

# FAT 299



Unfallvermeidung durch  
Reibwertprognosen



# Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen

## **Forschungsstelle:**

Technische Universität Berlin

Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme

Institut für Land- und Seeverkehr

Fachgebiet Kraftfahrzeuge

Dr.-Ing. Gerd Müller

Claudia Bräsemann

Noel Joao

Prof. Dr. Sahar Sodoudi

Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gefördert.

---

## Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung.....	8
2	Glätteverursachte Verkehrsunfälle .....	10
2.1	Unfallstatistik zu Glätteunfällen in Deutschland.....	10
2.2	Das Unfallvermeidungspotential durch Reibwertschätzung .....	21
3	Reibung zwischen Reifen und Straße .....	23
3.1	Schlupf.....	24
3.2	Gummireibungstheorie .....	25
3.3	Die Rauheit der Fahrbahn (Oberflächenrauheit) .....	27
3.4	Literaturstudie zur Reibwertmessung.....	29
3.5	Literaturstudie zu Methoden der Reibwertpotentialschätzung .....	34
3.6	Verfahren zur Vermessung der Oberflächengüte .....	36
4	Methodik zur Reibwertpotentialmessung.....	43
4.1	Definition der Teststrecke.....	43
4.2	Messung des maximalen Reibwerts.....	46
4.3	Die Messtechnik .....	47
4.4	Erfassung von Wetterdaten .....	53
4.5	Die Reibwertdatenbank .....	56
5	V Versuchsergebnisse.....	57
5.1	Bewertung der Messdatenqualität .....	57
5.2	Ergebnisse der Reibwertmessungen.....	63
5.3	Klassifizierung verschiedener Asphaltgüten .....	88
5.4	Untersuchung von den Reibwert beeinflussenden Kenngrößen.....	91
5.5	Vergleich der Messergebnisse mit anderen Messmethoden .....	100

---

6	Detaillierte Simulation des Wetters.....	105
6.1	Urban Heat Island Effekt.....	106
6.2	WRF Urban.....	107
6.3	Stand der Forschung.....	109
6.4	Modellaufbau .....	111
6.5	Modellinput .....	112
6.6	Ergebnis der Modellvalidierung.....	114
6.7	Mit WRF-simulierten Bodenoberflächen- und Lufttemperatur sowie Bodenoberflächenfeuchte als Prädiktor für das Reibwert-Schätzmodell.....	121
6.8	Brücken.....	126
6.9	Zusammenfassung.....	128
7	Verfahren zur Reibwertpotentialschätzung.....	130
7.1	Schätzung des maximalen Reibwerts auf Basis logistischer Regression .....	130
7.2	Prognose des maximalen Reibwertbereichs auf Basis der Zwischenschichtschätzung .....	140
7.3	Bewertung der Verlässlichkeit des Verfahrens .....	143
7.4	Echtzeitschätzung des maximalen Reibwerts.....	144
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
9	Literaturverzeichnis .....	149
10	Anhang.....	157
10.1	Messverfahren zur Rauheitsmessung .....	157
10.2	Beschreibung der Bremspunkte .....	158
10.3	Darstellung der erhobenen Daten.....	191
10.4	Vollständiger Vergleich der Lufttemperatur .....	194
10.5	Regressionskurven.....	195

---

---

---

## Verwendete Abkürzungen und Fachwörter:

BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BSR	Berliner Stadtreinigungsbetriebe
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
GIDAS	(German In-Depth Accident Study); Gemeinschaftsprojekt der BASt und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. zur umfassenden Aufnahme und Dokumentation von Verkehrsunfällen mit Personenschäden
GMA	Glättemeldeanlage
LS	Landesbetrieb Straßenwesen
PID	Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst
SKM	Seitenkraftmessverfahren
SRT	Skid Resistance Tester
SRM	Stuttgarter Reibungsmesser
UHI	Urban Heat Island (bodennaher Temperatureffekt in Großstädten)
WRF	Weather Research and Forecast Model (Modell zur Wettersimulation)
WS	Wetterstation

---

---

## 1 Einleitung

Der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn bestimmt maßgeblich die fahrdynamischen Grenzen eines Pkws und ist somit für die sichere Längs- und Querführung von zentraler Bedeutung. Die möglichst genaue Kenntnis des aktuellen Reibwerts ist daher von großer Bedeutung. Auf der einen Seite kann das Wissen über das Reibwertpotential den Fahrer befähigen seine Fahrweise den gegebenen Verhältnissen anzupassen und so kritische Situationen von vornherein zu verhindern. Auf der anderen Seite wird die Entwicklung zum teil- und hochautomatisierten Fahren mit der Forderung nach mehr und genaueren Umfeldinformationen verbunden sein.

Den maximalen Reibwert mit Hilfe geeigneter Sensorik zu ermitteln oder zu schätzen war und ist Bestandteil zahlreicher Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten. Viele der verfolgten Ansätze sind dabei erfolgreich, gehen jedoch häufig mit der Nutzung von teurer und aufwändiger Sensorik einher, die eine Umsetzung des Verfahrens für Serienfahrzeuge unwirtschaftlich machen.

Im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojekts „Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen“, welches am Fachgebiet Kraftfahrzeuge der Technischen Universität Berlin durchgeführt und vom Arbeitskreis 20 der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) finanziert und beratend unterstützt wurde, wurde ein ursachenbasiertes Schätzverfahren für den maximalen Reibwert entwickelt, welches allein auf Informationen zurückgreift, die ohne zusätzliche Sensorik verfügbar sind. Das können einerseits Messwerte sein, die im Fahrzeug selbst erhoben werden, wie z.B. die Außentemperatur, die Fahrzeuggeschwindigkeit oder die Regenintensität. Zum andern werden Informationen verwendet, welche die umgebende Infrastruktur zur Verfügung stellt. Hierzu zählen Wetterinformationen von Wettermessstationen oder auch Straßenzustandsbeschreibungen von Glättemeldeanlagen. Über die Fusion dieser Informationen wird dann mit Hilfe des entwickelten Schätzverfahrens der Bereich des maximalen Reibwerts abgeschätzt.

Zur Entwicklung eines solchen Schätzverfahrens war es zunächst notwendig, detaillierte Kenntnisse über den Einfluss verschiedener Parameter auf den maximalen Reibwert zu erlangen. Da dieses Wissen nicht allein auf Basis einer Literaturrecherche erarbeitet werden konnte, war es notwendig umfangreiche Messfahrten zur unmittelbaren Messung des maximalen Reibwerts durchzuführen. Dazu wurden in einem Zeitraum von zwei Jahren auf einer definierten Route im städtischen und ländlichen Raum in und im Umland von Berlin Messfahrten durchgeführt. Dabei wurde unter Realbedingungen mit Hilfe von Testbremsungen untersucht, in welchem Bereich sich das Reibwertpotential bei unterschiedlichen Randbedingungen befindet. Die den Reibwert beeinflussenden Umweltbedingungen wurden dabei detailliert in einer Datenbank erfasst. Damit wurde nicht nur eine solide Wissensgrundlage für die Erarbeitung eines Reibwertschätzverfahrens erarbeitet. Die Datenbank selbst ermöglicht umfassende Untersuchungen zum Reibwertpotential unter

verschiedenen Randbedingungen. Einflussgrößen können hinsichtlich ihrer Wirkweise auf den maximalen Reibwert von verschiedenen Reifentypen bewertet werden.

