeit signifikant und frühzeitig an den zu erwartenden Fahrbahnzustand an. Der Abstand und der THW wurde vergrößert und die Geschwindigkeit verringert. Die Reibwertanzeige führte damit zu einem Sicherheitsgewinn. Aufgrund der Ergebnisse ist allerdings unklar, ob dieser Sicherheitsgewinn aufgrund der Veränderung des Vorwarnintervalls (Erhöhung von 3 Sekunden auf 6 Sekunden) oder aufgrund von Lernprozessen bei den Fahrern entstanden ist. Diese Frage müssten weitere Untersuchungen klären.

### **2.3.3 Diskussion der Ergebnisse zur Bewertung der Reibwertanzeige**

Die Probanden der Untersuchung bewerteten die Reibwertanzeige durchweg positiv. Sie wurde als nützlich, zufriedenstellend und hilfreich bewertet. Diese positive Bewertung beruhte hauptsächlich auf ihrem Warncharakter vor sich verschlechternden Fahrbahnzuständen und ihrer einfachen und gut verständlichen Gestaltung. Vereinzelt wurden die tiefe Positionierung in der Mittelkonsole und die geringe Anzahl von drei Abstufungen negativ bewertet. Interessanterweise gab ein Großteil der Fahrer nicht an, die Reibwertanzeige bei der Wahl ihrer Geschwindigkeit aktiv berücksichtigt zu haben. Eine Auswertung der Blicke der Probanden zeigte allerdings, dass sich die meisten Probanden der Anzeige zuwandten. Darüber hinaus wurde die

Reibwertänderung durch einen Ton begleitet, der kaum überhört werden konnte. Diese Diskrepanz der Antworten der Probanden und des tatsächlichen Verhaltens könnte z. B. durch die intuitive Gestaltung der Anzeige begründet sein. Beispielsweise beschreibt MOHS (2007), dass sich die intuitive Benutzung technischer Geräte dadurch kennzeichnet, dass ihre Nutzer ihre Aufmerksamkeit auf die Aufgabe (z. B. die Fahrzeugkontrolle) und nicht auf das Gerät (z. B. die Reibwertanzeige) lenken. Im Versuch könnte sich die Gestaltung der Anzeige so ausgewirkt haben, dass die Fahrer sie zwar angesehen und ihre Information als nützlich erachtet haben, sie im Nachhinein aber nicht als besonders wichtig bewertet haben, weil die Interaktion mit ihr so einfach war, dass sie keine besondere Aufmerksamkeit auf sich gezogen hat. Eine weniger optimistische Interpretation der Ergebnisse würde argumentieren, dass sich die Probanden der Anzeige zwar zuwendeten, die dort abgebildete Information aber nicht verarbeiteten und sie demnach bei ihrer Reaktion auf die sich verändernden Fahrbahnzustände (wie im Interview angegeben) auch nicht berücksichtigten. Zukünftige Untersuchungen, die Eyetracking einschließen, könnten weitere Erkenntnisse zur gefundenen Diskrepanz zwischen Verhalten und Selbstbericht liefern.

### **2.3.4 Limitationen**

Die vorliegende Untersuchung weist eine Reihe von Einschränkungen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten.

Die Studie wurde in einem statischen Fahrsimulator durchgeführt. Dies könnte es erschwert haben, das für die Abschätzung des Reibwertes relevante Fahrgefühl bei den Probanden hervorzurufen. Ob dieses überhaupt in einem Fahrsimulator realitätsnah erzeugt werden kann ist fraglich. Vermutlich können nur Versuchsfahrten in einem realen Fahrzeug dieses Gefühl beim Fahrer hervorrufen.

Der Versuch, die Motivationslage der Versuchsteilnehmer im Simulator abzubilden, ist eine weitere Schwierigkeit, die an dieser Stelle berücksichtigt werden muss. Die Probanden wurden instruiert, die Versuchsfahrt möglichst sicher zu absolvieren. Trotzdem kann nicht davon ausgegangen werden, dass simulierter Regen zur selben Risikoeinschätzung aufseiten der Fahrer führt wie Regen, auf den die Probanden im realen Verkehr treffen. Im Simulator haben Fahrfehler keine schwerwiegenden Konsequenzen, sodass mit einem Verhalten der Pro-

banden gerechnet werden muss, das von dem in der Realität gezeigten deutlich abweichen kann.

Eine weitere Einschränkung der Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse bezieht sich auf die Gestaltung der Anzeige des Reibwertes. Wie bereits beschrieben, stand die Gestaltung der Anzeige nicht im Fokus dieser Untersuchung. Dass Anzeigen im Fahrzeug einen sehr großen Einfluss auf das Verhalten der Fahrer haben können gilt in der Forschung zur Fahrer-Fahrzeug-Interaktion als bestätigt (siehe z. B. [ROCHE, 2018] und [BRANDENBURG, 2016]). Zukünftige Arbeiten sollten das Potenzial zur Beeinflussung des Fahrerverhaltens das in der Gestaltung der Anzeige verborgen geblieben ist, näher untersuchen.

Die genannten Einschränkungen könnten zu einer Veränderung der Stärke von Effekten oder gar zu einem Ausbleiben von Befunden in der Realität führen.

### 2.3.5 Ausblick

Nach der explorativen Analyse der Unfallfahrten bleiben weitere Forschungsfragen offen, die in zukünftigen Untersuchungen geklärt werden können. So könnte beispielsweise überprüft werden, ob die Probanden mit Unfall ein anderes Blickverhalten zeigen als diejenigen, die dieselbe Fahrt ohne Unfall absolvieren. Darüber hinaus wäre es von Interesse, ob sich die Probanden mit Unfall in Persönlichkeitsmerkmalen von denen ohne Unfall unterscheiden. Erkenntnisse hierzu könnten wiederum wichtige Informationen zur Gestaltung der Reibwertanzeige liefern.

Während die Analyse von Unfällen aus ethischen Gründen nur im Simulator stattfinden kann, wurde im Kapitel 2.3.4 zu den Limitationen der Untersuchung festgehalten, dass das für die Reibwertanzeige relevante Fahrgefühl und die dazugehörige Einschätzung des Risikos vermutlich nur in Feldversuchen herstellbar sind. Zukünftige Untersuchungen sollten daher die hier durchgeführte Studie in einer kontrollierten Felduntersuchung wiederholen. Darüber hinaus sollte der Gestaltung der Reibwertanzeige mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden. Neben dem Wissen der Probanden über den Reibwert bestimmt die Anzeige desselbigen zum Großteil was die Fahrer für Verhaltensweisen zeigen.

Trotz der aufgeführten Limitationen und der diskutierten Verbesserungsmöglichkeiten erbrachte die

vorliegende Untersuchung neue Erkenntnisse zur Reaktion von Fahrern auf prädiktive Anzeigen, wie die Reibwertanzeige.

## 3 Entwicklung eines Modells zur Zwischenschichtschätzung

Einen essenziellen Faktor bei der Schätzung des Reibwertes, stellt die Zwischenschichtschätzung dar. Hierbei wird beim Zustand der Straßenoberfläche zwischen trocken, feucht, nass und verschneit/vereist unterschieden. Zur Schätzung der Zwischenschicht werden neben fahrzeugeigenen Daten, wie der Außenlufttemperatur und der Wischergeschwindigkeit, Wetterparameter äußerer Quellen genutzt. Da sich im Rahmen des Projektes auf kostenlos verfügbare Messtechnik beschränkt werden soll, werden Wetterparameter von frei verfügbaren Wetterstationen verwendet.

Die Messroute, mit den zuvor fest definierten Bremspunkten, wurde so gewählt, dass die Wetterstationen einen möglichst geringen Abstand zu den Bremspunkten aufweisen. Die Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes unterliegen internationalen Standards und weisen ein breites Netz innerhalb Deutschlands auf (ca. 2.000 haupt- und nebenamtliche Wetter- und Niederschlagsstationen). Von den Wetterstationen wird zur Zwischenschichtschätzung die relative Luftfeuchtigkeit, sowie der Taupunkt genutzt. Des Weiteren wird auf Glättemeldeanlagen zurückgegriffen, welche vorrangig an Autobahnen stehen und von denen in Deutschland rund 1.300 Stationen existieren. Die Glättemeldeanlagen geben direkte Auskunft über den Straßenzustand und helfen bei der Zwischenschichtschätzung den Zustand feucht zu detektieren.

Da sowohl die Wetterstationen, als auch die Glättemeldeanlagen im Schnitt mehr als 10 km vom Fahrzeug entfernt liegen und die Daten nicht in Echtzeit abgegriffen werden können, d. h. dass die Aktualisierungsintervalle der Daten von 10 min – 1 Stunde variieren, ist die Qualität der Zwischenschichtschätzung stark von räumlichen und zeitlichen Eigenschaften abhängig. Außerdem kommt es vor allem bei Glättemeldeanlagen zu Messtechnikausfällen, da diese für den Winterdienst entwickelt wurden und somit im Sommer teilweise nicht gewartet werden.

### 3.1 Vorarbeiten

In zwei vorangegangenen Forschungsprojekten wurde nach einem geeigneten Wettermodell gesucht, welches für kleinskalige Bereiche Vorhersagen erstellen kann und beispielsweise das Mikroklima auf einer Brücke berechnet. Das numerische Wettervorhersagemodell WRF wurde als Regionalmodell WRF Urban genutzt und mit aufgezeichneten Messungen angepasst. Es wurde ein ausgewählter Zeitraum mit verschiedenen Stadtparametrisierungen für 1 km Auflösung modelliert.

#### 3.1.1 Wettermodell am Beispiel Deutscher Wetterdienst

Es gibt viele verschiedene Wettermodelle, die sich in horizontaler und vertikaler Auflösung unterscheiden. Eine genaue horizontale Auflösung führt zu einer detaillierten Bild des Geländes, wohingegen eine genaue vertikale Auflösung Konvektionsvorgänge und somit Niederschläge besser abbilden kann. Ein in Deutschland häufig verwendetes Wettermodell ist das Modell COSMO-DE (jetzt COSMO-D2) (Bild 3-1).

Der Deutsche Wetterdienst betreibt das Globalmodell ICON mit einer horizontalen Maschenweite von 13 km. Für detailliertere Vorhersagen im Bereich Europa wurde das Regionalmodell ICON-EU (ehemals COSMO-EU) implementiert, welches im wechselseitigen Datenaustausch mit dem ICON-Globalmodell steht und eine Gitterauflösung von 6,5 km besitzt. Der Raum Deutschland wiederum kann noch detaillierter aufgelöst werden. Dafür wird das Regionalmodell COSMO-D2 (ehemals COSMO-DE mit einer Maschenweite von 2,8 km) mit ei-

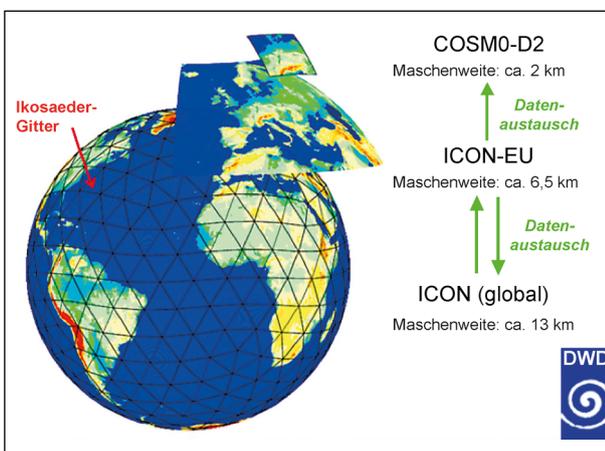


Bild 3-1: Aktuelle Modellkette (ICON, ICON-EU Nest, COSMO-D2) [Wetterdienst, 2018]

ner Maschenweite von 2,2 km, welches vom ICON-EU-Modell Daten erhält, genutzt.

Für eine genauere Schätzung des Straßenzustandes in Fahrzeughöhe wurde in den ersten beiden Teilprojekten von Juni 2014 bis Dezember 2016 die Freie Universität Berlin als externer Kooperationspartner beauftragt. Es sollte ein Wettermodell implementiert werden, welches Wetterparameter, wie beispielsweise die Bodentemperatur, in höherer räumlicher und zeitlicher Auflösung am Fahrzeug vorhersagt.

#### 3.1.2 Vorangegangenes Teilprojekt – FU Berlin

Da in Deutschland zum Zeitpunkt der ersten beiden Teilprojekte (Juni 2014 – Dezember 2016) üblicherweise mit dem COSMO-DE-Modell gearbeitet wurde, welches eine horizontale Auflösung von 2,8 km aufweist und dies somit nicht der Anforderung nach Wetterparameterschätzung in Fahrzeughöhe entspricht, wurde das amerikanische Regionalmodell WRF Urban (Weather Research and Forecast Model) genutzt, welches mit zusätzlicher Stadtparametrisierung zu einer besseren Auflösung von 1 km führen sollte.

Mit diesem Modell sollten die Wetterdaten für durchgeführte Messfahrten simuliert werden. Des Weiteren wurde versucht kleinskalige Effekte, wie Brücken zu simulieren und diese mit Realwerten aus Messfahrten zu vergleichen. Da die gewählte Messstrecke durch Berlin und Brandenburg und somit Großstadt und Landschaft verläuft, müssen unterschiedliche Effekte berücksichtigt werden.

Der Urban Heat Island Effect oder auch städtische Wärmeineleffekt ist ein Merkmal des Stadtklimas und ist durch die WMO (World Meteorological Organization) als ein durch Bebauung und Emissionen gegenüber dem Umland verändertes Lokalklima definiert. Die Bebauung von Gebäuden und Begrünung durch Pflanzen in Städten ist ein wichtiger Faktor für die urbane Atmosphäre. Hohe Gebäude werfen nicht nur lange Schatten und sorgen in dichter Bebauung für Straßenschluchten und Veränderung des Windes, sondern beeinflussen auch maßgeblich die eingehende und ausgehende Sonnenstrahlung. Der Urban Heat Island Effect trägt dazu bei, dass in Städten höhere Temperaturen als im Umland herrschen und im weitesten Sinne auch die Niederschlagsraten verändert werden [DWD, 2018].

### WRF Urban – Modellaufbau

Das WRF-Modell dient als numerisches Wettervorhersagemodell, ist aber auch durch städtische Parametrisierungsansätze als Regionalmodell WRF Urban nutzbar. Es werden vier Parametrisierungen unterschieden: Bulk-Scheme, SLUCM-Scheme, BEP-Scheme und BEP+BEM-Scheme.

Das Regionalmodell wird durch ein Globalmodell angetrieben. Um Probleme an den Rändern der Domäne (des zu betrachtenden Abschnittes) zu vermeiden, werden die Auflösungen von Global- zu Regionalmodell schrittweise verringert. Im Fall dieser Studie wurde ein two way-nesting durchgeführt. Beim two way-nesting gibt es einen Informationsaustausch zwischen grober aufgelösten und feiner aufgelösten Domänen in beide Richtungen. Die drei Domänen sind Mitteleuropa, Nord-Ost-Deutschland, sowie Berlin-Brandenburg. Die Start- und Randbedingungen, also Informationen über Transport- und Austauschprozesse in der Atmosphäre, am Rand einer Domäne, stammen aus GFS-Daten (Global Forecast System) und NCEP-Daten (National Centers for Environmental Prediction).

Da jede Gitterzelle den Strahlungshaushalt selbst modelliert, werden verschiedene geografische und morphologische Informationen benötigt. So wird anhand von Satellitendaten zwischen 44 Landnutzungsklassen unterschieden (Corine Land Cover), welche in einer 100 m Auflösung zur Verfügung stehen.

Da das WRF keine Gebäude auflösen kann wurden für den gewählten Parametrisierungsansatz statistische Informationen, wie der Verteilung von Gebäudehöhe und Gebäudefläche und Straßenbreite benötigt. Diese werden durch den Urban Atlas der EEA und die Gebäudeverteilung durch den Senat Berlin in etwa 5 m Auflösung zur Verfügung gestellt.

### WRF Urban – Ergebnisse

Der Zeitraum vom 02.06.2015 – 09.06.2015 wurde mit verschiedenen Stadtparametrisierungen modelliert. Die Modelldaten sind stündlich mit einer Gitterweite von 1 km aufgelöst.

Die modellierte Lufttemperatur wurde mit der Wetterstation der Freien Universität an der Fasanenstraße (Berlin Mitte) verglichen, da diese in dichtbesiedelten Gebiet aufgestellt ist. Die Bodentemperatur wurde mit Satellitendaten von MODIS verglichen. Dabei wurde die Lufttemperatur sehr gut simuliert

und die Bodentemperatur etwas überschätzt. Die relative Luftfeuchtigkeit wurde in allen Fällen durch das Modell unterschätzt. Das Einsetzen und Enden von Niederschlagsereignissen konnte das Modell kaum vorhersagen.