In dem vorliegenden Forschungsbericht wird zunächst in Kapitel 2 das glätteverursachte Unfallgeschehen näher untersucht. Dazu wurden einerseits die Zahlen des statistischen Bundesamtes analysiert, andererseits wurde eine detaillierte Auswertung der GIDAS-Daten hinsichtlich Glätteunfällen beauftragt. Basierend auf diesen Zahlen wurde das Unfallvermeidungspotential einer Reibwertprognose untersucht.

Im Kapitel 3 werden die grundsätzlichen physikalischen Zusammenhänge der Reibung zwischen einem rollenden Rad auf einer Fahrbahnoberfläche erläutert. Die Auswertung bisheriger Veröffentlichungen zu diesem Thema und die Vorstellung von gängigen Messverfahren zur Beurteilung der Oberflächengüte sind ebenfalls Bestandteil dieses Kapitels.

Die für die Messdatenerfassung genutzte Messtechnik und die erfassten Messgrößen werden in Kapitel 4 beschrieben. Darauf aufbauend werden in Kapitel 5 die Messdaten detailliert ausgewertet und es werden Zusammenhänge zwischen dem maximalen Reibwert und den ihn beeinflussenden Parametern aufgezeigt.

Möglichkeiten und Potentiale für die Reibwertschätzung, die sich aus einer möglichst exakten Simulation des Wetters ergeben, werden in Kapitel 6 diskutiert. Dabei wird zunächst erklärt, wie solche Simulationen grundsätzlich durchgeführt werden und welche Details berücksichtigt werden können.

In Kapitel 7 werden das Verfahren zur Reibwertschätzung und die Methodik dazu erläutert. Anschließend wird das Potential des Schätzverfahrens aufgezeigt, indem es auf die vorhandenen Messdaten angewendet wird. Darauf basierend wird abschließend die Echtzeitschätzung des entwickelten Schätzalgorithmus' vorgestellt und bewertet.

Die Zusammenfassung der in diesem Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse und ein Ausblick auf die folgenden Arbeitsschritte finden sich abschließend in Kapitel 8.

## 2 Glätteverursachte Verkehrsunfälle

Um den Nutzen einer Reibwertprognose abschätzen zu können, ist es zunächst notwendig einen detaillierten Blick auf das Unfallgeschehen zu werfen, welches im Zusammenhang mit Glätte steht. Basierend auf diesen Zahlen lässt sich dann das Potential einer Reibwertschätzung ermitteln.

### 2.1 Unfallstatistik zu Glätteunfällen in Deutschland

Unfälle, die durch Glätte verursacht werden, sind in der Regel auf einen zu geringen bzw. überschätzten Reibwert zurückzuführen. Eine Auswertung der Unfalldaten vom statistischen Bundesamt (DESTATIS) zeigt, dass glättebedingte Unfälle in der Gesamtunfallstatistik zwar keine dominante aber dennoch eine relevante Rolle spielen. Demnach gab es im Jahr 2014 über 10.000 Unfälle, die durch Glätte (Regen, Eis und Schnee) verursacht wurden, wobei 122 Menschen ums Leben kamen, 2.674 wurden schwer und 11.222 wurden leicht verletzt (Abbildung 1).

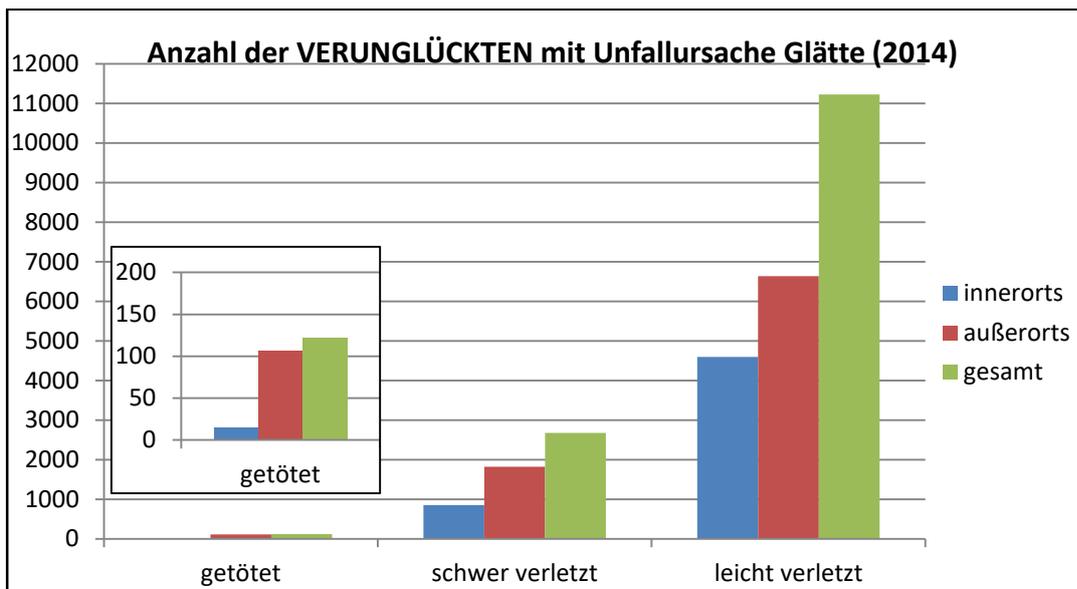


Abbildung 1: Zahl der Verunglückten bei Glätteunfällen im Jahr 2014 [DESTATIS, 2015]

Im Verhältnis zum Gesamtunfallgeschehen bedeutet das, dass mindestens 3,6 % der Getöteten im Straßenverkehr bei Unfällen ums Leben kamen, die durch Glätte verursacht wurden (Abbildung 2). Die Zahl der Unfälle, die bei Glätte geschehen sind, ohne dass diese als Hauptursache identifiziert wurde, liegt bei rund 20 %. Entsprechend ist davon auszugehen, dass glatte Straßenverhältnisse in weitaus mehr Fällen, als in der amtlichen Statistik angegeben, ursächlich für verunglückte Verkehrsteilnehmer sind.

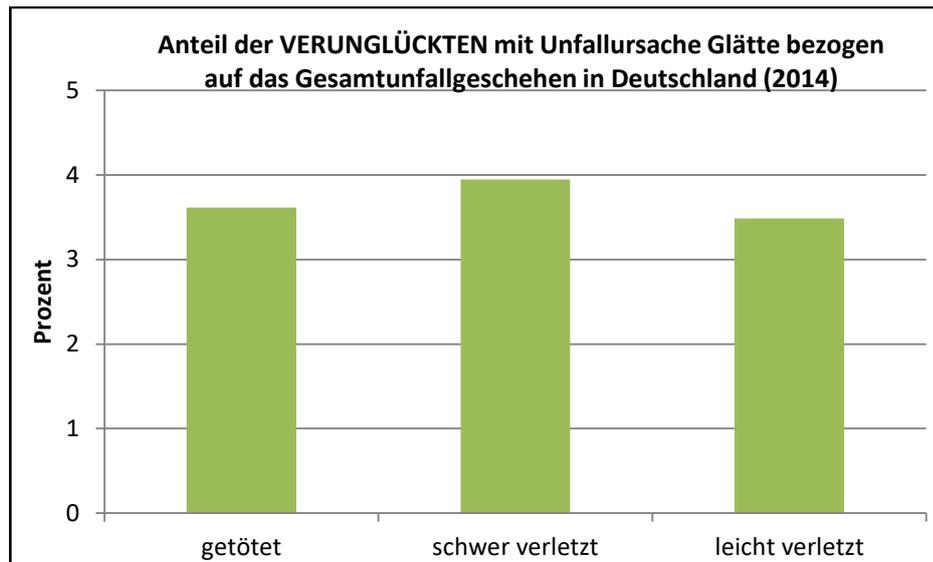


Abbildung 2: Anteil der Verunglückten am Gesamtunfallgeschehen

Ein Vergleich der Entwicklung über die letzten drei Jahre zeigt dabei das bemerkenswerte Ergebnis, dass die Zahl der tödlich Verletzten durch Glätteunfälle innerhalb von drei Jahren nahezu halbiert wurde. Da sich in diesem Zeitraum die Marktdurchdringung von Assistenzsystemen zur Längs- und Querregelung, wie ESP und ABS, nicht grundsätzlich verändert hat, ist davon auszugehen, dass der positive Trend der Getötetenzahlen unmittelbare auf den Einfluss von mildem Winterwetter zurückzuführen ist (Abbildung 3).

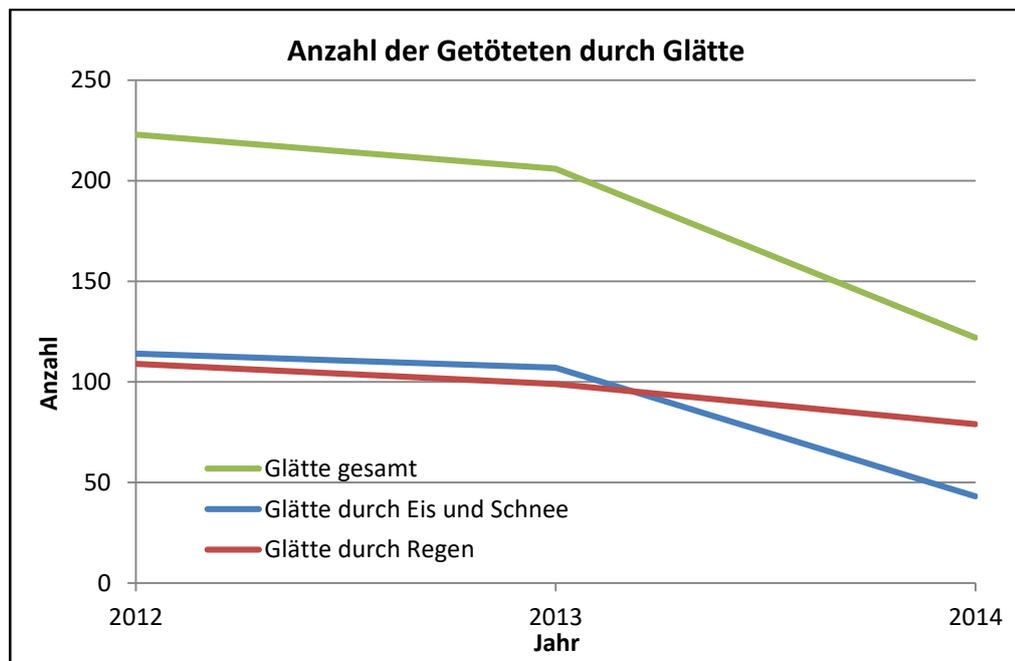


Abbildung 3: Zahl der Getöteten durch Glätteunfälle

### 2.1.1 Unfalldatenanalyse für Unfälle bei unvorhersehbarer Glätte

Für eine detaillierte Analyse von Glätteunfällen wurde die Verkehrsunfallforschung Dresden (VUFO) beauftragt, auf Basis der GIDAS-Datenbank gezielte Auswertungen vorzunehmen. Dabei wurden Unfälle betrachtet, bei denen die Glätte unvorhersehbar auftrat, der Autofahrer sich also darauf nicht einstellen konnte. Diese Unfälle wurden beispielsweise beschrieben durch Unfallursachen wie Blitzeis, Aquaplaning oder Schnee. Diesen Fällen wurde das gesamte Unfallgeschehen bei trockener Fahrbahn gegenübergestellt, also all jene Fälle, bei denen ein geringer Reibwert als Unfallursache ausgeschlossen werden kann.

Zunächst hat sich gezeigt, dass bei unvorhersehbaren Glätteunfällen die Ursache „Eisglätte“ klar dominiert. „Aquaplaning“ ist in jedem siebenten Unfall ursächlich (Abbildung 4).

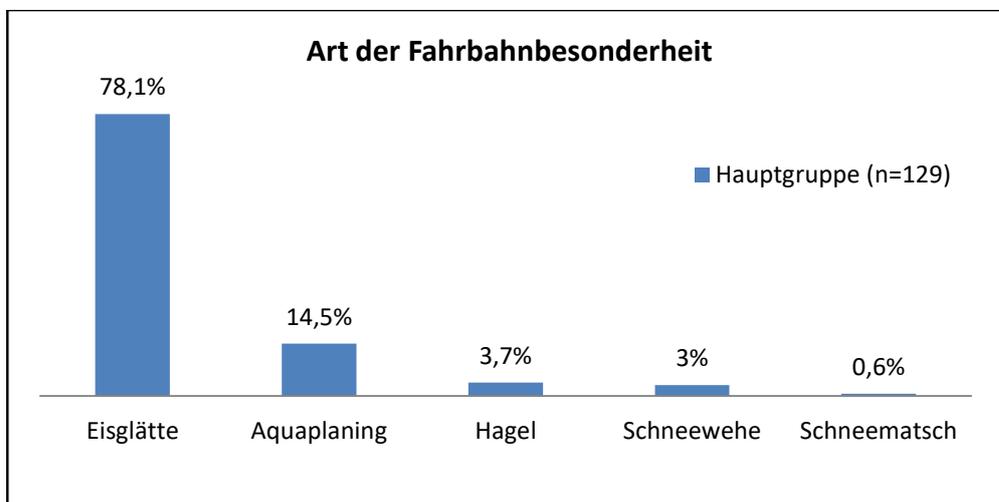


Abbildung 4: Verteilung der Glätteunfälle nach Zwischenschicht

Beim Vergleich der Verletzungsschwere beider Untersuchungsgruppen zeigt sich, dass die Gefahr von schweren und tödlichen Verletzungen bei Glätteunfällen gegenüber dem sonstigen Unfallgeschehen deutlich erhöht ist. Das Risiko bei einem Glätteunfall ums Lebens zu kommen steigt um den Faktor 2,7 (Abbildung 5).