Ein Vergleich mit den am Fahrzeug gemessenen Werten zeigt teilweise starke Abweichungen. Diese sind beispielsweise auf die Beschattung durch einzelne Bäume zurückzuführen, welche in einem 1x1 km Gitter nicht aufgelöst werden können. An dieser Stelle wurde die Nutzung einer Fisheye-Kamera (Skyview) empfohlen.

Um das Modell selbst ohne dieses Wissen zu optimieren wurden Daten verschiedener Quellen (Wetterstationen, Satelliten usw.) dem Modell assimiliert. Außerdem wurden zuvor zugewiesene Landnutzungsklassen korrigiert. Hierdurch konnte eine Verbesserung der Werte erfolgen, sodass die relative Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur sehr gut simuliert werden können.

Aufgrund der Maschenweite von 1 km war es unter WRF Urban nicht möglich das Mikroklima auf einer Brücke zu bestimmen. Vor allem auf Brücken, welche über Gewässer führen, kann unerwartete Glätte eintreten, weshalb eine gute Schätzung essentiell ist. Die Bodentemperatur wird in nahezu allen Fällen im Mittel um 4,2 °C unterschätzt. Für ausgewählte Brücken wurde eine Simulation mit einer Maschenweite von 200 m durchgeführt. Allerdings zeigte die höhere Auflösung keine signifikante Verbesserung der Schätzwerte. Allerdings ist die Modellphysik nicht für Simulationen von Brückeneffekten ausgelegt, sodass eine höhere Auflösung grundsätzlich nicht zu besseren Ergebnissen führen kann.

## 3.2 Datenerhebung und -aufbereitung

Das Projekt wurde im Jahr 2014 gestartet. Seit Oktober 2014 werden auf einer festgelegten Teststrecke regelmäßig Messfahrten unternommen. Dabei werden einige Messdaten kontinuierlich aufgezeichnet. An bestimmten Streckenpunkten werden dann zusätzlich, ausgelöst durch eine Bremsung im ABS-Regelbereich, noch weitere Messdaten aufgezeichnet. Alle aufgezeichneten Rohdaten werden auf dem Server des Fachgebietes Kraftfahrzeugtechnik archiviert. Die aufbereiteten Daten der Bremsmanöver werden in einer Excel-Tabelle für weitere Auswertungen gespeichert.

### 3.2.1 Beschreibung der Messstrecke

Die Messstrecke ist ein festgelegter Rundkurs. Die Messstrecke verläuft dabei auf öffentlichen Straßen durch die Berliner Innenstadt sowie in Brandenburg über Land und über die Autobahn. An bestimmten Punkten wird während der Messfahrt eine Bremsung im ABS-Regelbereich ausgeführt (siehe Marker in Bild 3-2). Die Messstrecke ist rund 126 km lang und eine Messfahrt dauert je nach Verkehr zwischen 3,5 und 4,5 Stunden. Die TU Berlin stellt über den kontinuierlichen Streckenverlauf die Messstrecke in 1 m Auflösung (ca. 126.000 Datenpunkte) zur Verfügung. Jeder einzelne Datenpunkt des kontinuierlichen Streckenverlaufes beinhaltet dabei sowohl die GPS-Koordinaten als auch die GPS-Fahrbahnhöhe und die Fahrtrichtung in welcher die Messstrecke abgefahren wird.

### 3.2.2 Daten der Bremsmanöver

Die Aufzeichnung der Daten zu dem jeweiligen Bremsmanöver wird gestartet durch das Überschreiten von 170 bar Bremsdruck. Dadurch wird sichergestellt, dass die Bremsung im ABS-Regelbereich ausgeführt wird.

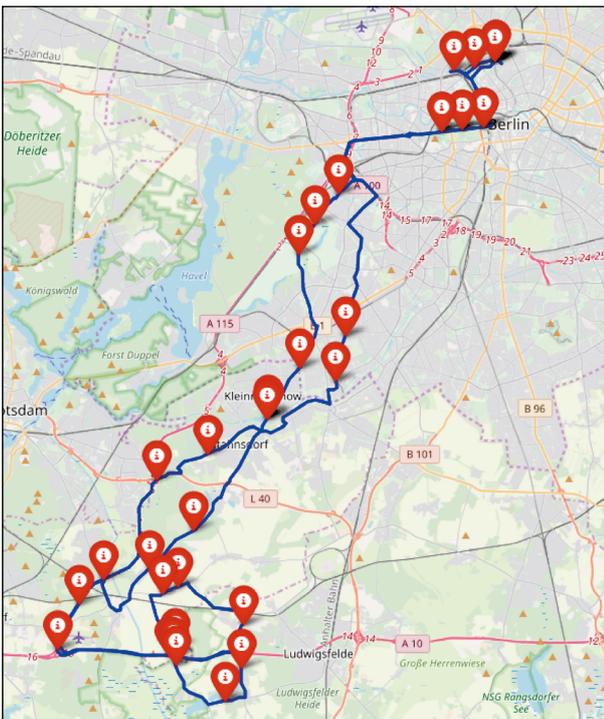


Bild 3-2: Die blaue Markierung zeigt den Verlauf der Messstrecke in Berlin und Brandenburg. Jedes rote Infofähnchen stellt dabei einen Bremspunkt dar (Kartengrundlage: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

Die aufbereiteten Daten der auf der Messstrecke ausgeführten Bremsmanöver wurden durch die TU Berlin im Zeitraum von Oktober 2014 bis Oktober 2018 zur Verfügung gestellt. Insgesamt sind das 4.198 durchgeführte und gültige Bremsmanöver.

Jedem Bremsmanöver werden GPS-Koordinaten sowie Datum und Uhrzeit zugeordnet. Außerdem werden die Art des Straßenbelages und die Information, ob sich der Bremspunkt auf einer Brücke befindet oder nicht, gespeichert. Des Weiteren werden die Umgebungstemperatur am Fahrzeug, der Betriebszustand des Scheibenwischers und Marwis- und Vaisala-Daten aufgezeichnet. Darüber hinaus wird die Fahreraussage zur aktuellen Niederschlagsituation sowie dem Zwischenschichtszustand erhoben. Der Fahrer muss vor jeder Bremsung den Zwischenschichtszustand einschätzen. Zusätzlich tätigt der Fahrer die Aussage, ob und wie viel Niederschlag aktuell fällt.

### 3.2.3 Kontinuierlich aufgezeichnete Messdaten während der Messfahrten

Neben den Messwerten während der Bremsungen an den Bremspunkten werden bei einer gesamten Messfahrt auch Daten kontinuierlich aufgezeichnet. So liegen die Fahrzeugdaten (Wischer an/aus, Außentemperatur) und die MARWIS-Daten mindestens 1-mal pro Sekunde vor. Messwerte mit einem sich über die Zeit ändernden Ort sind für die Wetteranalyse ungeeignet, da hier vor allem die Wetterdaten an einem Ort über die Zeit betrachtet werden. Aus diesem Grund wurden über die GPS-Koordinaten die Messdaten den zuvor definierten Streckenpunkten zugeordnet. Der Messwert muss dazu in einer Entfernung kleiner als 10 m zu einem Streckenpunkt liegen (siehe Bild 3-3).

Zeit:	10:00	10:01	10:02	10:03	10:04	10:05
Ort:	TP 1	-	TP 2	-	-	TP 3

Ort:	Zeit:
TP 1	10:00
TP 2	10:02
TP 3	10:05

Bild 3-3: Zuordnung der Messdaten zu den definierten Streckenpunkten (TP) über GPS

### 3.2.4 Skyview

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden Skyview-Messungen durchgeführt.

Wettermodelle nutzen Landnutzungsklassen um den Strahlungshaushalt der einzelnen Gebiete und somit jeder Gitterzelle zu simulieren. Für eine detailliertere Aussage bezüglich der Landnutzungsklasse wurde der Skyview-Faktor in Betracht gezogen.

Der Skyview-Faktor stellt ein Maß für die sichtbare Himmelsfläche dar und ist wichtig bei der Bestimmung von eingehender und ausgehender Wärmestrahlung von Fahrbahnoberflächen. Ein Faktor von 1 entspricht einer freien Sicht auf den gesamten Horizont, ein Wert von 0 entspricht keiner Sicht auf den Horizont.

Bei der Skyview-Messung durch die TU Berlin wurden folgende Daten an den 38 Bremspunkten aufgenommen:

- GPS-Koordinaten,
- Straßenoberfläche,
- Fahrrichtung (relevant für Sonneneinstrahlung),
- Skyview-Anteil Himmel, Skyview-Anteil Begrünung, Skyview-Anteil Bebauung.

Da keine Kamera mit 180° Linse und GPS synchroner Aufnahme vorhanden war, wurde die GPS synchrone Aufnahme von vier Videokameras, einer Video VBOX genutzt. Diese vier Kameras wurden in einer Halterung so positioniert, dass eine halbe Halbkugel abgefilmt werden konnte (Bild 3-4). Die Halterung wurde anschließend auf dem Dach eines Messfahrzeuges der TU Berlin montiert. Es wurden

zwei Messfahrten am 12.04.2018 durchgeführt, dabei wurde erst die linke Seite, dann die rechte Seite gefilmt. Die Laubbäume hatten zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausgetrieben.

Zur Verarbeitung der Videodateien wurden zunächst die Himmelsansichten an den Bremspunkten, über die GPS-Koordinaten extrahiert. Die Linzenverzerrung wurde beseitigt und die Kugelprojektion wurde aus den vier einzelnen Kamerabilddern zusammengesetzt. Die so entstandenen Zirkularbilder (siehe Bild 3-5 a)) wurden händisch weiterbearbeitet. Es wurden die Bildbereiche Himmel, Begrünung und Bebauung einzeln markiert und gefärbt. Wenn in einem Bildbereich durch das Geäst der Bäume der Himmel durchscheint, wird dieser Bereich als Begrünung markiert. Zur Unterscheidung von Sommer und Winter (Laubbäume) kann der Begrünungsanteil unterschiedlich stark gewichtet werden. Im Anschluss konnten die Farbanteile in den Bildern automatisch bestimmt werden. Bild 3-5 b) zeigt ein per Hand eingefärbtes Zirkularbild.

Das Bildmaterial ist für die gesamte Messstrecke verfügbar. Eine kontinuierliche Bestimmung des Skyviewfaktors entlang der gesamten Messstrecke (siehe Bild 3-2) per Hand ist jedoch mit einem zu großem Aufwand verbunden. Ein Bild alle 50 Meter ergibt über 2.500 auszuwertende Bilder. Aus diesem Grund wurde ein Algorithmus zur automatisierten Bildauswertung entwickelt. Zur Trennung der Himmelsflächen von den Umgebungsobjekten wurde eine Kantenerkennung auf Basis des Canny Algorithmus [CANNY, 1986] angewandt. Eine gezielte Betrachtung des blauen Farbkanals und verschiedene Filter zur Kontrastverstärkung erhöhen vor der Kantenerkennung den Kontrast von Himmel und

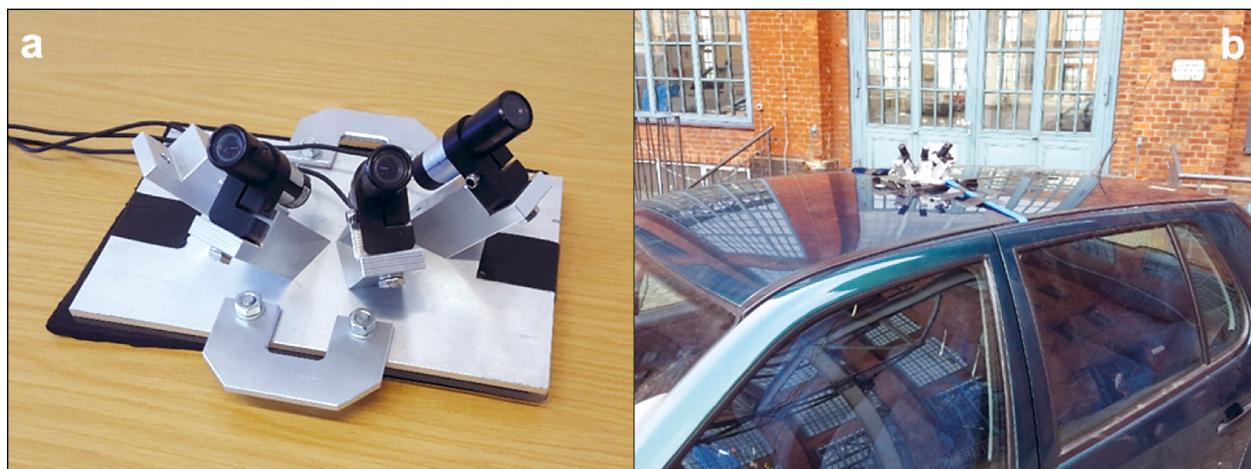


Bild 3-4: Kameras auf konstruierter Halterung a), Kamerasystem auf Messfahrzeug b)

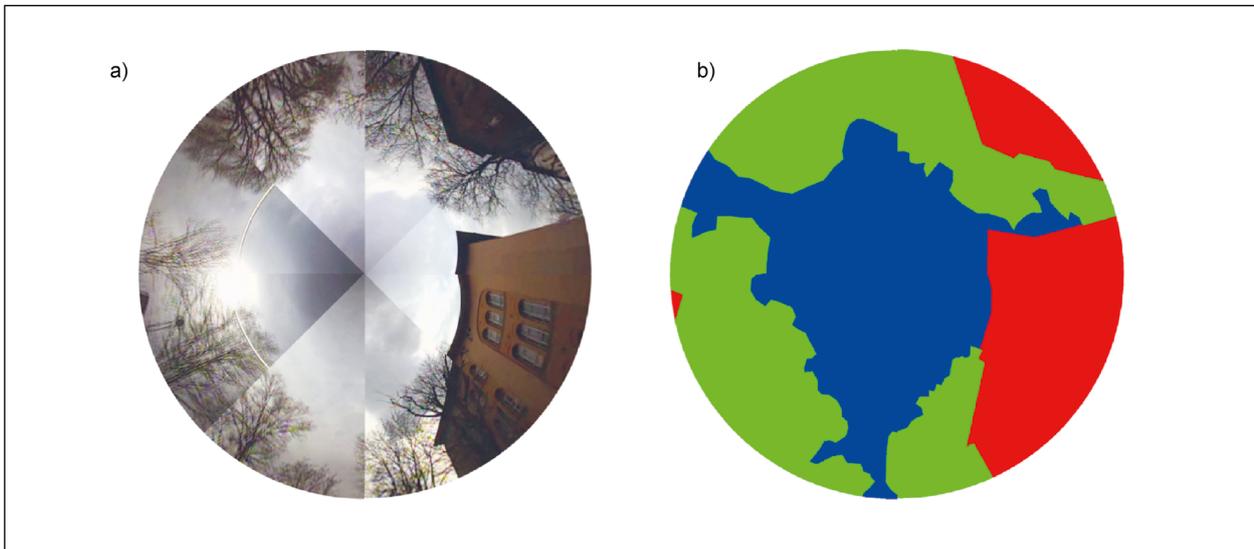


Bild 3-5: Zusammengesetzte Skyview-Aufnahmen a), händisch eingefärbte Bereiche b)

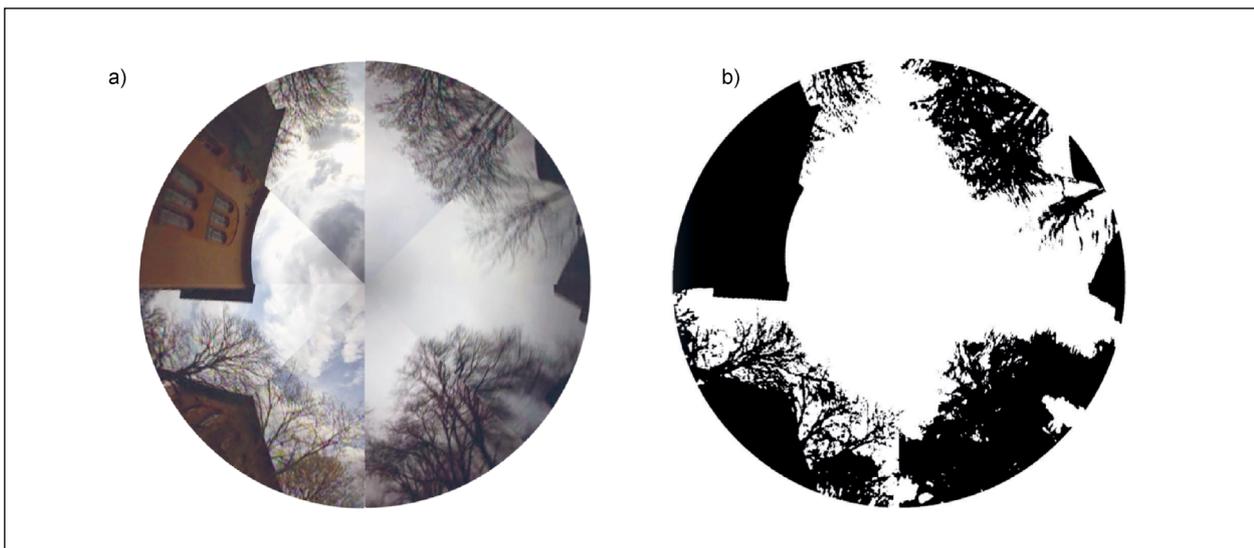


Bild 3-6: Zusammengesetzte Skyview-Aufnahmen a), automatisiert eingefärbte Bereiche b)

Umgebung. Nach der Kantenerkennung wurde durch eine Schwellwertoperation [OTSU, 1979] das Bild in Himmel und Nicht-Himmel Pixel zerlegt. Bild 3-6 b) zeigt ein automatisiert eingefärbtes Zirkularbild. Aufgrund der Arbeitsweise des Algorithmus ist eine Unterscheidung zwischen Vegetation und Bebauung nicht möglich, es wird nur zwischen Himmel und Nicht-Himmel unterschieden.