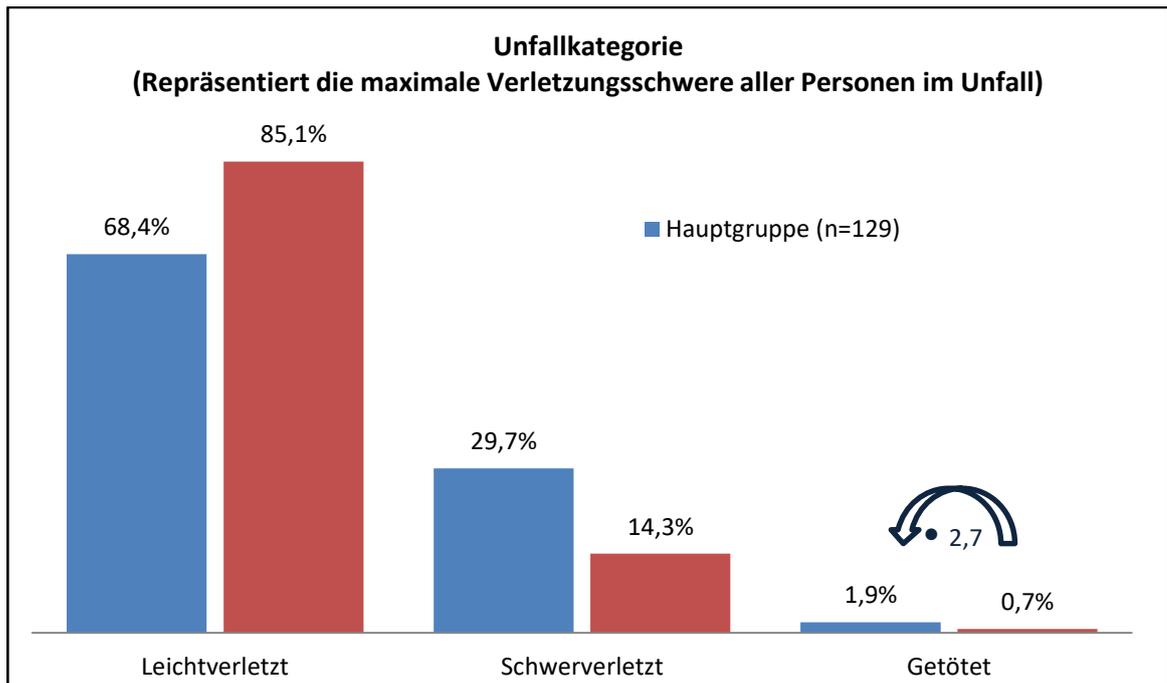


Abbildung 5: Vergleich der Verletzungsschwere für Glätteunfälle und Unfällen bei Trockenheit

Beim Vergleich der Ortslage des Unfallgeschehens zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Vergleichsgruppen. Während die Referenzgruppe mit rund 72 % Innerortsanteil ungefähr dem Gesamtunfallgeschehen in Deutschland entspricht, ereignen sich über 80 % der Glätteunfälle außerorts (Abbildung 6).

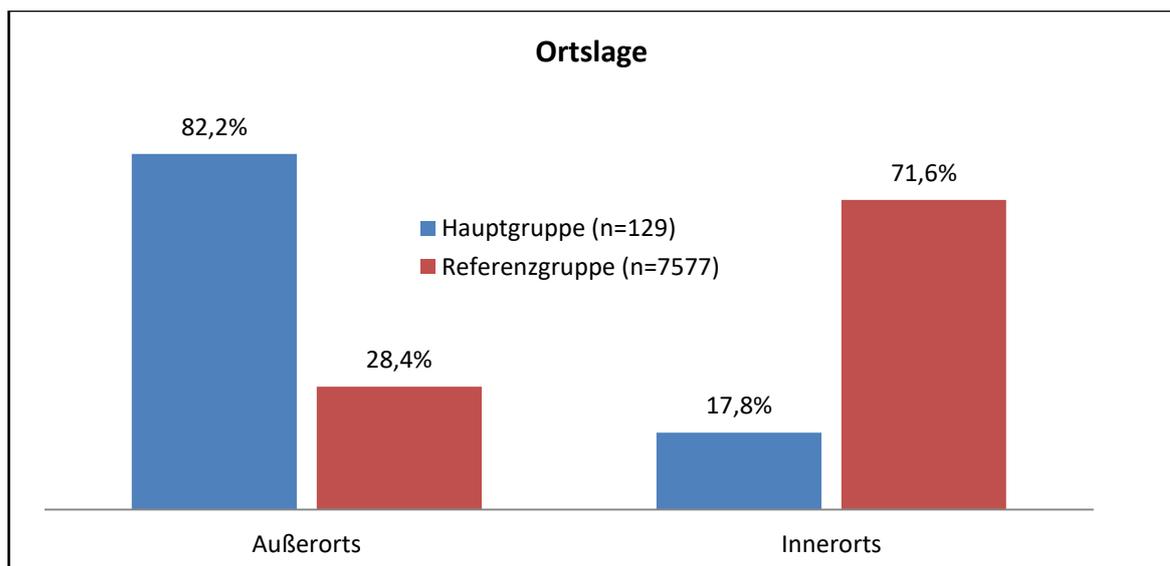


Abbildung 6: Vergleich der Ortslage für Glätteunfälle und Unfällen bei Trockenheit

Die Auswertung der Niederschlagsart zum Unfallzeitpunkt ergab, dass es in rund 70 % der Fälle keinen Niederschlag gab. Dies dürfte ein maßgeblicher Grund für die Unvorhersehbarkeit der Glätte sein (Abbildung 7).

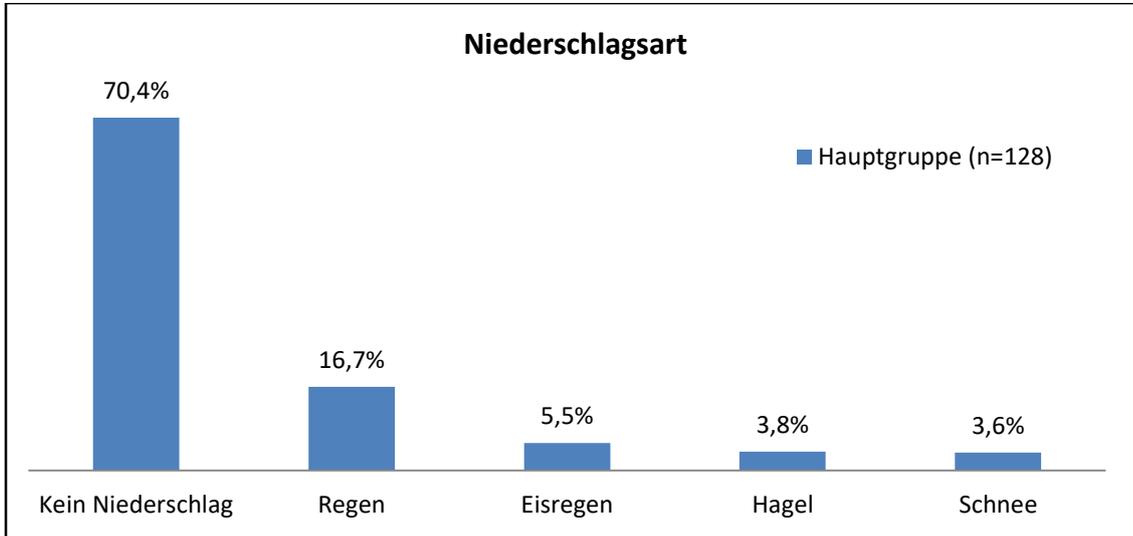


Abbildung 7: Verteilung der Niederschlagsart für Glätteunfälle

Der Vergleich der technischen Ausstattung der Fahrzeuge zeigt, dass Systeme wie ABS oder ESP die Gefahr von Glätteunfällen deutlich reduzieren. So steigt das Risiko ohne ABS um den Faktor 1,9, ohne ESP um den Faktor 1,5 (Abbildung 8).

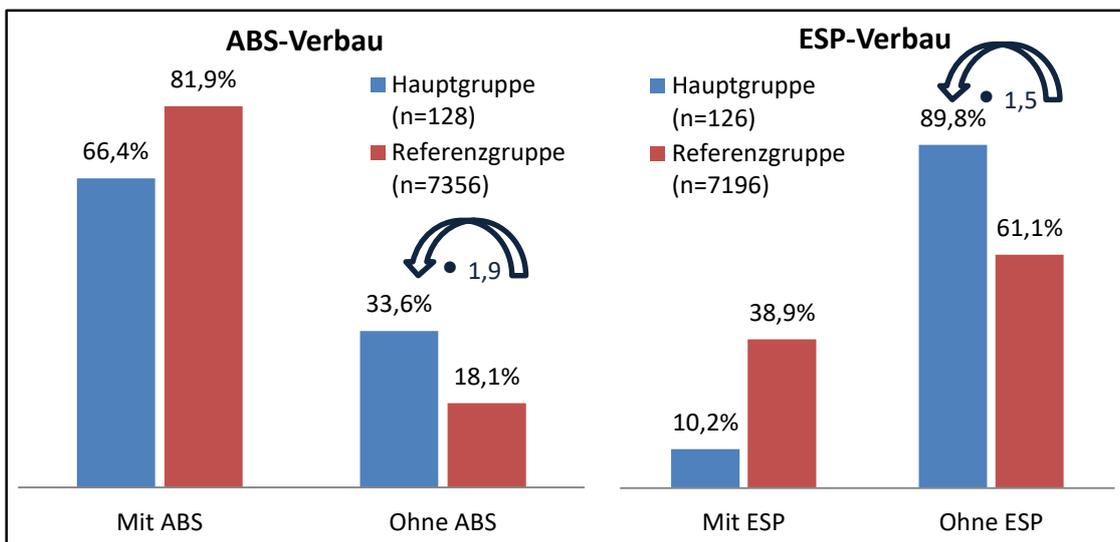


Abbildung 8: Vergleich der Häufigkeit von Glätteunfällen in Abhängigkeit von ABS und ESP

## 2.1.2 Unfalldatenanalyse für Unfälle bei Glätte allgemein

In einer weiteren Unfallanalyse, die erneut durch die Verkehrsunfallforschung Dresden (VUFO) durchgeführt wurde, wurde das Unfallgeschehen bei Glätte insgesamt untersucht. Auch hier stand wieder der Vergleich zu dem „normalen“ Unfallgeschehen im Fokus (Referenzgruppe). Das sind also jene Unfälle, die bei Trockenheit geschehen sind und definitiv nicht mit geringerem Reibwert in Verbindung stehen. Zur Hauptgruppe wurde Fälle gezählt, bei denen der Reibwert weniger als 60 % von dem Wert betrug, der bei trockener Fahrbahn vorgelegen hätte.

Bei der Auswertung der Unfallart beider Vergleichsgruppen ist deutlich zu erkennen, dass Abkommensunfälle und Kollisionen mit dem Gegenverkehr deutlich stärker vertreten sind, als das im Gesamtunfallgeschehen der Fall ist (Abbildung 9). Hier zeigt sich, dass auf tendenziell glatter Fahrbahn das Potential zum Stabilitätsverlust und dem daraus resultierenden Abkommen von der Fahrbahn deutlich ansteigt.

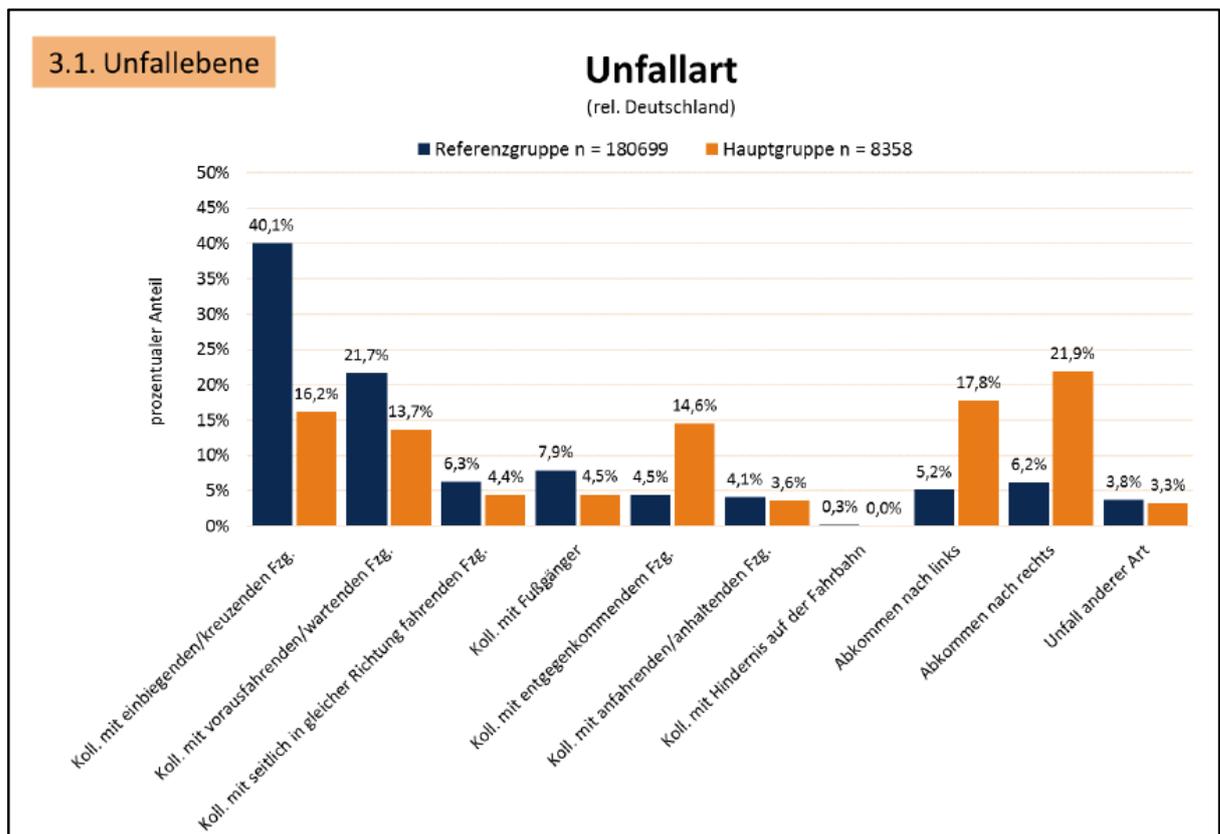


Abbildung 9: Vergleich der Unfallart bei Glätteunfällen

Beim Betrachten der Unfallstelle ergibt sich ein vergleichbares Bild. Unfälle in der Hauptgruppe geschehen vergleichsweise häufig in Kurven, also dort, wo die Gefahr des Kontrollverlusts durch

mangelnden Reibwert besonders hoch ist. Unfallorte wie Kreuzungen, Einmündungen und Einfahrten sind dafür im Vergleich zur Referenzgruppe unterrepräsentiert (Abbildung 10).