Zu Testzwecken wurden zusätzliche Videoaufnahmen im Sommer mit vollständig belaubten Bäumen aufgezeichnet. Ein Vergleich der Skyviewfaktoren zwischen Sommer und Winter zeigt, dass der entwickelte Algorithmus in der Lage ist, den Einfluss der Vegetation auf den Skyview-Faktor korrekt zu erkennen (siehe Bild 3-7).

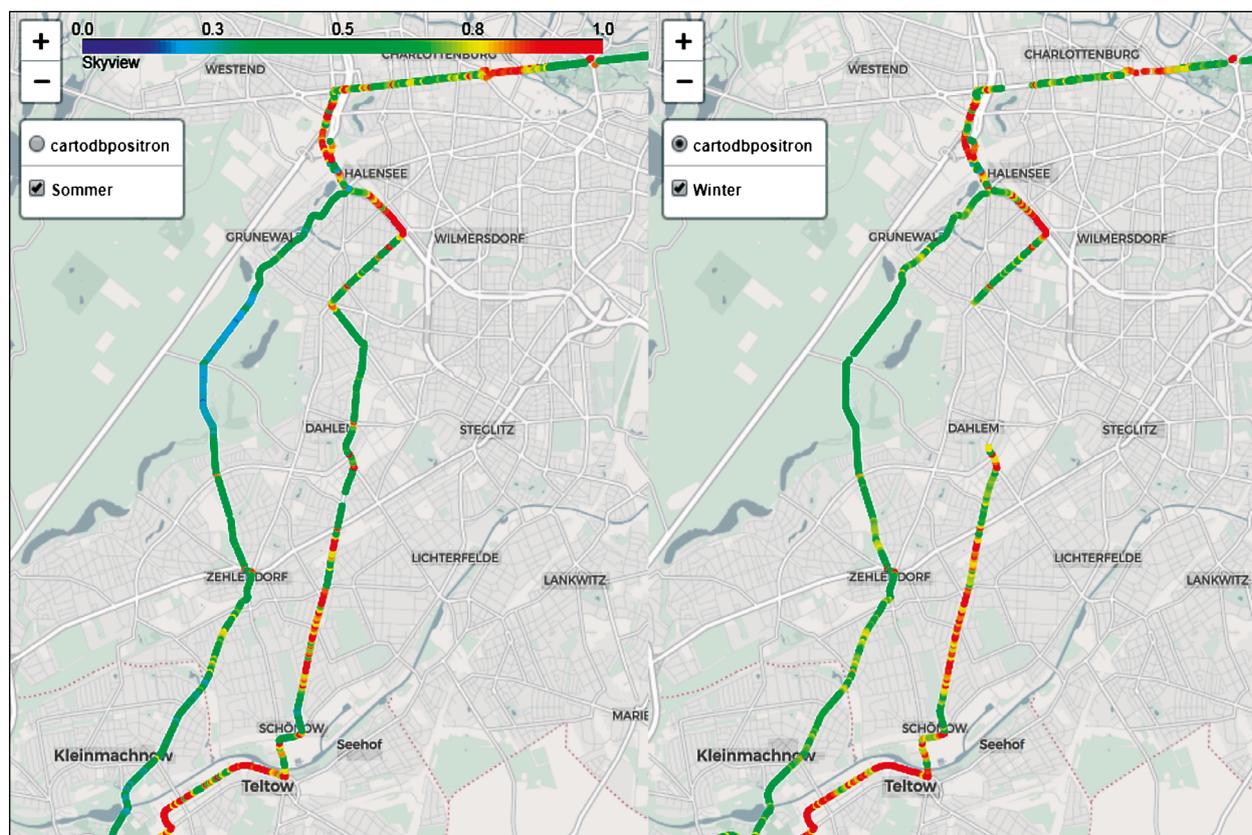


Bild 3-7: Vergleich der Skyviewfaktoren im Sommer (links) und im Winter (rechts). Einfluss der Vegetation auf den Skyviewfaktor. Skyview = 1 – freie Sicht auf den Horizont, Skyview = 0 – keine Sicht auf den Horizont. [© CARTO; Kartengrundlage: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA]

### 3.3 Entwicklung des Zwischenschichtmodells

In den ersten beiden Teilprojekten wurde ein Wettermodell mit 1 km Auflösung entwickelt, welches die Lufttemperatur sehr gut simulieren aber vor allem kleinskalige Effekte durch Abschattungen oder Brückeneffekte nicht abdecken konnte.

Da die Zwischenschichtschätzung weiter optimiert werden soll und die Ergebnisse aus den Forschungsprojekten nicht zufriedenstellend waren, wurde im dritten Projektteil die Meteo Service weather research GmbH als externer Kooperationspartner beauftragt.

Es soll ein kleinskaliges Wettermodell entwickelt werden, welches die Topologie, sowie Bewuchs, Straßenoberfläche, Bebauung, Sonne und Wind berücksichtigt und eine Zukunftsvorhersage von bis zu einer Stunde ermöglicht. Eine exakte Bestimmung der Zwischenschicht ist zwar erwünscht, jedoch durch eine begrenzte Auflösung der Messdaten in Zeit und Raum, sowie durch eine teilweise chaotische Verhaltensweise des Wetters nicht mög-

lich. Stattdessen werden durch die Meteo Service weather research GmbH (MSwr) Wahrscheinlichkeitsaussagen zum Zwischenschichtzustand getroffen.

In der Meteorologie existiert eine lange Tradition den wetterabhängigen Straßenzustand vorherzusagen, wobei neben der Zwischenschicht auch die Straßentemperatur eine wichtige Rolle spielt. Seit den 90er Jahren hat die Meteo Service weather research GmbH für den Winterdienst Straßenzustandsmodelle entwickelt, welche im Stundentakt Vorhersagen durchführen. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde unter Verwendung der Messwerte, welche an den Bremspunkten auf der Teststrecke in und um Berlin aufgezeichnet wurden, ein neues Modell zur Vorhersage der Zwischenschicht entwickelt, welches im 5-Minuten-Takt und mit feinerer Auflösung Vorhersagen erzeugt.

Das Zwischenschichtmodell benötigt für eine optimale Schätzung Echtzeitdaten. Allerdings liegen die Daten der Wetterstationen lediglich alle 10 Minuten vor, zusätzlich gibt es einen zeitlichen Versatz durch die Übertragung der Daten. Radardaten

sind alle 5 Minuten verfügbar, müssen jedoch aufbereitet werden, weshalb sie nicht unmittelbar zur Verfügung stehen. Mittels meteorologischer und statistischer Modelle können diese Intervalldaten für die Echtzeitverwendung aufgearbeitet werden.

Das Modell verwendet die Taupunkttemperatur der Luft und die Oberflächentemperatur der Straße. Rundumbildaufnahmen des Himmels (Skyview) können bei der Einschätzung helfen, inwieweit die Straßenoberfläche von der Sonne beschienen wird.

Für die Vorhersage, wie sich das Wetter auf die Straßenoberflächentemperatur auswirkt, wird ein Modell entwickelt, das 3D-Kartendaten verwendet.

### 3.3.1 Meteorologie der Straße

Die wichtigsten Einflussgrößen bei der Zwischenschichtvorhersage sind Niederschlag und Strahlung. Auftretender Niederschlag bedeutet, dass früher oder später die Fahrbahn feucht, nass oder verschneit ist. Im Umkehrschluss kann man aus fehlendem Niederschlag aber nicht auf eine trockene Fahrbahn schließen. Neben dem Niederschlag hängt die Zwischenschicht von weiteren Faktoren ab. Einen großen Einfluss haben die Strahlung der Sonne, die Umgebungsstrahlung sowie die Abstrahlung der Straßenoberfläche. Ein feuchter Straßenabschnitt in der Sonne trocknet schneller als ein Straßenabschnitt, welcher sich im Schatten eines Gebäudes oder Baumes befindet. Strahlung beeinflusst ebenfalls die Straßentemperatur. Auch wenn sich vor der Sonne Wolken befinden, wirkt die diffuse Strahlung auf die Straßentemperatur aus. Kalt- feuchte Bedingungen können zu Kondensation führen, wobei die Feuchte aus der Luft auf der Straße kondensiert. Herrschen Temperaturen unter 0 °C, entsteht durch Resublimation Reif auf der Straße. Alle diese Faktoren können den Zwischenschichtzustand beeinflussen. Vor allem im Winter kann die Zwischenschicht auf einem kurzen Straßenabschnitt zwischen trocken, feucht und Reif wechseln.

Wenn es um lokale Erscheinungen geht, kann die numerische Wettervorhersage zwar Aussagen darüber treffen, was passiert, allerdings nicht wo und wann es passieren wird. Feine Details wie einzelne Niederschlagszellen werden berechnet, sind jedoch ungenau bezüglich des Ortes und der Zeit des Auftretens. Mittels Radar ist es möglich, den Niederschlag mit einer Auflösung von derzeit 1 km zu

beobachten. Dadurch bietet sich eine wesentlich genauere Darstellung der Atmosphäre. Bei den Vorhersagen des Straßenzustands wird eine Auflösung von wenigen Metern angestrebt. Um diese zu erreichen, ist es notwendig die lokalen Randbedingungen zu betrachten.

Bei der Vorhersage der Zwischenschicht geht es vorrangig darum Wasser auf der Straße zu detektieren. Die Wassermenge berechnet sich aus der Summe von Zuführung und Ableitung in der Form von Niederschlag, Versickerung, Kondensation und Verdampfung. Erscheinungen bei Temperaturen unter 0 °C, Reifbildung, Gefrieren sowie Auftauen, werden allerdings mangels genügender Beobachtungsgrundlage nicht untersucht. Bis auf die Straßenoberflächentemperatur sind alle wesentlichen Parameter aus der numerischen Wettervorhersage und der Radarbeobachtung verfügbar.

Die Straßenoberflächentemperatur ist wichtig für die Verdampfung und Kondensation. Sie berechnet sich hauptsächlich aus dem Transport von Energie in der Form von Strahlung und aus der Speicherung von Energie im Boden. Dabei spielen Schatten und indirekte Strahlung eine wichtige Rolle für die Erklärung lokaler Unterschiede.

### 3.3.2 Datenvorbereitung

Bei der Datenaufbereitung wurden lediglich Bremsereignisse genutzt, welche vollständig waren, d. h. bei welchem alle zu nutzenden Parameter vorhanden waren. Fälle, bei denen nur ein Parameter fehlt, wurden im Weiteren nicht berücksichtigt. Ein Fall ist dabei definiert als eine Messung der Zwischenschicht an einem Bremspunkt in Verbindung mit einem Bremsereignis. Die Bestimmung des Zwischenschichtzustandes erfolgte durch den Fahrer. Dieser kategorisierte die Zwischenschicht der Fahrbahnoberfläche als: trocken, feucht, nass oder verschneit. Folgende Daten wurden für das Schätzmodell verwendet:

- Visuelle Einschätzung der Zwischenschicht durch den Fahrer,
- Niederschlagsmenge abgeleitet aus dem Radarbild,
- Taupunkttemperatur einer nahegelegenen Wetterstation,
- Straßenoberflächentemperatur (RST),

- Wischergeschwindigkeit.

Insgesamt wurden 1.796 Fälle verwendet. Diese Fälle wurden an 68 Tagen in der Zeit vom 28. April 2015 bis 30. Oktober 2018 aufgenommen. Eine Liste der Tage befindet sich in Tabelle A-3 im Anhang.

Die Straßenoberflächentemperatur wurde mit einem MARWIS vermessen. Bei einer späteren operationellen Anwendung sollen Vorhersagen der Straßenoberflächentemperatur eingesetzt werden. Auf diese Weise wird das Modell in der Optimierungsphase optimal an die Eigenschaften des Radars angepasst. Eine unerwünschte Anpassung an den Vorhersagefehler der Straßenoberflächentemperatur wird somit vermieden. Die Vorhersage der Straßenoberflächentemperatur soll separat erfolgen.

Der Wind spielt vermutlich nur eine untergeordnete Rolle und wurde somit nicht untersucht.

Die gefallene Niederschlagsmenge stellt eine entscheidende Größe bei der Schätzung der Zwischenschicht dar. Die Verwendung von Radardaten ist eine gute Hilfsgröße, welche allerdings nicht fehlerfrei ist.

Es wird angenommen, dass die Niederschlagsmenge aus einem Radarbild, mittels der Z-R-Beziehung, geschätzt werden kann. Das Radar misst ein Echo, welches durch den Reflektivitätsfaktor Z definiert ist. Dieser ist abhängig von der Anzahl der Tropfen und in geringerem Maße von der Größe. Damit eine Niederschlagshöhe bestimmt werden kann, wird die Niederschlagsintensität R aus dem Reflektivitätsfaktor Z abgeleitet (Z-R-Beziehung). Die Z-R-Beziehung ist ungenau, da sie in Abhängigkeit zur Tröpfchengröße steht. Des Weiteren wurde bei der Entwicklung des Vorhersagemodells auf Tau- und Reifbildung verzichtet. Es wurde angenommen, dass der Straßentyp bekannt ist und sich dieser in einem guten Zustand befindet (Wasser kann ablaufen, keine Pfützenbildung). Die Verdunstung wird über die Straßentemperatur, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Taupunkttemperatur bestimmt.

Das Modell zur Vorhersage der Zwischenschicht geht davon aus, dass Flüssigkeit in Form von Niederschlag fällt. Wenn diese Flüssigkeit auf die Straße trifft, läuft diese teilweise sofort ab, bis eine geringe Schicht zurückbleibt. Das verbliebene Wasser verdunstet unter Einfluss der Straßentemperatur und anderer Faktoren, bis die Straße wieder tro-

cken ist. Die meteorologischen Werte werden entweder lokal oder in näherer Umgebung gemessen, oder mittels statistischer Verfahren geschätzt.

Feste Formen der Zwischenschicht wie Schnee oder Eis wurden im Rahmen des Projektes nicht untersucht. Diese Erscheinungen werden für den Winterdienst vorhergesagt. Es ist die Straßenoberflächentemperatur, welche dabei eine entscheidende Rolle spielt.

### **Radarbild des DWD**

Die Radar-Daten des DWD liegen im 5-Minuten-Takt und 1x1 km Auflösung vor. Bei stratiformen Niederschlag, also gleichförmigen, langanhaltenden Niederschlag und einer geschlossenen Wolkendecke, ist das Radarbild unproblematisch und gut analysierbar. Der Niederschlag ist über große Gebiete einheitlich. Bei konvektiven Ereignissen hingegen, ist das Ereignis räumlich und zeitlich stark eingegrenzt. Eine Gewitterwolke oder Zelle, kann einen Durchmesser von wenigen Kilometern, was nur geringfügig größer als die gewählte räumliche Auflösung ist, besitzen.

Es gibt verschiedene Probleme, die bei diesen Daten zu berücksichtigen sind. Das Radarbild enthält viele falsche Echos, beispielsweise von Windkraftträdern oder dem 5-GHz-Netz. Diese wurden teilweise bereits durch den DWD entfernt. Jedoch sind viele der Bilder und Pixel immer noch fehlerhaft. Da die statistische Verarbeitung viel höhere Ansprüche stellt als die tägliche Wettervorhersage, wurde eine weitere Bereinigung durchgeführt. Für Echos, welche entstehen wenn der Radarstrahl an weit entfernten und hohen Tröpfchen reflektiert und dadurch als niedriger Niederschlag dargestellt wird, ist noch keine Lösung gefunden. Diese Echos haben ein gleiches Erscheinungsbild wie normaler Niederschlag, was eine Detektion erschwert. Allerdings tritt diese Erscheinung nur sehr selten auf. Möglicherweise kann eine Validierung unter Verwendung von Satellitenbildern diesbezüglich nützlich sein.

Ebenso ist es möglich, dass der Niederschlag, welcher im Radarbild zu erkennen war, nicht den Boden erreicht, weil er vorher verdunstet ist. Ein dargestelltes Echo muss also nicht unbedingt Niederschlag am Boden bedeuten. Diese Effekte sind zu untersuchen. Eine Vermeidung dieser falsch detektierten Niederschläge ist mit den derzeitigen Techniken nicht möglich.

Liegt ein Messpunkt am Rand einer Zelle, oder ist die Position ungenau, kann dies zu keinem detektierten Niederschlag führen, da nur in der Nachbarzelle das Regenradar Niederschlag darstellt. Zur Vermeidung dieses Fehlers wurde das Programm für die Verarbeitung der Radardaten erweitert, so dass auch die umliegenden Pixel berücksichtigt werden.

Die zeitliche Auflösung beträgt fünf Minuten. Während dieser Zeit kann eine Zelle über einen Pixel ziehen, ohne dass sie vorher oder nachher ein Radarecho erzeugt. Auf den einzelnen Bildern sieht es so aus, als ob kein Niederschlag gefallen ist. Zur Vermeidung dieses Problems wurde eine zeitliche Interpolation auf Minutentaktung entwickelt. Dazu wird aus dem Radarbild die Verlagerungsrichtung und -geschwindigkeit geschätzt. Mithilfe dieses Vektors wird dann das Radarbild für die dazwischenliegenden vier Minuten geschätzt. Ein Wachstum oder Schwund der Zelle wird nicht berücksichtigt. Im operationellen Geschäft ist auch eine Vorhersage für die nächsten zehn Minuten möglich. Aus der Reflektivität des Radarbildes wird mithilfe der Z-R-Beziehung eine Niederschlagsmenge abgeleitet. Das ist eine Schätzung und aus verschiedenen Gründen kann diese leicht um einen Faktor vier oder mehr abweichen.

### **GMA-Stationen**

Die Beobachtungsdaten von GMA-Stationen sind wichtig, da diese die Straßenoberflächentemperatur messen, welche eine entscheidende Rolle bei der Verdunstung spielt.

Jedoch werden die Stationen je nach Bundesland gut, schlecht oder sehr schlecht gewartet. Dies führt zu Artefakten in den Beobachtungen. Einzelne große Abweichungen können die statistische Untersuchung unbrauchbar machen. Darum wurde in eine Software zur Kontrolle der historischen GMA-Daten investiert. Diese Software ist seit Mitte August 2018 verfügbar.

### **3.3.3 Modell MS\_MO**

Die MOS-Vorhersagen sind Teil der MSwr-Software und diese sind an Orten der SYNOP-Stationen verfügbar. Zur Verwendung von historischen MOS-Vorhersagen an den GMA-Stationen und den Bremspunkten ist eine Variante der Software entwickelt worden, welche die historischen MOS-Vorhersagen

an Interpolationspunkten berechnet. Bei den Streckendaten wird kein MOS verwendet. Stattdessen wird auf Beobachtungen von benachbarten Stationen zurückgegriffen. Das erzeugt einen räumlichen Fehler, der sich aber im Vergleich zu den Ungenauigkeiten bei der Z-R-Relation im kleinen Rahmen hält.

### **Methode**

Eine Kombination aus schrittweiser logistischer Regression und einem Entscheidungsbaum wird zur Modellierung des Straßenoberflächenzustands verwendet. Die logistische Regression wurde mit maximal 20 Wiederholungen optimiert. Die Prädiktoren wurden einzeln hinzugefügt. Sobald die Signifikanz des nächsten Prädiktors unter 99 % sank, wurden keine weiteren Prädiktoren mehr ergänzt. Der verwendete Entscheidungsbaum ist ein einfaches Regelwerk in Abhängigkeit der aus dem Radar abgeleiteten Niederschlagsmenge der vergangenen 30 Minuten.

### **Prädiktorenauswahl**

Die Radardaten wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bezogen. Verwendet wurde das 1-km-Komposit-Radarbild für Deutschland. Es hat eine Auflösung von 1x1 km und wird im 5-Minuten-Takt erzeugt. Die im Radarbild vorhandene Reflektivität wurde empirisch auf Niederschlagsmengen umgerechnet und auf die Bremspunkte interpoliert. Im Modell werden die Radarbilder der letzten sechs Stunden vor dem Bremsereignis verwendet. Eine Untersuchung der Radarbilder der letzten sechs bis zwölf Stunden brachte bei der vorliegenden Datenmenge keine signifikanten Ergebnisse.

Zunächst wurden binäre Prädiktoren definiert, um die Zwischenschicht bestmöglich zu unterscheiden (Straße trocken oder feucht/nass). Der Prädiktor ist gleich eins, wenn die Summe der Niederschlagsmenge während eines Zeitfensters einen Schwellwert, basierend auf der zu erwartenden Verdunstung, übersteigt, ansonsten ist dieser null. Die zu erwartende Verdunstung ist eine auf meteorologischen Durchschnittswerten basierende Schätzung. Bei geringem Niederschlag ist eine trockene Straße, bei höherem Niederschlag ist eine nasse Straße zu erwarten. Die Länge des Zeitfensters und der Schwellwert sind in Tabelle 3-1 aufgelistet.

	Zeitfenster vor dem Ereignis in Minuten	Schwellwert in mm
R1	0 – 30	0,2
R2	30 – 60	0,3
R3	60 – 120	1,0
R4	120 – 180	2,0
R5	240 – 360	5,0

Tab. 3-1: Zeitfenster und Schwellwert für die binären Niederschlagsprädiktoren R1 bis R5

### Versickerung

Wenn sich viel Wasser auf der Straße befindet, läuft ein Teil davon ab oder versickert durch den offenen Asphalt im Unterboden. Dieser Effekt wird nicht separat modelliert, denn er wird von der Konstante der Regression ausreichend abgedeckt.

### Verdunstung und Kondensation

Das Wasser auf der Straße verdunstet langsam. Es gibt komplexe meteorologische Formeln, die das in Abhängigkeit von vielen Parametern genau beschreiben. Diese Formeln sind nur sinnvoll, wenn die Eingangsgrößen entsprechend genau sind, was hier leider nicht gegeben ist. Es wird deshalb auf eine sehr einfache Darstellung der Verdunstung, definiert als Straßenoberflächentemperatur minus Taupunkttemperatur zurückgegriffen.

Bei der Kondensation schlägt Feuchte aus der Luft auf die Straße nieder. Auch hier wird die Straßenoberflächentemperatur minus Taupunkttemperatur verwendet, jedoch werden nur negative Werte genutzt. Ist die Straßenoberflächentemperatur höher als die Taupunkttemperatur, tritt keine Kondensation auf und der Prädiktor ist per Definition gleich null.

Da die Taupunkttemperatur eine hervorragende Persistenz in Raum und Zeit hat, kann auf eine benachbarte Wetterstation zurückgegriffen werden, sogar dann, wenn diese viele Kilometer entfernt liegt. Die Straßenoberflächentemperatur ist dagegen stark von lokalen Einflüssen abhängig.

#### 3.3.4 Optimierte Modell MS\_MO

##### Allgemeine Form der logistischen Regression

Mithilfe der logistischen Regression wurde das in Formel (3.1) dargestellte Modell abgeleitet.

	Prädiktor	Vorschrift
Verdunstung	(RST - TDw)	RST - TDw
Kondensation	(RST - TDw)*	MINIMUM(0, RST - TDw)

Tab. 3-2: Übersicht der Verwendung von Straßenoberflächentemperatur (RST) und Taupunkttemperatur für Prädiktoren im Modell

$$P(\%) = \left( 1 + e^{(-(-0.83 + 3.26 \cdot R_1 + 2.12 \cdot R_2 + 2.40 \cdot R_3 + 0.88 \cdot R_4 + 1.35 \cdot R_5 - 0.42(RST - TDw) + 1.15(RST - TDw)^*))} \right)^{-1} \quad (3.1)$$

$P(\%)$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich Feuchtigkeit auf der Straße befindet. R1 bis R5 sind wie in Tabelle 3-1 definiert. Die Definition für die Verdunstung und Kondensation liegen in Tabelle 3-2 vor.

### Allgemeine Form des Entscheidungsbaums

Neben der logistischen Regression wird ein einfacher Entscheidungsbaum verwendet, welcher die Fälle  $> 1$  mm und die Fälle  $< 1$  mm Niederschlag (im Radarbild der vergangenen dreißig Minuten) unterscheidet. Gibt es weniger Niederschlag, wird die Vorhersage der logistischen Regression verwendet. Fällt mehr Niederschlag, wird eine hohe Wahrscheinlichkeit von 80 % angesetzt, sodass die Straße als nass definiert ist.

Die auf diese Weise vorhergesagte Wahrscheinlichkeit für eine nasse Straße kann benutzt werden, um das Fahrverhalten anzupassen.

Gibt es separates Fahrverhalten für nass und trocken, ist eine Grenze bei einer Wahrscheinlichkeit zu ziehen, welche die Kosten einer Fehlentscheidung berücksichtigt. Gibt es mehrere mögliche Fahrverhalten, sind entsprechend mehrere Grenzen festzulegen.

$$MS_{MO}(\%) = \begin{cases} P(\%), & RR1 < 1 \\ 0.80, & RR1 \geq 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

### Vorhersage der Straßenoberflächentemperatur

Am empfindlichsten reagiert das Modell auf einen Vorhersagefehler der RST, wenn kein Niederschlag im Radar zu erkennen ist und die RST nahe der Taupunkttemperatur liegt. Bei einem Fehler von  $1^\circ\text{C}$  RST ändert sich die Wahrscheinlichkeit um 13 %. In allen anderen Fällen ist der Einfluss gering.

ger. Bei 0,5 mm Niederschlag oder wenn der Taupunkt 5 °C von der RST entfernt liegt, ändert sich die Wahrscheinlichkeit um weniger als 1 %.

Erfahrungsgemäß liegt der mittlere Vorhersagefehler der RST nachts an einer GMA-Station um 0,8 °C. Tagsüber, wenn die Sonne scheint, kann die RST stark ansteigen und der Vorhersagefehler wird größer. Das spielt jedoch nur selten eine Rolle, weil der Unterschied zur Taupunkttemperatur dann ebenfalls groß ist und die Änderung der Wahrscheinlichkeit weniger als 1 % beträgt. Inwieweit sich Bebauung auf die RST auswirkt, soll noch untersucht werden.

### 3.3.5 Validierung

#### Validierungsmethode

Auf Basis der Wahrheitstabelle (siehe Bild 3-8) können unter anderen die folgenden drei Indikatoren berechnet werden:

$$\text{Hit - Rate (nass)} = \frac{H}{H + M} \quad (3.3)$$

$$\text{Hit - Rate (trocken)} = \frac{CN}{CN + M} \quad (3.4)$$

$$\text{False - Alarm - Rate} = \frac{FA}{FA + H} \quad (3.5)$$

Zu beachten ist der Unterschied in der Definition der Hit-Rate (nass) und Hit-Rate (trocken). Die Hit-Rate für „nass“ gibt an, für welchen Teil der Fälle, in welchen der Zwischenschichtzustand nass war, auch nass vorhergesagt wurde. Fälle, bei denen der Zwischenschichtzustand trocken war und auch trocken vorhergesagt wurde, entsprechen der Hit-Rate (trocken). Die Definition für Hit-Rate (trocken) wurde verwendet, um das Risiko einer unvorhergesagten Nässe auf der Straße zu beachten.

Vorhersage			
Trocken	Nass		
Richtig Negativ (CN)	Falsch Positiv (FA)	Trocken	Beobachtung der Zwischenschicht
Falsch Negativ (M)	Richtig Positiv (H)	Nass	

Bild 3-8: Wahrheitstabelle für die Validierung von Vorhersagen gegenüber Beobachtungen

### Auswahl der Entscheidungsgrenze trocken vs. nass

Die Wahl der Entscheidungsgrenze wirkt sich auf die Indikatoren aus. Wird eine Hit-Rate (nass) von 100 % gewünscht, kann dies mit einer Entscheidungsgrenze von null realisiert werden, aber die Hit-Rate (trocken) verläuft folglich gegen null und die False-Alarm-Rate steigt schnell an (Vergleich Bild 3-9). Für den Fall, dass eine Hit-Rate (trocken) von 100 % gewünscht ist, lässt sich dies auch realisieren (Bild 3-10).

### Wichtigkeit der Prädiktoren

Zur Einschätzung, wie wichtig die einzelnen Prädiktoren sind, wurde das Modell mit verschiedenen Kombinationen von Prädiktoren berechnet. Als Referenz-Konfiguration wird ein einfaches Modell verwendet, welches nur den Scheibenwischer als Prädiktor nutzt.

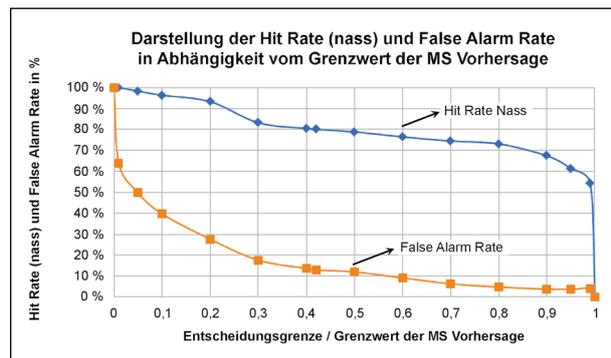


Bild 3-9: Rate des Modells MS\_MO als eine Funktion der Entscheidungsgrenze. In Blau ist die Hit-Rate (nass), in Orange die False- Alarm-Rate dargestellt

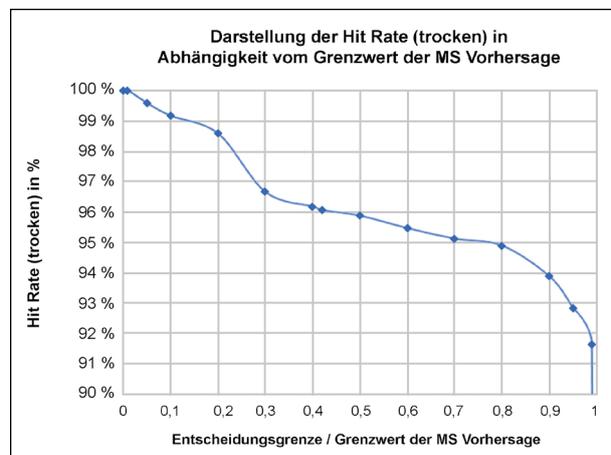


Bild 3-10: Rate des Modells MS\_MO als eine Funktion der Entscheidungsgrenze. In Blau ist die Hit-Rate (trocken) mit einer verkürzten vertikalen Achse dargestellt

Modell Konfiguration	Prädiktoren	Hit Rate (nass)	Hit Rate (trocken)	Hit Rate (all)
(1)	Scheibenwischer	51 %	91 %	91 %
(2)	Verdunstung Kondensation	50 %	91 %	90 %
(3)	Verdunstung Kondensation Scheibenwischer	55 %	92 %	91 %
(4) MS_MO	Verdunstung Kondensation Radar	80 %	96 %	95 %
(5)	Verdunstung Kondensation Radar Scheibenwischer	82 %	96 %	95 %

Tab. 3-3: Vergleich der Modelle bei verschiedenen Prädiktoren

Um die Daten vergleichbar zu machen, wurde bei jeder Konfiguration die Entscheidungsgrenze trocken/nass so gewählt, dass die False-Alarm-Rate 13 % beträgt. Das entspricht einer Entscheidungsgrenze zwischen 40 % und 60 %. Für das Standardmodell MS\_MO liegt die Grenze bei 42 % (Bild 3-9 und Bild 3-10).

Aus Tabelle 3-3 gehen die radarbasierten binären Niederschlagsprädiktoren als wichtigste Prädiktoren hervor. Verdunstung und Kondensation sind nicht besser als die Referenz, welche nur auf der Scheibenwischerinformation basiert. Es ist die Kombination aus Verdunstung, Kondensation und Radar, welche die Hit-Rate (nass) auf 80 % und die Hit-Rate (trocken) auf 96 % steigen lässt. Das Hinzunehmen der Scheibenwischerinformation bringt zusätzlich eine kleine Verbesserung.

### Kreuzvalidierungsverfahren

Zur Abschätzung inwieweit das Modell übermäßig an den Datensatz anstatt der Realität angepasst ist, werden zwei Varianten der Kreuzvalidierung verwendet. In der ersten Variante werden die Fälle willkürlich auf zwei Gruppen aufgeteilt. Es wird zweimal gerechnet, wobei jeweils die eine Gruppe für die Optimierung und die andere Gruppe für die Validierung verwendet wird. In der zweiten Variante werden die Fälle der Zeit nach in fünf Gruppen verteilt. Es wird fünf Mal gerechnet, wobei jeweils die Fälle aus vier Gruppen zur Optimierung verwendet werden und eine Gruppe zur Validierung verwendet wird.