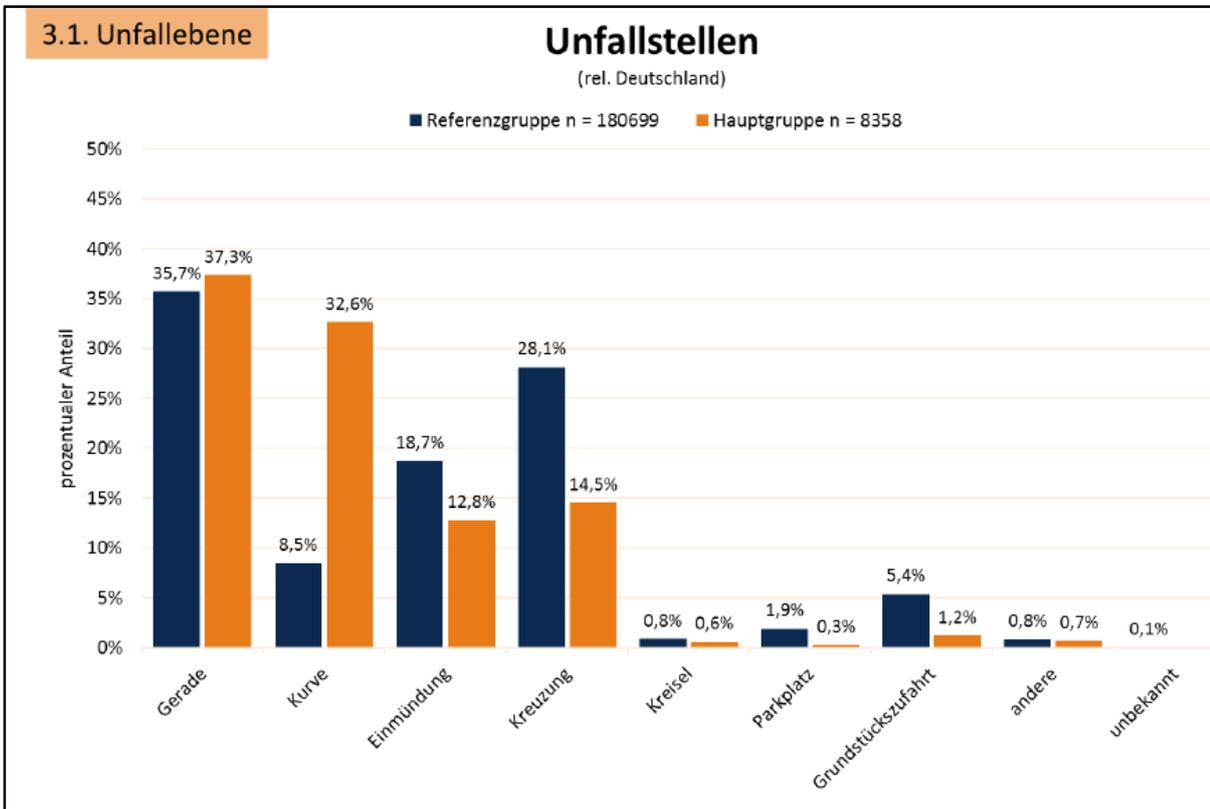


Abbildung 10: Vergleich der Unfallstellen für Glätteunfälle

Bei der Auswertung des Unfallgeschehens in Abhängigkeit von der Jahreszeit ergibt sich in der Hauptgruppe erwartungsgemäß eine deutliche Verschiebung zu den Wintermonaten hin. In dieser Jahreszeit treten Fahrbahnzustände mit geringem Reibwert, insbesondere Schnee und Eis, besonders häufig auf (Abbildung 11).

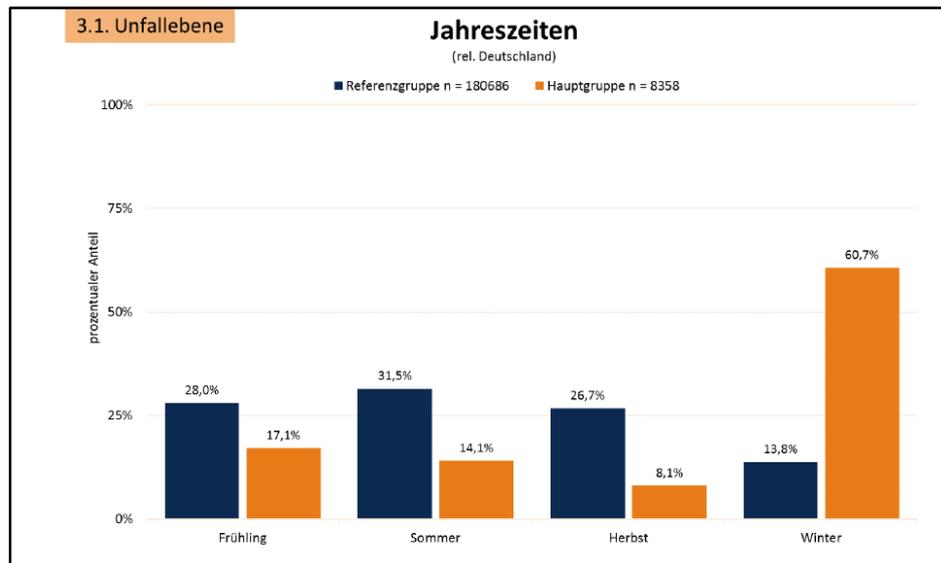


Abbildung 11: Vergleich der Jahreszeit für Glätteunfälle

In Abbildung 12 ist der Vergleich beider Gruppen für verschiedene Tageszeiten dargestellt. Hier ergibt sich eine Verschiebung für die Hauptgruppe zu den Dämmerungs- und Nachtstunden hin. Das ergibt sich einerseits aus der vorherigen Darstellung, nach der viele Unfälle im Winter geschehen, also zu einer Jahreszeit in der es kürzere Tageslichtphasen gibt. Andererseits liegt die Annahme nahe, dass bei Dämmerung und Dunkelheit glatte Fahrbahnen schlechter zu erkennen sind und so auch entsprechend schlechter die Fahrweise auf diese Situation angepasst wird.