Die Kreuzvalidierung zeigt eine mögliche Überanpassung von 0,5 % bis 2 % bei der Hit-Rate und der

Variante	Hit Rate (nass)	Hit Rate (trocken)	False-Alarm-Rate
Willkürlich (2 Gruppen)	-0,7 %	-0,5 %	-1,8 %
Nach Zeit (5 Gruppen)	-0,8 %	-0,4 %	-2,4 %

Tab. 3-4: Änderung der Rate beim Kreuzvalidierungsverfahren. Hit Rate (nass) von -0,7 % bedeutet, dass die Rate, die an den kleineren aber unabhängigen Datensatz optimiert ist, 0,7 % niedriger ist als die Rate, die auf den vollständigen aber abhängigen Datensatz optimiert ist.

False-Alarm-Rate (Tabelle 3-4). Diese Werte sind unproblematisch.

### Statistische Zuverlässigkeit

Bei einer Wahrscheinlichkeitsvorhersage soll überprüft werden, ob das Ereignis ebenso oft eintritt wie vorhergesagt. Bei einer Vorhersage von beispielsweise 90 % ist zu erwarten, dass das Ereignis in 9 von 10 Fällen eintritt. Tritt es wesentlich häufiger oder seltener ein, ist die Vorhersage unzuverlässig. In Bild 3-11 sind die Vorhersagen für Nässe auf der Straße gegenüber den eingetretenen Beobachtungen für das Modell „MS\_MO“ dargestellt. Die Daten weichen nur gering von der perfekten Diagonale ab und die Vorhersagen werden als ausreichend zuverlässig akzeptiert

Die Wahrscheinlichkeit für eine trockene Straße ist gleich 1 minus die Wahrscheinlichkeit für eine nasse Straße. In Tabelle 3-5 wird sie für einige Schwellwerte zwischen 90 % und 100 % aufgelistet. Die vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten auf der linken Seite passen gut zu den eingetretenen Ereignissen.

Vorhergesagte Wahrscheinlichkeit (trocken)	Vorhergesagte Fälle	Davon beobachtet als trocken	Eingetreten in Prozent	Anteil an der Gesamtzahl der Fälle in Prozent
99,98 % – 100 %	649	649	100,0 %	43 %
99,6 % – 99,98 %	325	325	100,0 %	22 %
97,5 % – 99,6 %	238	233	97,9 %	16 %
92,6 % – 97,5 %	111	105	94,6 %	7 %

Tab. 3-5: Vorhergesagte Wahrscheinlichkeit für trockene Straße verglichen mit den eingetretenen Fällen

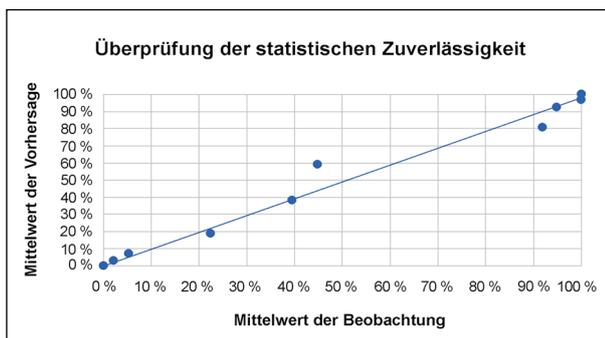


Bild 3-11: Zur Beurteilung der statistischen Zuverlässigkeit wird der Zusammenhang der vorhergesagten Wahrscheinlichkeit und eingetretenen Frequenz von Nässe auf der Straße dargestellt. Die Vorhersagen wurden nach vorhergesagtem Wert klassifiziert und mit einem Punkt pro Klasse dargestellt. Die diagonale Linie gibt den Idealwert an

Die beiden oberen Zeilen beziehen sich auf 65 % der Fälle (insgesamt) und haben eine Vorhersage von 99,6 % oder besser. Kurz gesagt, kann eine trockene Straße in zwei Drittel der Fälle mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit von 99,6 % oder besser vorhergesagt werden. Zum Vergleich: ohne Radar-daten würde die Grenze von 99,6 % schon bei 51 % der Fälle erreicht werden.

### 3.3.6 Schlussfolgerung Modell MS\_MO

Bei der Vorhersage der Zwischenschicht wurden Niederschlag, Verdampfung und Kondensation auf einfache Weise modelliert und mittels logistischer Regression optimiert. Die Radardaten spielen dabei eine wichtige Rolle. Bei einer False-Alarm-Rate von 13 % wird eine nasse Straße in 82 % der Fälle richtig vorhergesagt und eine trockene Straße in 96 % der Fälle.

## 3.4 Fallstudien

Die Straßenoberflächentemperatur wirkt sich durch Kondensation und Verdunstung auf die Zwischenschicht aus. Das Wetter spielt die wichtigste Rolle bei der Bestimmung der Straßenoberflächentemperatur, aber auch die lokalen Umstände wie Topografie, Gebäude und Bäume spielen eine wichtige Rolle. Wenn die Sonne scheint, dominieren Schatten und direkte Sonneneinstrahlung. Ist der Himmel jedoch mit Wolken bedeckt und es weht Wind, dann sind die Unterschiede gering und werden über die gespeicherte Wärme erzeugt. Tagsüber kann sich die Straße durch direkte Sonneneinstrahlung sehr schnell aufheizen. Nachts kann sie durch Ausstrahlung unter einem wolkenlosen Himmel stark abkühlen.

In dieser Fallstudie wurde die Auswirkung der Strahlung von Gebäuden auf die Straßenoberflächentemperatur in ihrer direkten Umgebung untersucht.

Verschiedene Messungen wurden am Nachmittag des 17. Februars und am frühen Morgen des 18. Februars 2019 vorgenommen. Die Messungen wurden mit einem Marwis der Firma Lufft durchgeführt [LUFFT, 2019]. Am Tag war es sonnig und für die Jahreszeit überdurchschnittlich warm mit einer Maximumtemperatur von 16 °C. In der darauf folgenden Nacht sank die Lufttemperatur bis auf 3 °C ab.

### 3.4.1 Einfluss der Wärmestrahlung von Gebäuden auf die Straßenoberflächentemperatur

Während einer kalten, wolkenlosen Nacht wirkt sich die Wärmestrahlung der umliegenden Gebäude auf die Straßenoberflächentemperatur aus. Je näher und größer die Gebäude sind, desto stärker ist der Einfluss. Das Physikalische Gesetz des inversen

Quadrates [EMILIANI, 1992] besagt, dass die gemessene Strahlungsflussdichte einer Punktquelle mit dem Abstand von der Quelle abnimmt. Die Reduktion erfolgt im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat des relativen Abstandes.

Jeder Körper gibt laut dem Stefan-Boltzmann-Gesetz Wärmestrahlung an seine Umgebung ab, deren Größe proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur ist [ROBERT, 2018]. Im Bereich zwischen  $-20\text{ °C}$  und  $+40\text{ °C}$  steigt die Strahlung um grob 1 % pro Grad an. Eine Gebäudefassade, die wegen direkter Sonneneinstrahlung  $20\text{ °C}$  wärmer ist, hat also eine 20 % größere Einwirkung auf die Straßenoberflächentemperatur als im Ausgangszustand.

### 3.4.2 Wärmespeicher im Straßenunterbau

Während des Tages wird die Straßenoberfläche durch direkte und indirekte Sonneneinstrahlung erhitzt. Diese Wärmeenergie wird durch Wärmeleitung nach unten, in den Straßenunterbau, befördert. Nachts wird dieser Prozess umgekehrt und Wärme wird aus dem Straßenunterbau zurück an die Oberfläche transportiert und verlangsamt die Abkühlung. Die Wärmeleitung geht bei mineralischem Straßenunterbau relativ langsam, sodass sich die Temperaturen der vergangenen Woche noch auf die Oberfläche auswirken. Mit zunehmender Tiefe ist die durchschnittliche Wärme einer immer längeren Periode gespeichert. In zwei Metern Tiefe ist sogar die Jahresdurchschnittstemperatur gespeichert. Brücken haben nur einen dünnen Unterbau und speichern weniger Wärme. Sie reagieren schneller mit Temperaturanpassung bei direkter Sonneneinstrahlung oder bei Ausstrahlung. Im direkten Vergleich zur Straße sind Brücken im Herbst kälter und im Frühling wärmer. Die Temperatur der Straße kann nach dem Winter noch unter  $0\text{ °C}$  liegen, sogar dann, wenn die Lufttemperatur schon über  $5\text{ °C}$  beträgt.

### 3.4.3 Empirisches Modell zur Abschätzung des Einflusses von Gebäuden und Unterbau auf die Straßenoberflächentemperatur

Südlich vom Berliner Hauptbahnhof stehen 30 Meter hohe Gebäude, welche an allen Seiten von Straßen umgeben sind. Hier wurde die Oberflächentemperatur am 18.02.2019 in der Zeit zwischen 04:21 und 04:33 Uhr gemessen.

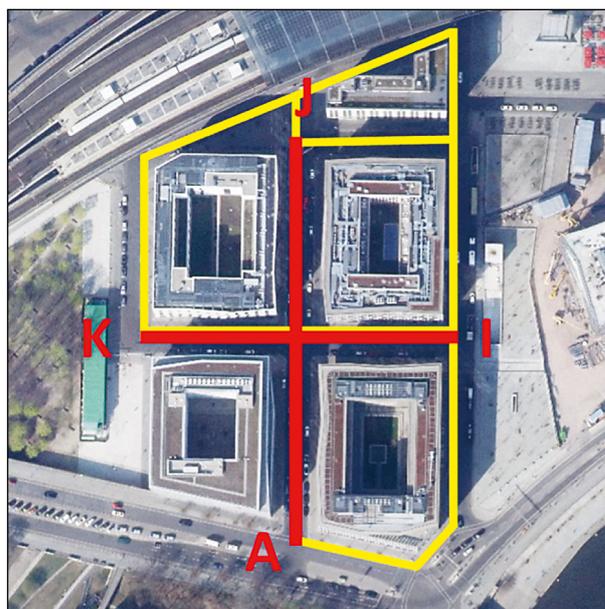


Bild 3-12: Die Testseite südlich des Berliner Hauptbahnhofs. In Gelb ist die Strecke angegeben, welche mit dem Messfahrzeug zweimal befahren wurde. In Rot sind die händisch vermessenen Abschnitte dargestellt [Geoportal Berlin/Digitale farbige Orthophotos 2019 (DOP20RGB)]

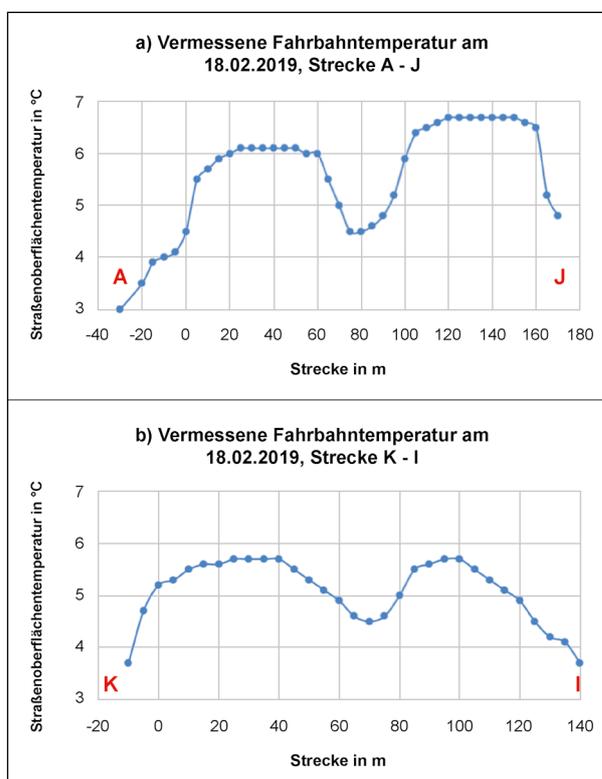


Bild 3-13: Straßenoberflächentemperatur für verschiedene Abschnitte, gemessen am 18.02.2019 zwischen 03:21 und 03:33 Uhr UTC, auf der Strecke von a) A nach J und b) von K nach I wie dargestellt in Rot in Bild 3-12

Ein allgemeines Modell der Straßenoberflächentemperatur in Abhängigkeit der Strahlung von Gebäuden und Wärmespeicher im Straßenunterbau wird gegeben durch:

$$\Delta T(x,y) = g_R f_1(R) + g_Q f_2(Q) \quad (3.6)$$

( $R$ ) Strahlung eines Gebäudes

$f_1(R)$  Funktion der Strahlung

( $Q$ ) Wärmespeicherkapazität

$f_2(Q)$  Funktion der Wärmespeicherkapazität

$g_R$  Funktion des Temperaturunterschieds zwischen Gebäude und Straße

$g_{f_1}$  Funktion, abhängig vom Straßenunterbau

$$\begin{aligned} \Delta T(x,y) &= g_R \int_{h=0}^H \int_{\alpha=-\pi}^{\pi} \frac{1}{h^2 + D^2} \delta\alpha \delta h + g_Q \int_{t=t_0}^0 R \delta t \\ &= g_R \int_{\alpha=-\pi}^{\pi} \frac{1}{D} \operatorname{atan}\left(\frac{H}{D}\right) \delta\alpha + g_Q \int_{t=t_0}^0 R \delta t \end{aligned} \quad (3.7)$$

$\Delta T$  Korrektur der Straßenoberflächentemperatur an einem Punkt mit ausreichender Entfernung von der Quelle der Strahlung

$h$  Höhe des Gebäudes, von welchem die Wärmestrahlung stammt

$H$  Gesamthöhe des Gebäudes

$a$  Sichtwinkel des Gebäudes von der Straße aus

$t$  ein Parameter über die Zeit

$t_0$  Zeitpunkt aus der Vergangenheit, wobei wir unterstellen, dass die vorher im Unterbau gespeicherte Wärmeenergie keinen Einfluss besitzt

Unter Verwendung der Beobachtungen der Straßenoberflächentemperatur um die vier Gebäude, können  $f_1(R)$  und  $f_2(Q)$  und abgeschätzt werden.  $f_1(R)$  wurde geschätzt unter Verwendung der Temperaturmessungen am frühen Morgen.  $f_2(Q)$  wurde geschätzt unter Verwendung der Sonneneinstrahlung am Nachmittag des Vortags. Die Optimierung wurde mittels linearer Regression vorgenommen. Es ergibt sich:

$$\Delta T(x,y) = 5.6 \pm 0.6f(R) + 1.9 \pm 0.7f(H) \quad (3.8)$$

mit einem mittleren absoluten Fehler von  $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Offensichtlich ist dieses Modell nur gültig für genau diese Gebäude (an jener Stelle) und bei dem an diesem Tag aufgetretenen Wetter. Jedoch kann das Modell unter Verwendung von zusätzlichen Messdaten für unterschiedliche Orte verbessert werden. Wenn Messungen unter verschiedenen Wetterbedingungen hinzugezogen werden, kann das Modell noch weiter verbessert werden.

### 3.4.4 Straßenquerschnitte

Steht ein Gebäude dicht an einer Straße, kann es in Abhängigkeit der Umstände zu erheblichen Temperaturunterschieden zwischen den Straßenseiten kommen. Zur weiteren Untersuchung wurden Messungen durchgeführt. Es wurde die Straße des 17. Juni vom Großen Stern Richtung Westen bis hin zur S-Bahnbrücke und zurück (Bild 3-14) zweimal vermessen, einmal tagsüber und einmal nachts. Außerdem wurde unter Verwendung eines Infrarotthermometers die Oberflächentemperatur von einer Straßenseite bis zur anderen, zwischen zwei Gebäuden südlich vom Hauptbahnhof (Bild 3-18) gemessen.

Die Messwerte am frühen Nachmittag zeigen, dass die südlichste Fahrbahn (links) die kälteste ist. Das ist erwartungsgemäß, da diese Fahrbahn im Schatten der Bäume liegt. Die nördlichste Fahrbahn ist die wärmste. Die Einwirkung des Wärmespeichers des Straßenunterbaus ist sichtbar in den Beobachtungen, die in den frühen Morgenstunden gemacht worden sind. Die südlichste Fahrbahn ist immer noch  $0,5$  bis  $1,0 \text{ }^\circ\text{C}$  kälter als die nördlichste Fahrbahn. Auffällig ist die Temperatur der Fahrbahn „C“ (Vergleich Bild 3-15). Sowohl am Nachmittag als auch am frühen Morgen ist sie etwas kälter als die anderen Fahrbahnen. Möglicherweise wird dies dadurch verursacht, dass der Verkehr



Bild 3-14: Messstrecke zwischen Großem Stern und S-Bahnbrücke [Geoportal Berlin/Digitale farbige Orthofotos 2019 (DOP20RGB)]



Bild 3-15: Anordnung der Fahrbahnen auf der Straße des 17. Juni in Berlin. Der Süden ist links [Geoportal Berlin/ Digitale farbige Orthofotos 2019 (DOP20RGB)]

auf dieser Fahrbahn weniger dicht ist. Fahrzeuge transferieren Wärme von der warmen Unterseite auf die Fahrbahn über die Reifen und mittels Strahlung.

Zur Untersuchung, wie sich die Wärmestrahlung eines Gebäudes auf seine nähere Umgebung auswirkt, wurden an zwei Orten Temperaturprofile erstellt. Die Orte südlich des Berliner Hauptbahnhofs wurden wegen der uniformen Gebäudehöhe und ihrer Nord-Süd-Ausrichtung gewählt. Wegen der Nord-Süd-Ausrichtung ist die Sonneneinstrahlung Richtung Westen und Richtung Osten im Tagesdurchschnitt gleich. Das erste Profil (Bild 3-16 a)) wurde am frühen Morgen des 18. Februars in einer Entfernung von 1 bis 30 Metern vom Gebäude gemessen. Die Messergebnisse sind in Bild 3-19 dargestellt. Das Gebäude befindet sich auf der rechten Seite, westlich (links) der Messstrecke gibt es kleine Bäume. Nahe am Gebäude beträgt die mit dem Pyrometer gemessene Oberflächentemperatur  $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Auf dem Bürgersteig fällt sie unter  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Fahrbahn ist an der dem Gebäude zugewandten Seite über  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  warm, aber an der anderen Seite nur noch  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In weiterer Entfernung vom Gebäude fällt sie langsam ab bis zu einer Temperatur von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  in einer Entfernung von 28 Metern. Im Durchschnitt fällt die Temperatur mit  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro Meter Entfernung vom Gebäude. Auf der dem Gebäu-

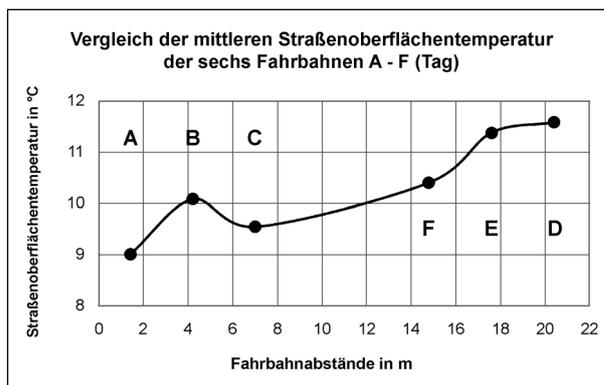


Bild 3-16: Mittlere Straßenoberflächentemperatur der sechs Fahrbahnen (A – F) gemessen von Süd (links) nach Nord (rechts). Die Messungen wurden am Nachmittag in der Zeit von 12:51 bis 14:04 Uhr UTC durchgeführt. Die Werte wurden über die Messstrecke zwischen dem Großen Stern und der S-Bahnbrücke gemittelt

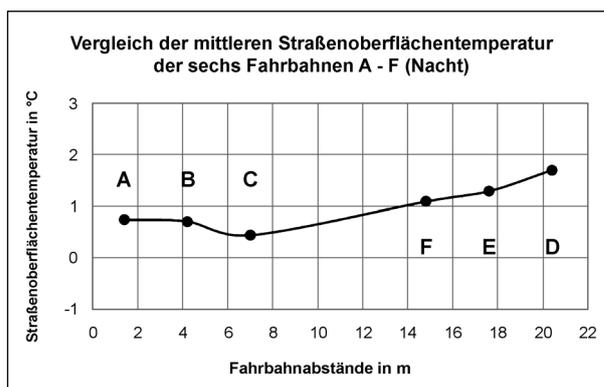


Bild 3-17: Mittlere Straßenoberflächentemperatur der sechs Fahrbahnen (A – F). Die Messungen wurden am frühen Morgen in der Zeit von 03:22 bis 04:17 Uhr UTC durchgeführt

de gegenüberliegenden Seite erreicht die Temperatur auf dem Bürgersteig sogar den Gefrierpunkt. Dieser Effekt hängt vermutlich mit der Wärmestrahlung des Gebäudes zusammen.

Ein zweites Temperaturprofil (Bild 3-18 b)) wurde am späten Morgen des 17. Februars zwischen zwei Gebäuden gemessen. Die Messergebnisse sind in Bild 3-20 dargestellt. Die Straße wird bereits direkt von der Sonne angestrahlt. Unmittelbar am westlichen Gebäude (links) liegt die Temperatur bei über  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , fällt aber auf  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$  in einem Meter Entfernung vom Gebäude ab. Das lässt sich nicht durch die Wärmestrahlung allein erklären, die genaue Ursache für die hohe Temperatur direkt am Gebäude ist noch unklar. Auf beiden Seiten der Straße sind Pkw geparkt und werfen ihre Schatten auf die Oberfläche. Sie verursachen bei 5 und 11 Metern eine deutliche Temperaturabsenkung.

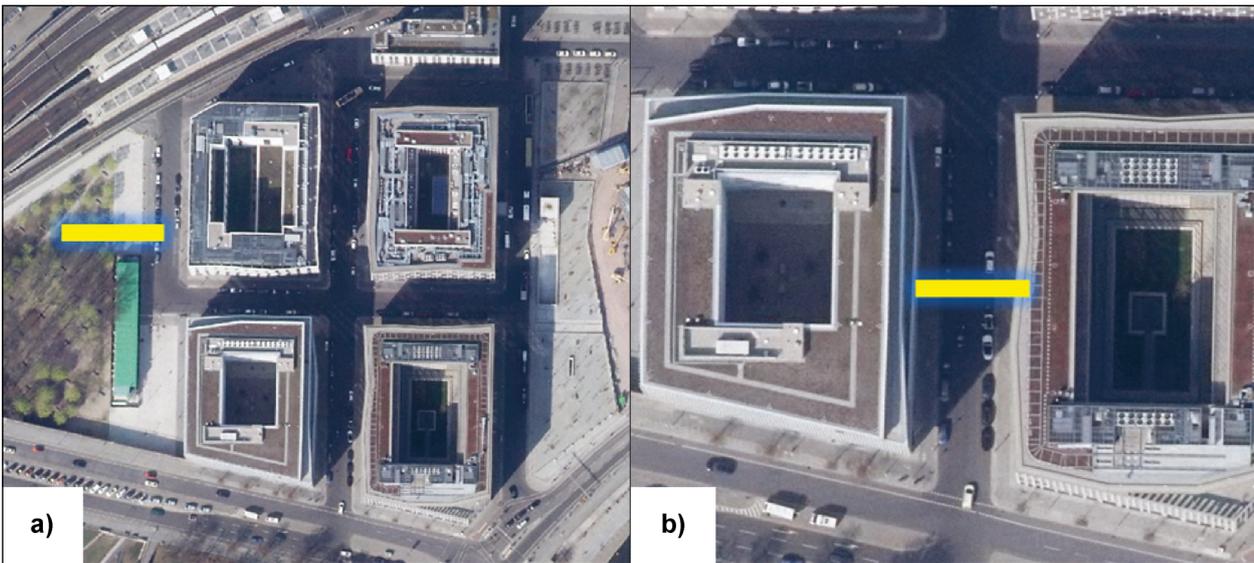


Bild 3-18: Position und Verlauf beider mit einem Infrarotmessgerät (Pyrometer) gemessenen Temperaturprofile des Straßenquerschnitts [Geoportal Berlin/Digitale farbige Orthophotos 2019 (DOP20RGB)]

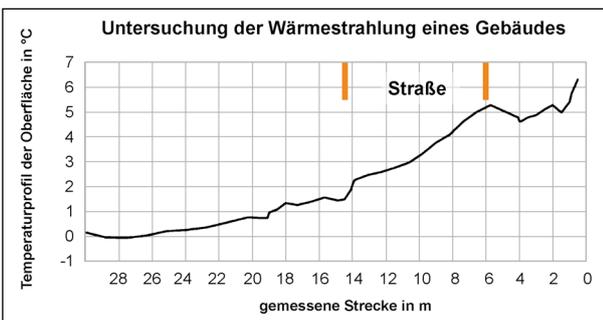


Bild 3-19: Temperaturprofil der Oberfläche am 18. Februar 2019 um 03:05 Uhr UTC über die gemessene Strecke aus Bild 3-18 a). Das Gebäude befindet sich rechts

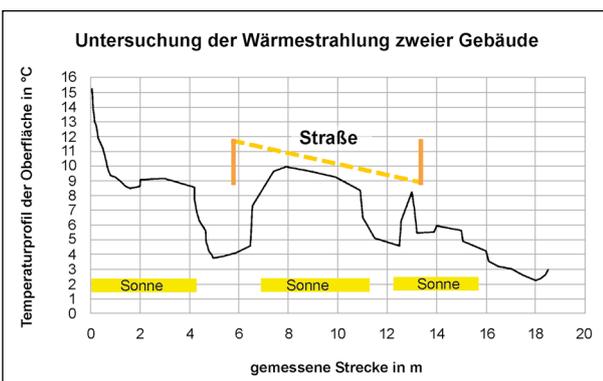


Bild 3-20: Temperaturprofil der Oberfläche am 17. Februar um 10:05 Uhr UTC über die gemessene Strecke aus Bild 3-18 b)

Weiter östlich (rechts) fällt die Temperatur langsam bis auf 2 °C, im direkten Schatten des Gebäudes, ab. Der durchschnittliche Temperaturgradient West-Ost beträgt 0,5 °C pro Meter. Dieser Effekt ist zurückzuführen auf die Dauer der direkt vorangegan-

gen Sonneneinstrahlung, wobei der Schatten des östlichen Gebäudes der wichtigste Einflussfaktor ist.

### 3.4.5 Schlussfolgerung der Fallstudien

Aus den Messergebnissen zeigt sich, dass die Gebäude über Schatten und Wärmestrahlung die Straßenoberflächentemperatur in ihrer direkten Nähe um mehrere °C beeinflussen können. Um den Gefrierpunkt herum ist dieser Einfluss sehr signifikant. Bei Temperaturen leicht über 0 °C kann es den Unterschied zwischen einer Straße, die über die Verdunstung schnell trocknet und einer Straße, die über Stunden hinweg nass bleibt, ausmachen.

## 3.5 Zusammenfassung

Es wurde ein Modell zur Vorhersage von Feuchtigkeit entwickelt, welche sich zwischen der Straßenoberfläche und dem Reifen eines Fahrzeugs befindet, der sogenannten Zwischenschicht. Die Wassermenge berechnet sich aus der Summe von Zuführung und Ableitung in der Form von Niederschlag, Versickerung, Kondensation und Verdampfung.

Folgende Daten wurden verwendet:

- Visuelle Einschätzung der Zwischenschicht durch den Fahrer,
- Niederschlagsmenge abgeleitet aus dem Radarbild,

- Taupunkttemperatur einer nahegelegenen Wetterstation,
- Straßenoberflächentemperatur,
- Wischergeschwindigkeit.

Die Straßenoberflächentemperatur wurde mittels des Straßenwetterinformationssensors (MARWIS) vermessen. Bei einer späteren operationellen Anwendung sollten stattdessen Vorhersagen der Straßenoberflächentemperatur verwendet werden.

Die im Radarbild vorhandene Reflektivität wurde empirisch auf Niederschlagsmengen umgerechnet und auf die Messpunkte interpoliert. Darauf basierend wurden fünf binäre Prädiktoren für verschiedene Zeitfenster und Niederschlagsmengen definiert. Die Vorhersage der Zwischenschicht wurde mittels logistischer Regression und eines einfachen Entscheidungsbaums optimiert. Die Radardaten spielen dabei eine wichtige Rolle. Bei einer False-Alarm-Rate von 13 % wird eine nasse Straße in 82 % der Fälle und eine trockene Straße in 96 % der Fälle richtig vorhergesagt.

Eine trockene Straße kann in zwei Drittel der Fälle mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit von 99,6 % oder besser vorhergesagt werden. Zum Vergleich, ohne Radardaten würde die Grenze von 99,6 % schon bei 51 % der Fälle erreicht werden.

In einer Fallstudie wurde die Auswirkung der Strahlung von Gebäuden und der Wärmespeicher im Straßenunterbau auf die Straßenoberflächentemperatur untersucht.

Südlich vom Berliner Hauptbahnhof befinden sich 30 Meter hohe Gebäude, welche an allen Seiten von Straßen umgeben sind. An diesem Standort wurde die Oberflächentemperatur morgens um 4 Uhr UTC gemessen. Die dabei ermittelten Werte liegen zwischen 3 und 7,5 °C. Diese wurden zur Optimierung eines Modells für die Straßenoberflächentemperatur, mit einem mittleren absoluten Fehler von 0,4 °C, verwendet. Dieses Modell ist jedoch nur für die erhobenen Messwerte gültig.

An zwei Orten wurde ein Temperaturprofil quer über die Straße erstellt. Im Durchschnitt fiel die Temperatur vor Sonnenaufgang mit 0,3 °C und nach Sonnenaufgang mit 0,5 °C pro Meter Entfernung vom Gebäude ab.

Die Straße des 17. Juni, welche an beiden Seiten von Bäumen umgeben ist, wurde tagsüber und

nachts vermessen. Am Tag wurde durch Schatteneinwirkung ein Unterschied von 2 bis 3 °C zwischen der südlichsten und der nördlichsten Fahrbahn gemessen. In den frühen Morgenstunden waren es noch 0,5 bis 1,0 °C.

Aus den Messergebnissen zeigt sich, dass die Gebäude über Schatten und Wärmestrahlung die Straßenoberflächentemperatur in ihrer direkten Nähe um mehrere Grad Celsius beeinflussen können.

## 4 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde untersucht, ob und in welchem Ausmaß eine Reibwertinformation für den Fahrer zu einem Sicherheitsgewinn führt. Die dazu durchgeführte Probandenstudie prüfte die Reaktionen von Fahrern auf die Anzeige der Reibwertprognose. Sie untersuchte, ob die Anzeige der Information zum Reibwert dazu führt, dass Fahrer ihr Verhalten (Geschwindigkeit, Abstand zu einem Vorderfahrzeug) an den Zustand der Fahrbahn anpassen. Darüber hinaus wurde untersucht, wie die Fahrer die Kritikalität der Fahrsituation in Abhängigkeit von den Wetterbedingungen und dem Vorhandensein bzw. Fehlen der Reibwertinformation einschätzten. Als dritte Fragestellung wurde evaluiert, wie die Fahrerbewertungen einer derartigen Anzeige bezüglich Akzeptanz, Nützlichkeit und Verständlichkeit ausfallen.

Zur Untersuchung dieser drei Fragestellungen wurde eine Fahrsimulatorstudie in einem statischen Fahrsimulator durchgeführt. Dazu fuhren 36 Versuchspersonen eine landschaftlich abwechslungsreiche Strecke, bei der sich zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Reibwert aufgrund von einsetzendem Regen verschiedener Stärke änderte. Eine Hälfte der Probanden bekam die Information über die Veränderung des Reibwertes vorher angezeigt, während die andere Hälfte diese Information nicht bekam.

Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass sich das Vorhandensein der Reibwertanzeige nicht auf die Unfallhäufigkeit der Fahrer auswirkte. Allerdings wies die Gruppe mit Reibwertanzeige eine bessere Anpassung der Geschwindigkeit an die Wetterbedingungen auf als die Gruppe ohne Reibwertanzeige: Die Probanden mit Reibwertanzeige hatten einen stärkeren und früheren Abfall in der Geschwindigkeit. Bezogen auf den Abstand zeigte die Grup-

pe mit Reibwertanzeige jedoch ein sicherheitskritischeres Verhalten als die Vergleichsgruppe. Der Abstand zum Vorderfahrzeug wurde von dieser Gruppe nicht entsprechend der Wetterbedingung vergrößert und nur bei der letzten Reibwertänderung zeigte sich, dass die Probanden mit Reibwertanzeige ihren Abstand aufgrund der Anzeige auf das Abstandsniveau der Probanden ohne Reibwertanzeige erhöhten. Die Analyse der subjektiven Daten zeigte, dass die Versuchspersonen die Wetterbedingungen tendenziell weniger kritisch einschätzten, wenn sie eine Reibwertprognose zur Verfügung hatten. Darüber hinaus bewerteten die Probanden die Reibwertanzeige als nützlich und zufriedenstellend. Ein abschließendes Interview verdeutlichte unter anderem, dass die Fahrer die Reibwertanzeige zwar als hilfreich bewerteten, sie diese aber, nach eigenen Angaben, nicht für die aktive Anpassung ihres Fahrverhaltens nutzten. Insbesondere die einfache Gestaltung der Anzeige wurde positiv kommentiert.