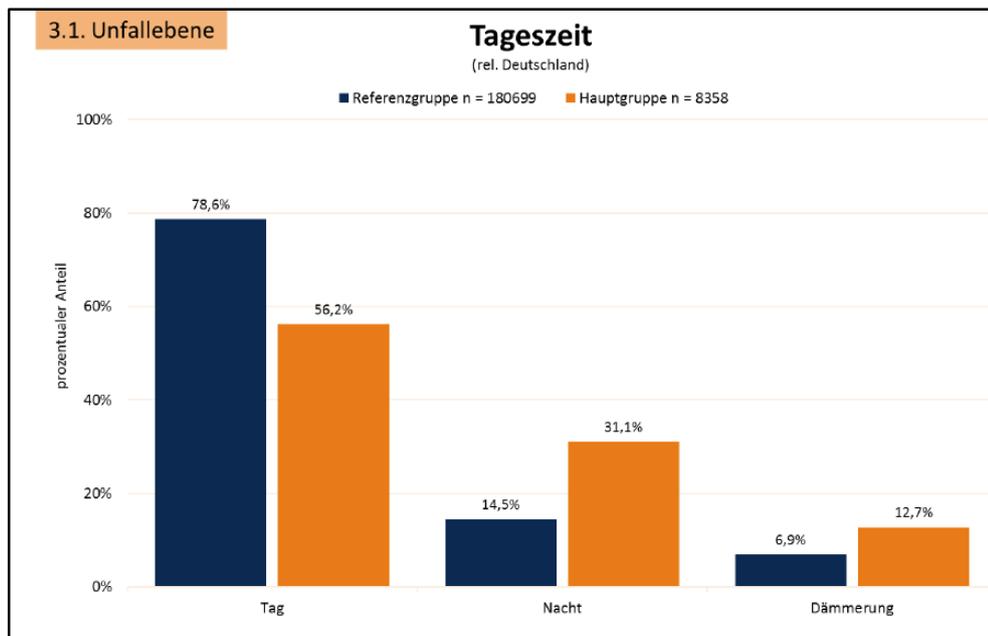


Abbildung 12: Vergleich der Tageszeit für Glätteunfälle

Beim Vergleich der Niederschlagsart für beide Gruppen zeigt sich, dass über die Hälfte aller Glätteunfällen dann passieren, wenn es keinen Niederschlag gibt. In der Referenzgruppe lag definitionsgemäß immer eine trockene Fahrbahn vor (Abbildung 13).

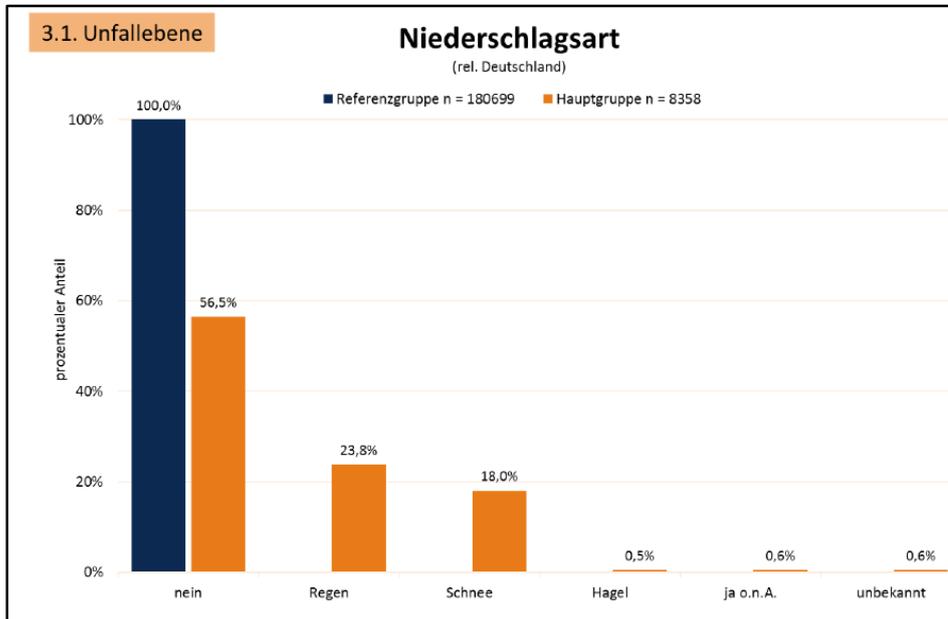


Abbildung 13: Darstellung der Niederschlagsart für Glätteunfälle

Die Auswertung des Straßenzustands selbst zeigt, dass ein überwiegender Anteil der Glätteunfälle bei Schnee geschieht. Nässe und Rauheif bzw. Eis sind weitere Zustände, die Glätteunfälle begünstigen (Abbildung 14).

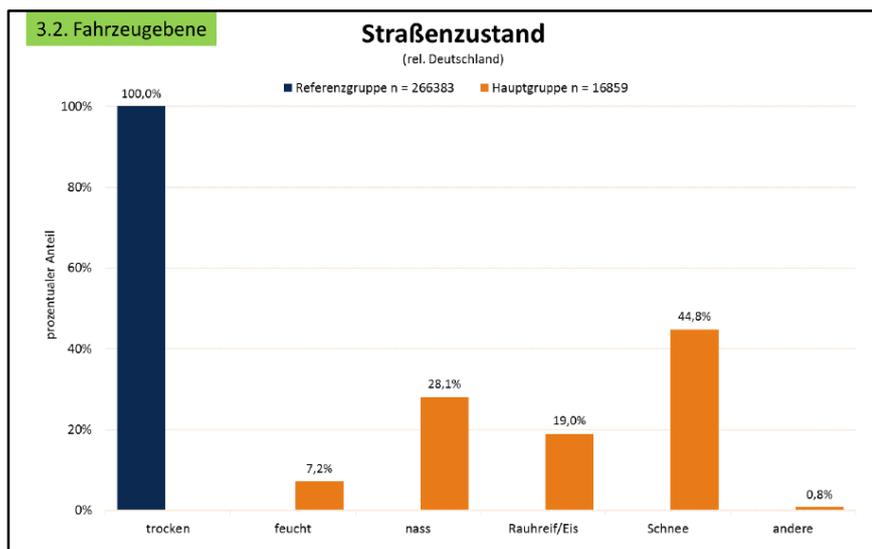


Abbildung 14: Vergleich des Straßenzustands für Glätteunfälle

In Abbildung 15 ist der Vergleich des Unfallgeschehens für verschiedene Straßenklassen zu sehen. Hierbei ist zu erkennen, dass Glätteunfälle im Vergleich zur Referenzgruppe häufiger auf untergeordneten Straßen (Landes-, Staats-, und Kreisstraßen) geschehen. Das kann einerseits durch den geringeren Ausbaustand erklärt werden, da diese Straßen in der Regel schmaler sind und weniger infrastrukturelle Sicherheitsmaßnahmen wie beispielsweise Leitplanken bieten. Andererseits kann davon ausgegangen werden, dass diese Straßen schlechter und seltener bei Schnee und Eis geräumt werden.

Zusätzlich auffällig ist, dass der Anteil von Glätteunfällen auf der Autobahn auch höher ist, als der Anteil von Unfällen auf der Autobahn in der Referenzgruppe. Hier kann als mögliche Erklärung die höhere Fahrgeschwindigkeit herangezogen werden, die das Auftreten von Aquaplaning wahrscheinlicher macht.