Die Ergebnisse der Studie unterstützen die Schlussfolgerung, dass eine Anzeige des Reibwertes zu einem Sicherheitsgewinn führt. Die Fahrer reduzierten ihre Geschwindigkeit und erhöhten im letzten Versuchsdurchgang ihren Abstand, wenn eine Änderung des Reibwertes frühzeitig angezeigt wurde. Aufgrund der Ergebnisse muss aber beachtet werden, dass der Sicherheitsgewinn durch die Reibwertanzeige von Probanden genutzt wird, um ein riskanteres Verhalten ausführen zu können. Die subjektive Bewertung des neuen Informationssystems war positiv. Fraglich bleibt, warum die Probanden angaben, dass sie die Anzeige des Reibwertes nicht aktiv für die Anpassung ihres Verhaltens an die sich ändernden Umweltbedingungen nutzten. Neben der Beantwortung dieser Frage wäre im nächsten Schritt zu untersuchen, wie eine optimale Reibwertinformation gestaltet sein müsste. In der Probandenstudie wurde die grafische Darstellung des Reibwertes bewusst einfach gehalten. Es ist aber sicher davon auszugehen, dass eine Optimierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle an diesem Punkt weiteres Verbesserungspotenzial beinhaltet. Positionierung und Gestaltung der Anzeige und möglicherweise die Ergänzung einer akustischen Warnung in Abhängigkeit der Kritikalität der jeweiligen Situationen können die Wirksamkeit der Reibwertinformation zusätzlich verbessern. Die gezeigten Potenziale der Reibwertinformation sollten ein hinreichend großer Anreiz sein dieses System zur Serienreife weiterzuentwickeln.

Dazu ist es zunächst jedoch grundsätzlich nötig, eine verlässliche und möglichst genaue Reibwertschätzung durchzuführen. Mit dieser Zielstellung wurde im zweiten Arbeitspaket dieses Forschungsprojekts die eigentliche Reibwertschätzung optimiert. Basierend auf den Ergebnissen zweier Vorarbeiten die gezeigt haben, dass eine grundsätzliche Schätzung mit einer hinreichend großen Genauigkeit möglich ist, wurde hier vertieft untersucht, inwiefern die Berücksichtigung von lokalen Einflussgrößen wie der Vegetation am Straßenrand, der Bebauung, Über- und Unterführungen etc. den Reibwert im kleinskaligen Bereich beeinflussen. Dazu wurde ein Rechenmodell entwickelt, welches in Ansätzen versucht diese Einflüsse zu berücksichtigen und bei einer Schätzung des Reibwerts mit einfließen zu lassen. Das Modell ist dabei in der Lage eine Vorhersage zur Feuchtigkeit zu erstellen, welche sich zwischen der Straßenoberfläche und dem Reifen eines Fahrzeugs befindet. Die Wassermenge insgesamt berechnet sich aus der Summe von Zuführung und Ableitung in der Form von Niederschlag, Versickerung, Kondensation und Verdampfung.

Die Straßenoberflächentemperatur wurde zu Vergleichszwecken mittels des Straßenwetterinformationssensors (MARWIS) vermessen. Bei einer späteren operationellen Anwendung sollen stattdessen Vorhersagen der Straßenoberflächentemperatur verwendet werden.

Die im Radarbild vorhandene Reflektivität wurde empirisch auf Niederschlagsmengen umgerechnet und auf die Messpunkte interpoliert. Darauf basierend wurden fünf binäre Prädiktoren für verschiedene Zeitfenster und Niederschlagsmengen definiert. Die Vorhersage der Zwischenschicht wurde mittels logistischer Regression und eines einfachen Entscheidungsbaums optimiert. Die Radardaten spielen dabei eine wichtige Rolle. Bei einer False-Alarm-Rate von 13 % wird eine nasse Straße in 82 % der Fälle und eine trockene Straße in 96 % der Fälle richtig vorhergesagt.

Eine trockene Straße kann in zwei Drittel der Fälle mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit von 99,6 % oder besser vorhergesagt werden. Zum Vergleich, ohne Radardaten würde die Grenze von 99,6 % schon bei 51 % der Fälle erreicht werden.

Zusätzlich wurde in einer Fallstudie die Auswirkung der Strahlung von Gebäuden und der Wärmespeicher im Straßenunterbau auf die Straßenoberflä-

chentemperatur untersucht. Dazu wurden südlich vom Berliner Hauptbahnhof neben 30 Meter hohen Gebäuden, welche an allen Seiten von Straßen umgeben sind, die Oberflächentemperatur morgens um 4 Uhr UTC gemessen. Die dabei ermittelten Werte lagen zwischen 3 und 7,5 °C. Diese wurden zur Optimierung eines Modells für die Straßenoberflächentemperatur, mit einem mittleren absoluten Fehler von 0,4 °C, verwendet. Dieses Modell ist jedoch nur für die erhobenen Messwerte gültig.

An zwei Orten wurde ein Temperaturprofil quer über die Straße erstellt. Im Durchschnitt fiel die Temperatur vor Sonnenaufgang mit 0,3 °C und nach Sonnenaufgang mit 0,5 °C pro Meter Entfernung vom Gebäude ab.

Die Straße des 17. Juni, welche an beiden Seiten von Bäumen umgeben ist, wurde tagsüber und nachts vermessen. Am Tag wurde durch Schatteneinwirkung ein Unterschied von 2 bis 3 °C zwischen der südlichsten und der nördlichsten Fahrbahn gemessen. In den frühen Morgenstunden waren es noch 0,5 bis 1,0 °C.

Anhand der Messergebnisse zeigt sich, dass die Gebäude über Schatten und Wärmestrahlung die Straßenoberflächentemperatur in ihrer direkten Nähe um mehrere Grad Celsius beeinflussen können. Diese Temperaturdifferenz kann je nach Randbedingungen den Unterschied zwischen trocken und feucht oder aber auch zwischen nass und vereist ausmachen.

Die Einflüsse lokaler Effekte sollte für zukünftige Reibwertschätzungen berücksichtigt werden. Dass ihre Bedeutung auf den Reibwert bisweilen erheblich sein kann, wurde in dieser Forschungsarbeit gezeigt. Ebenfalls wurde beispielhaft dargestellt, dass die Berücksichtigung lokaler Faktoren, wie beispielsweise dem Skyviewfaktor, möglich ist. Auch Informationen zur Straßeninfrastruktur, wie Brücken, Tunnel usw. können in einer solchen Reibwertschätzung berücksichtigt werden. Basierend auf diesen und den bereits berücksichtigten Einflussgrößen kann anschließend eine Reibwertschätzung stattfinden, die sich sowohl durch eine hohe lokale Genauigkeit als auch durch eine hohe Verlässlichkeit auszeichnet. Für zukünftige Generationen von teil- und hochautomatisierten Fahrzeugen ist das eine notwendige Voraussetzung.

## Literatur

- [ASCHEBRENNER, 1992]: ASCHEBRENNER, K. M.; BIEHL, B. & WURM, G. W. (1992): Mehr Verkehrssicherheit durch bessere Technik? Felduntersuchungen zur Risikokompensation am Beispiel des Antiblockiersystems (ABS). Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bd. 246
- [BACHMANN, 1995]: BACHMANN, T. (1995): The importance of the integration of road, tyre and vehicle technologies. FISITA XXth World Congress, Montreal, Canada, September 1995
- [BACHMANN, 1998]: BACHMANN, T. (1998): Wechselwirkungen im Prozeß der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
- [BAKDASH, 2018]: BAKDASH, J. Z. & MARUSICH, L. R.: rmcrr (2018): Repeated Measures Correlation. R package version 0.3.0. <https://CRAN.R-project.org/package=rmcrr>, Letzter Abruf: 24.04.2019
- [BATES, 2015]: BATES, D. & MAECHLER, M.; BOLKER, B. & WALKER, S. (2015): Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. DOI:10.18637/jss.v067.i01
- [BECHERER, 2000]: BECHERER, T. et al. (2000): Der Seitenwandtorsionssensor SWT. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 102 (2000), 11, S. 946
- [BRANDENBURG, 2016]: BRANDENBURG, S. & EPPEL, S. (2016): Drivers' Individual Design Preferences of Takeover Requests in Highly Automated Driving. *iCOM*, in press, DOI: 10.1515/icom-2018-0028
- [BREUER, 1992]: BREUER, B.; EICHHORN, U. & ROTH, J. (1992): Measurement of tyre/road friction ahead of the car and inside the tyre. *Proceedings of AVEC'92 (International Symposium on Advanced Vehicle Control)*, pp. 347–353
- [BREUER, 2000]: BREUER, B.; BARTZ, M.; KARLHEINZ, B.; GRUBER S.; SEMSCH, M.; STROTHJOHANN, T. & XIE, C. (2000): The mechatronic vehicle corner of Darmstadt University of Technology - Interaction and cooperation of a sensor tire, new low-energy

- disc brake and smart wheel suspension. Proceedings of FISITA 2000, Seoul, Korea, June 12–15 2000
- [CANNY, 1986]: CANNY, J. (1986): A Computational Approach to Edge Detection. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume 8 Issue 6, June 1986, S. 679–698
- [DIECKMANN, 1992] DIECKMANN, T. (1992): Assessment of road grip by way of measured wheel variables. In: Proceedings of FISITA '92 Congress, London, GB, 2:75-81, June 7–11 1992. "Safety of the Vehicle and the Road"
- [DWD, 2018]: Stadtklimamessungen – die städtische Wärmeinsel. [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadt/pl/projekt\\_waermeinseln/startseite\\_projekt\\_waermeinseln.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadt/pl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html), Letzter Abruf: 08.10.2018
- [EICHHORN, 1992]: EICHHORN, U. & ROTH, J. (1992): Prediction and monitoring of tyre/road Friction. In: XXIV FISITA Congress, London, GB, 2:67-74, June 7–11 1992. "Safety of the Vehicle and the Road"
- [EMILIANI, 1992]: EMILIANI, C. (1992): Planet Earth: Cosmology, Geology, and the Evolution of Life and Environment. Cambridge University Press
- [FOX, 2011]: FOX, J. & WEISBERG, S. (2011): An {R} Companion to Applied Regression, Second Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL: <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>, Letzter Abruf: 24.04.2019
- [GUSTAFSSON, 1997]: GUSTAFSSON, F. (1997): Slip-based tire-road friction estimation. In: Automatica, 33(6):1087–1099, June 1997
- [HALGAMUGE, 1993]: HALGAMUGE, S. K.; HERPEL, H.-J. & GLESNER, M. (1993): Echtzeit Fahrbahnzustandserkennung mit Fuzzy-Neuronalen Netzen. In: REUSCH, B. (Hrsg.): Fuzzy-Logic – Theorie und Praxis, 3. Dortmunder Fuzzy-Tage Dortmund, 7.–9. Juni 1993. Informatik Aktuell, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 204–211
- [KIENCKE, 1994]: KIENCKE, U. & DAIß, A. (1994): Estimation of tyre friction for enhanced ABS systems. Proceedings of AVEC'94
- [LEX, 2015]: LEX, C.; EICHBERGER, A. & HIRSCHBERG, W. (2015): On-board determination of the friction coefficient between tire and road using standard-application vehicle dynamics sensors. Graz University of Technology, Austria, 24<sup>th</sup> international Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, August 17–21, Graz, Austria
- [LUFFT, 2019]: LUFFT, G.: Mess- und Regelsystemtechnik GmbH. MARWIS-UMB-Mobiler Strassenwetter-Sensor. <https://www.lufft.com/de-de/produkte/strassen-runwaysensoren-308/marwis-umb-mobiler-strassenwetter-sensor-1797/>. Letzter Abruf: 20.04.2019
- [MOHS, 2007]: MOHS, C.; ISRAEL, J. H.; KINDSMÜLLER, M. C.; NAUMANN, A. B.; HUßLEIN, S. & IUUI: Research Group (2007): Intuitive Benutzung als Ziel in der Produktentwicklung. In: K. RÖSE & BRAU, H. (Hrsg.). Usability Professionals 2007 (165–168). Stuttgart: German Chapter der Usability Professionals' Association
- [MÜLLER, 2001]: MÜLLER, S.; UCHANSKI, M. & HEDRICK, J. K. (2001): Slip-based tire-road friction estimation during braking. Proceedings of IMECE'01 (2001 ASME International Engineering Congress and Exposition), November 11–16 2001
- [OTSU, 1979]: OTSU, N. (1979): A Threshold Selection Method From Gray-Level Histograms. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Volume 9 Issue 1, January 1979, S. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076
- [PASTERKAMP1, 1997]: PASTERKAMP, W. & PACEJKA, H. (1997): Application of Neural Networks in the Estimation of Tire/Road Friction Using the Tire as Sensor. SAE Technical Paper 971122, DOI: 10.4271/971122
- [PASTERKAMP2, 1997]: PASTERKAMP, W. & PACEJKA, H. (1997): The Tyre as a Sensor to Estimate Friction. In: Vehicle System Dynamics, Vol. 27, No. 5-6, pp. 409–422, DOI: 10.1080/00423119708969339
- [R CORE, 2018]: R Core Team (2018): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>, Letzter Abruf: 24.04.2019

- [ROBERT, 2018]: ROBERT, C. & BOUSQUET, R. (2018): Geowissenschaften: Die Dynamik des Systems Erde. Springer Spektrum, 1. Auflage
- [ROCHE, 2018]: ROCHE, F.; SOMIESKI, A. & BRANDENBURG, S. (2018): Drivers' Behavioral Adaptation to Repeated Takeover Requests in Highly Automated Driving: The Effects of the Takeover Request and the Secondary Task Modality. *Human Factors*. DOI: 10.1177/0018720818814963
- [SCHLAG, 2006]: SCHLAG, B. (2006): Risikoverhalten im Straßenverkehr. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 3–4(55), S. 35–40
- [van der LAAN, 1997]: van der LAAN, J. D.; HEINO, A. & deWARD, D. (1997): A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transportation telematics. In: *Transportation Research Part C*, 5(1), 1–10
- [van NES, 2010]: van NES, N.; BRANDENBURG, S. & TWISK, D. (2010): Dynamic speed limits: Effects on homo-geneity of traffic flow. In: *Accident Analysis & Prevention*, 42, S. 944–952
- [VENABLES, 2002]: VENABLES, W. N. & RIPLEY, B. D. (2002): *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0
- [WICKHAM, 2007]: WICKHAM, H. (2007): Reshaping data with the reshape package. In: *Journal of Statistical Software*, 21(12)
- [WICKHAM, 2016]: WICKHAM, H. (2016): *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York
- [WICKHAM, 2017]: WICKHAM, H. (2017): tidyverse: Easily Install and Load the 'Tidyverse'. R package version 1.2.1. <https://CRAN.R-project.org/package=tidyverse>, Letzter Abruf: 24.04.2019
- ## Bilder
- Bild 2-1: Schematischer Aufbau des Fahrsimulators
- Bild 2-2: Fahrsimulator des Fachgebiets Kraftfahrzeuge der TU Berlin
- Bild 2-3: Ablauf der Testfahrt mit den vier Abschnitten T1-T4
- Bild 2-4: Skala zur Frage nach der Kritikalität der einzelnen, gefahrenen Abschnitte
- Bild 2-5: Darstellung der Reibwertanzeige für den Probanden
- Bild 2-6: Aufteilung eines Messabschnitts in unterschiedliche Streckenteilabschnitte
- Bild 2-7: Schematische Darstellung des Polynomialkontrasts für die Wetterbedingung
- Bild 2-8: Effekte der Anzeige und der Wetterbedingung (links) sowie der Anzeige, der Wetterbedingung und des Streckenteilabschnitts (rechts) auf die Geschwindigkeitswahl der Probanden. Durchgezogene Linien: Lineare Trends, Gestrichelte Linien: quadratische Trends
- Bild 2-9: Effekte der Wetterbedingung und der Anzeige auf den Abstand der Versuchspersonen zum Führungsfahrzeug als Abstand in Metern und als Time Headway in Sekunden. Durchgezogene Linien: Lineare Trends, Gestrichelte Linien: quadratische Trends
- Bild 2-10: Effekte der Wetterbedingung, der Anzeige und des Streckenteilabschnitts auf den Abstand der Versuchspersonen zum Führungsfahrzeug als Abstand in Metern und als Time Headway in Sekunden. Durchgezogene Linien: Lineare Trends
- Bild 2-11: Effekte der Anzeige und des Streckenteilabschnitts auf die Geschwindigkeitswahl der Probanden. Durchgezogene Linien: Lineare Trends
- Bild 2-12: Effekte der Anzeige und des Streckenteilabschnitts auf die Geschwindigkeitswahl der Probanden. Durchgezogene Linien: Lineare Trends
- Bild 2-13: Signifikanter Haupteffekt der Wetterbedingung und marginaler Haupteffekt der

Reibwertanzeige auf die subjektive Kritikalität bei T1 bis T3. Durchgezogene Linien: Lineare Trends

- Bild 3-1: Aktuelle Modellkette (ICON, ICON-EU Nest, COSMO-D2) [Wetterdienst, 2018]
- Bild 3-2: Die blaue Markierung zeigt den Verlauf der Messstrecke in Berlin und Brandenburg. Jedes rote Infofähnchen stellt dabei einen Bremspunkt dar (Kartengrundlage: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)
- Bild 3-3: Zuordnung der Messdaten zu den definierten Streckenpunkten (TP) über GPS
- Bild 3-4: Kameras auf konstruierter Halterung a), Kamerasystem auf Messfahrzeug b)
- Bild 3-5: Zusammengesetzte Skyview-Aufnahmen a), händisch eingefärbte Bereiche b)
- Bild 3-6: Zusammengesetzte Skyview-Aufnahmen a), automatisiert eingefärbte Bereiche b)
- Bild 3-7: Vergleich der Skyviewfaktoren im Sommer (links) und im Winter (rechts). Einfluss der Vegetation auf den Skyviewfaktor. Skyview = 1 – freie Sicht auf den Horizont, Skyview = 0 – keine Sicht auf den Horizont. [© CARTO; Kartengrundlage: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA]
- Bild 3-8: Wahrheitstabelle für die Validierung von Vorhersagen gegenüber Beobachtungen
- Bild 3-9: Rate des Modells MS\_MO als eine Funktion der Entscheidungsgrenze. In Blau ist die Hit-Rate (nass), in Orange die False-Alarm-Rate dargestellt
- Bild 3-10: Rate des Modells MS\_MO als eine Funktion der Entscheidungsgrenze. In Blau ist die Hit-Rate (trocken) mit einer verkürzten vertikalen Achse dargestellt
- Bild 3-11: Zur Beurteilung der statistischen Zuverlässigkeit wird der Zusammenhang der vorhergesagten Wahrscheinlichkeit und eingetretenen Frequenz von Nässe auf der Straße dargestellt. Die Vorhersagen wurden nach vorhergesagtem Wert klassifiziert und mit einem Punkt pro Klasse dargestellt. Die diagonale Linie gibt den Idealwert an
- Bild 3-12: Die Testseite südlich des Berliner Hauptbahnhofs. In Gelb ist die Strecke angegeben, welche mit dem Messfahrzeug zweimal befahren wurde. In Rot sind die händisch vermessenen Abschnitte dargestellt [Geoportal Berlin/Digitale farbige Orthophotos 2019 (DOP20RGB)]
- Bild 3-13: Straßenoberflächentemperatur für verschiedene Abschnitte, gemessen am 18.02.2019 zwischen 03:21 und 03:33 Uhr UTC, auf der Strecke von a) A nach J und b) von K nach I wie dargestellt in Rot in Bild 3-12
- Bild 3-14: Messstrecke zwischen Großem Stern und S-Bahnbrücke [Geoportal Berlin/Digitale farbige Orthophotos 2019 (DOP20RGB)]
- Bild 3-15: Anordnung der Fahrbahnen auf der Straße des 17. Juni in Berlin. Der Süden ist links [Geoportal Berlin/Digitale farbige Orthophotos 2019 (DOP20RGB)]
- Bild 3-16: Mittlere Straßenoberflächentemperatur der sechs Fahrbahnen (A – F) gemessen von Süd (Links) nach Nord (Rechts). Die Messungen wurden am Nachmittag in der Zeit von 12:51 bis 14:04 Uhr UTC durchgeführt. Die Werte wurden über die Messstrecke zwischen dem Großen Stern und der S-Bahnbrücke gemittelt
- Bild 3-17: Mittlere Straßenoberflächentemperatur der sechs Fahrbahnen (A – F). Die Messungen wurden am frühen Morgen in der Zeit von 03:22 bis 04:17 Uhr UTC durchgeführt
- Bild 3-18: Position und Verlauf beider mit einem Infrarotmessgerät (Pyrometer) gemessenen Temperaturprofile des Straßenquerschnitts [Geoportal Berlin/Digitale farbige Orthophotos 2019 (DOP20RGB)]
- Bild 3-19: Temperaturprofil der Oberfläche am 18. Februar 2019 um 03:05 Uhr UTC über die gemessene Strecke aus Bild 3-18 a). Das Gebäude befindet sich rechts
- Bild 3-20: Temperaturprofil der Oberfläche am 17. Februar um 10:05 Uhr UTC über die gemessene Strecke aus Bild 3-18 b)

## Bilder im Anhang

Bild A-1: Kopie der Stellungnahme der Ethik-Kommission zum Projekt „Analyse der Beeinflussung des Fahrerverhaltens durch Reibwertinformationen gestützt durch einen Fahrsimulatorversuch“

Bild A-2: Vorlage der Einverständniserklärung zum Projekt „Analyse der Beeinflussung des Fahrerverhaltens durch Reibwertinformationen gestützt durch einen Fahrsimulatorversuch“

Tab. 3-4: Änderung der Rate beim Kreuzvalidierungsverfahren. Hit-Rate (nass) von -0,7 % bedeutet, dass die Rate, die an den kleineren aber unabhängigen Datensatz optimiert ist, 0,7 % niedriger ist als die Rate, die auf den vollständigen aber abhängigen Datensatz optimiert ist

Tab. 3-5: Vorhergesagte Wahrscheinlichkeit für trockene Straße verglichen mit den eingetretenen Fällen

## Tabellen

Tab. 2-1: Experimentelles Design der Untersuchung

Tab. 2-2: Ergebnisse der Analyse zur Geschwindigkeitswahl der Probanden bei T1 bis T3

Tab. 2-3: Ergebnisse der Analyse zum logarithmierten Abstand der Probanden bei T1 bis T3

Tab. 2-4: Ergebnisse der Analyse zum logarithmierten THW der Probanden bei T1 bis T3

Tab. 2-5: Ergebnisse der Analyse zur Geschwindigkeitswahl der Probanden bei T4

Tab. 2-6: Ergebnisse der Analyse zur logarithmierten Abstandswahl der Probanden bei T4

Tab. 2-7: Ergebnisse der Analyse zum logarithmierten THW bei T4

Tab. 2-8: Ergebnisse der Analyse zur logarithmierten subjektiven Kritikalität bei T1 bis T3

Tab. 3-1: Zeitfenster und Schwellwert für die binären Niederschlagsprädiktoren R1 bis R5

Tab. 3-2: Übersicht der Verwendung von Straßenoberflächentemperatur (RST) und Taupunkttemperatur für Prädiktoren im Modell

Tab. 3-3: Vergleich der Modelle bei verschiedenen Prädiktoren

## Tabellen im Anhang

Tab. A-1: Akzeptanzskala (Nützlichkeit und Zufriedenheit) [Van der LAAN, 1997]

Tab. A-2: Fragebogen zur Erfassung demografischer Daten

Tab. A-3: Liste der für die Modellentwicklung ausgewählten Tage

## Anhang

### 4.1 Stellungnahme der Ethik-Kommission des Instituts für Psychologie und Arbeitswissenschaft zur Reibwertstudie



Technische  
Universität  
Berlin

TU Berlin | Sekr. MAR 3-2 | Marchstraße 23 | 10587 Berlin

**Anna Trapp**  
Technische Universität Berlin  
Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaft  
Fachgebiet Kognitionspsychologie und kognitive Ergonomie  
Marchstr. 23, Sekr. MAR 3-2  
10587, Berlin

Eingangsdatum des Antrages: 19.09.2018  
Antragsnummer: TRA\_07\_20180919

Datum der Beschlussfassung: 29.10.2018

Berlin, 29.10.2018

**Stellungnahme der Ethik-Kommission zu einem Forschungsantrag**

Die Ethik-Kommission des Instituts für Psychologie und Arbeitswissenschaft (IPA) der TU Berlin, im Folgenden Kommission genannt, hat Ihr Forschungsvorhaben begutachtet.

Unter Einhaltung der von Ihnen vorgegebenen Richtlinien werden die wichtigsten Vorkehrungen zur Minimierung des Probandenrisikos getroffen. Es besteht ein angemessenes Verhältnis zwischen dem Nutzen und dem Risiko des Untersuchungsvorhabens.

Die Freiwilligkeit der Versuchsteilnahme wird im geprüften Forschungsvorhaben sichergestellt. Weiterhin werden die Bestimmungen zum Datenschutz eingehalten.

Als Ergebnis der Begutachtung durch die Kommission, wird die Untersuchung „Analyse der Beeinflussung des Fahrerverhaltens durch Reibwertinformationen gestützt durch einen Fahrsimulatorversuch“ als **ethisch unbedenklich** eingestuft.

Mit freundlichen Grüßen  
  
 TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN  
 Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaft  
 Fachgebiet Kognitionspsychologie und kognitive Ergonomie  
 Marchstr. 23 (Sekr. MAR 3-2), 10587 Berlin  
 Vorsitzender der Ethik-Kommission

> 1/2 |

www.ipa.tu-berlin.de





Fakultät V  
Verkehrs- und Maschinensysteme  
Institut für Psychologie und  
Arbeitswissenschaft

Ethik-Kommission  
ethik@ipa.tu-berlin.de

Vorsitzender

Dr. Stefan Brandenburg

Sekr. MAR 3-2  
Raum MAR 3.080  
Marchstraße 23  
10587 Berlin

Telefon +49 (0)30 314-24838  
Telefax +49 (0)30 314-25289  
stefan.brandenburg@tu-berlin.de

> 1/2 |

www.ipa.tu-berlin.de



Bild A-1: Kopie der Stellungnahme der Ethik-Kommission zum Projekt „Analyse der Beeinflussung des Fahrerverhaltens durch Reibwertinformationen gestützt durch einen Fahrsimulatorversuch“

## 4.2 Akzeptanzskala

VP#: \_\_\_\_\_

Sehr geehrte Versuchsperson,

nachfolgend möchten wir Sie zunächst mit der Akzeptanzskala (Nützlichkeit und Zufriedenheit) vertraut machen. Diese sollen Sie dazu benutzen, eine subjektive Beurteilung der Nützlichkeit und Zufriedenheit der Reibwertanzeige vorzunehmen.

Nützlich	<input type="checkbox"/>	Nutzlos				
Angenehm	<input type="checkbox"/>	Unangenehm				
Schlecht	<input type="checkbox"/>	Gut				
Nett	<input type="checkbox"/>	Nervig				
Effizient	<input type="checkbox"/>	Unnötig				
Ärgerlich	<input type="checkbox"/>	Erfreulich				
Hilfreich	<input type="checkbox"/>	Wertlos				
Nicht wünschenswert	<input type="checkbox"/>	Wünschenswert				
Aktivierend	<input type="checkbox"/>	Einschläfernd				

Tab. A-1: Akzeptanzskala (Nützlichkeit und Zufriedenheit) [Van der LAAN, 1997]

### 4.3 Fragebogen zur Erfassung der demografischen Daten

VP#: \_\_\_\_\_

Sehr geehrte Versuchsperson,

vielen Dank, dass Sie an diesem Experiment teilnehmen. Bevor wir mit dem Versuch starten, möchten wir Sie bitten, folgende Fragen zu Ihrer Person zu beantworten.

Alter	_____ Jahre
Geschlecht	<input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich <input type="checkbox"/> trans/inter/divers <input type="checkbox"/> anderes
Benötigen Sie eine Sehhilfe?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Wenn ja, tragen Sie sie auch heute zum Versuch?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Jahr des Führerscheinerwerbs:	Am _____
Wie viele Kilometer fahren Sie im Jahr?	ca. _____ km
An wie vielen Tagen in der Woche steuern Sie im Durchschnitt ein Auto?	ca. _____ Tage
Haben Sie bereits an Studien in einem Fahrsimulator teilgenommen?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Haben Sie eine Rot-Grün-Schwäche?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein

Tab. A-2: Fragebogen zur Erfassung demografischer Daten

## 4.4 Einverständniserklärung der Probanden



**Technische  
Universität  
Berlin**

TU Berlin | Marchstr. 23 | 10587 Berlin

Berlin, \_\_\_\_\_

**Einverständniserklärung für „Analyse der Beeinflussung des Fahrerverhaltens durch Reibwertinformationen gestützt durch einen Fahrsimulatorversuch“**

Sehr geehrte Teilnehmer, sehr geehrte Teilnehmerinnen,

damit Sie an dem Versuch „Analyse der Beeinflussung des Fahrerverhaltens durch Reibwertinformationen gestützt durch einen Fahrsimulatorversuch“ teilnehmen können, möchten wir Sie bitten, sich die folgende Einverständniserklärung aufmerksam durchzulesen und diese zu unterschreiben.

- Ich wurde im Rahmen der Teilnehmerinformation über den Zweck der Studie informiert und habe eine Möglichkeit weitere Informationen mit Hilfe der Teilnehmerinformation einzuholen.
- Meine Versuchsteilnahme ist freiwillig.
- Ich stimme zu, dass während der Fahrt im Simulator der Zustand des Systems und meine Reaktionen darauf aufgezeichnet werden.
- Ich stimme zu, dass ich während der Fahrt im Simulator gefilmt werden darf. Die Aufnahmen werden ausschließlich zur Kodierung meiner Körperbewegungen genutzt und dürfen weder an Dritte weitergegeben werden, noch öffentlich gezeigt werden.
- Ich stimme zu, dass meine Angaben, die ich während der Durchführung im Rahmen von Fragebögen mache und die im Fahrsimulator aufgezeichneten sowie kodierten Daten auf Basis der Videoaufnahmen in anonymisierter Form und zum Zwecke der Auswertung weiterverarbeitet werden dürfen. Die Ergebnisse der Auswertung dürfen an den Kooperationspartner innerhalb der TU Berlin und an den Geldgeber der Studie (ein Verband aus der Automobilindustrie bestehend aus verschiedener Reifen- und Autoherstellern) weitergegeben werden.
- Mir ist bewusst, dass ich die Teilnahme an dem Versuch jederzeit und ohne Angabe von Gründen abbrechen kann, ohne dass dies eine Auswirkung auf meine Aufwandsentschädigung haben wird.
- Mir ist bewusst, dass ich innerhalb von zwei Wochen eine Löschung der erhobenen Daten verlangen kann. Ansonsten werden Daten im Fachbereich Kognitionspsychologie und Kognitive Ergonomie gespeichert und nach 10 Jahren gelöscht.

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift Versuchsteilnehmer

\_\_\_\_\_  
Name in Druckschrift Versuchsteilnehmer

[www.kke.tu-berlin.de](http://www.kke.tu-berlin.de)




Fakultät V Verkehrs- und  
Maschinesysteme  
Institut für Psychologie und  
Arbeitswissenschaft

Fachgebiet Kognitionspsychologie  
und Kognitive Ergonomie

Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Anna K. Trapp, Dipl. Psych

Sekretariat MAR 3-2  
Raum MAR 3.075  
Marchstr. 23  
D-10587 Berlin

Telefon +49 (0)30 314-25279  
Telefax +49 (0)30 314-25996  
Anna.k.trapp@tu-berlin.de

[www.kke.tu-berlin.de](http://www.kke.tu-berlin.de)

Bild A-2: Vorlage der Einverständniserklärung zum Projekt „Analyse der Beeinflussung des Fahrerverhaltens durch Reibwertinformationen gestützt durch einen Fahrsimulatorversuch“

#### 4.5 Liste der für die Modellentwicklung ausgewählten Tage

2015	2016	2017	2018
2015-04-28	2016-02-10	2017-06-19	2018-01-17
2015-05-04	2016-03-31	2017-06-20	2018-01-25
2015-05-08	2016-04-12	2017-08-07	2018-02-09
2015-05-12	2016-04-14	2017-08-14	2018-02-27
2015-05-15	2016-04-15	2017-08-16	2018-04-06
2015-05-19	2016-04-20	2017-11-15	2018-05-08
2015-07-07	2016-05-23	2017-11-24	2018-05-15
2015-07-13	2016-08-02	2017-12-14	2018-05-22
2015-07-17	2016-08-15	2017-12-20	2018-05-24
2015-07-19	2016-08-16		2018-05-28
2015-07-29	2016-09-12		2018-05-29
2015-07-31	2016-09-15		2018-05-30
2015-08-02	2016-09-20		2018-06-25
2015-08-07	2016-09-24		2018-08-17
2015-08-14	2016-11-01		2018-08-23
2015-08-16	2016-11-03		2018-08-29
2015-08-26			2018-08-30
2015-09-09			2018-09-14
2015-09-10			2018-10-30
2015-09-21			
2015-09-30			
2015-12-07			
2015-12-08			
2015-12-10			

Tab. A-3: Liste der für die Modellentwicklung ausgewählten Tage

## 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 – Austauschkatysatoren**  
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 Fahrzeugaußengereäuschen 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, Ponsel  
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: Motorradshutzelme – 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, Heini, Bühne, Gail € 15,50

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

Altinsoy, Lachmann, Rosenkranz, Steinbach € 19,00

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

Voß, Schwalm € 18,00

## 2021

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

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

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

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

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

Schaarschmidt, Yen, Bosch, 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.

---

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.