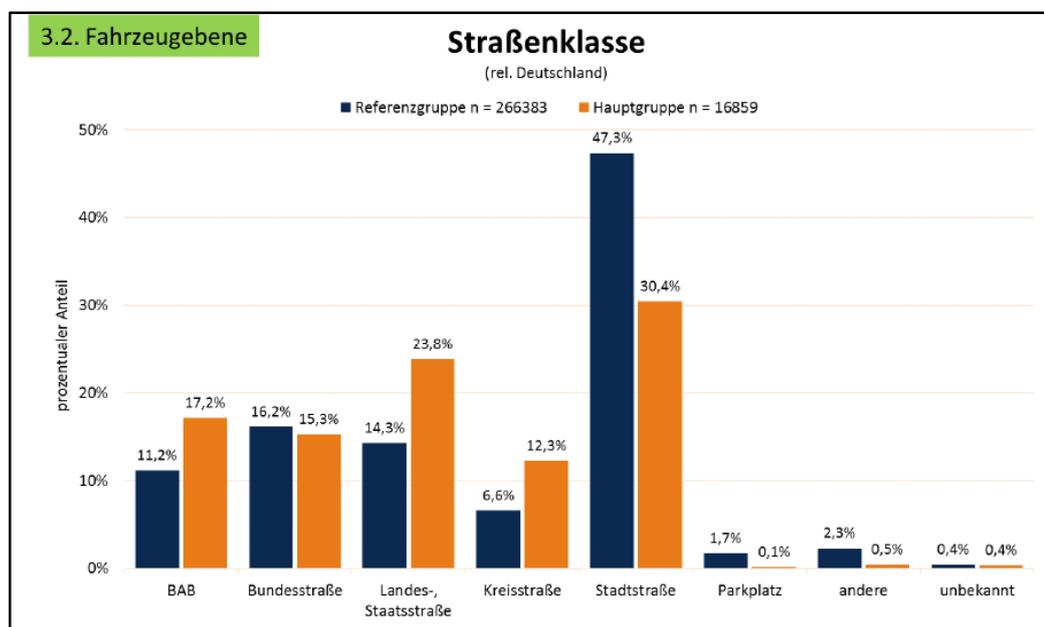


Abbildung 15: Vergleich der Straßenklasse für Glätteunfälle

In Abbildung 16 zeigt sich einmal mehr, dass die Gefahr bei einem Glätteunfall verletzt zu werden größer ist, größer ist, als im Unfallgeschehen auf trockener Fahrbahn. Als Ursache hierfür dürfte gelten, dass die Kollisionsgeschwindigkeit aufgrund der höheren Ausgangsgeschwindigkeit (mehr Unfälle außerorts und auf Autobahnen) und aufgrund der geringeren Fahrzeugverzögerung durch den geringeren Reibwert höher ist. Damit kommt es zu höheren Insassenbeschleunigungen und zu einer höheren Fahrzeugintrusion womit das Verletzungsrisiko ansteigt.

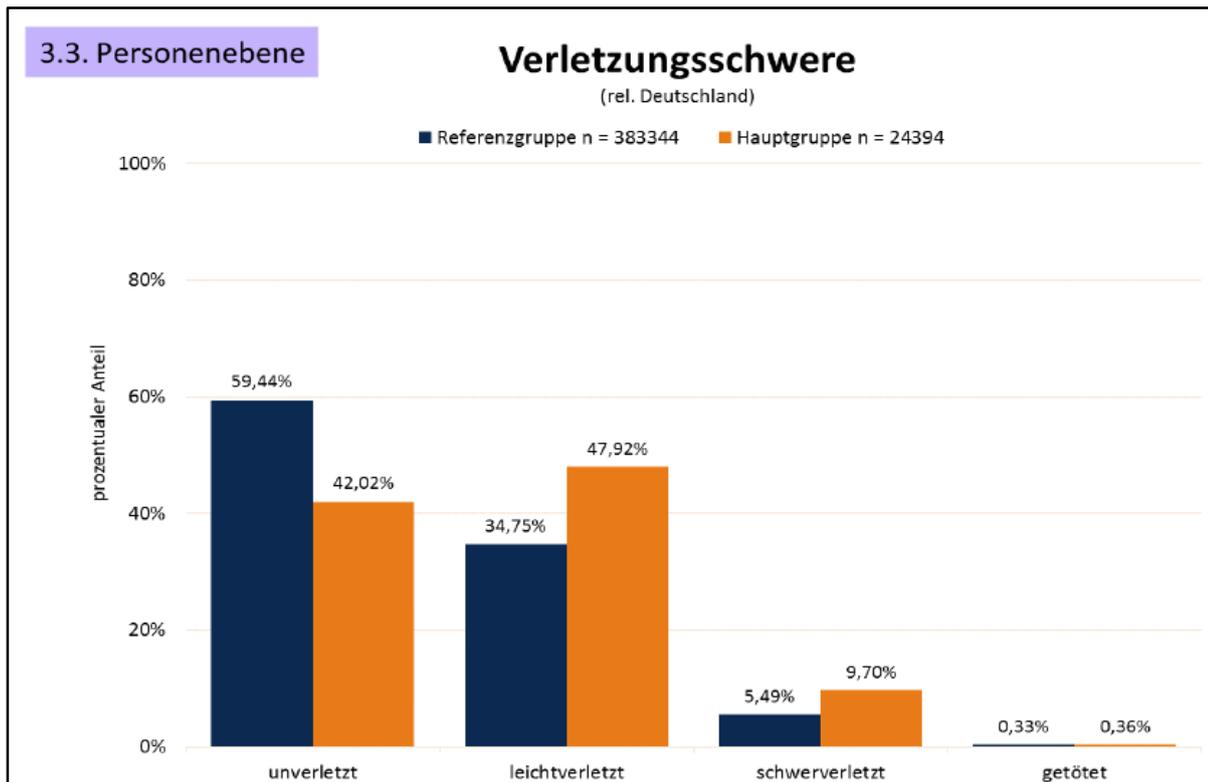


Abbildung 16: Vergleich der Verletzungsschwere für Glätteunfälle

In der vorgestellten Analyse von Glätteunfällen wurde abschließend untersucht, inwiefern bei den einzelnen Unfällen, die bei Glätte passiert sind, der geringe Reibwert tatsächlich unfallverursachend war, oder ob dieser Zustand für das eigentliche Unfallgeschehen nicht relevant war. Dabei wurden drei Gruppen definiert. In Fällen, bei denen der Reibwert niedrig war und gleichzeitig die Unfallursache „unangepasste Geschwindigkeit“ kodiert wurde, war die Glätte „unfallursächlich“. Bei Unfällen, die ebenfalls bei Glätte auftraten, bei denen aber keine „unangepasste Geschwindigkeit“ codiert war, wurde die tatsächliche Reibwertausnutzung ausgewertet. Lag diese oberhalb von 60 % von dem was, tatsächlich zur Verfügung stand, so wurde der geringe Reibwert als „potenziell unfallbeeinflussend“ eingestuft. Damit sind also Unfälle beschrieben, bei denen Fahrer versucht hat das Fahrzeug stark zu verzögern, den Unfall aber dennoch nicht vermeiden konnte. Bei Unfällen, bei denen das Reibwertpotential zu weniger als 60 % ausgenutzt wurde, obwohl dieses aufgrund der Glätte bereits reduziert war, wurde das geringe Gripelevel als nicht relevant bewertet.

Eine Einteilung der Glätteunfälle in die beschriebenen Kategorien ist in Abbildung 17 zu sehen. In knapp der Hälfte aller Unfälle bei geringem Reibwert ist dieser unfallursächlich, etwa dreiviertel alle Glätteunfälle ist der geringe Reibwert mindestens potentiell unfallbeeinflussend. Der Anteil der Unfälle, die zwar bei Glätte geschehen, bei denen die Glätte tatsächlich aber nicht relevant ist, beträgt also nur 25 %.

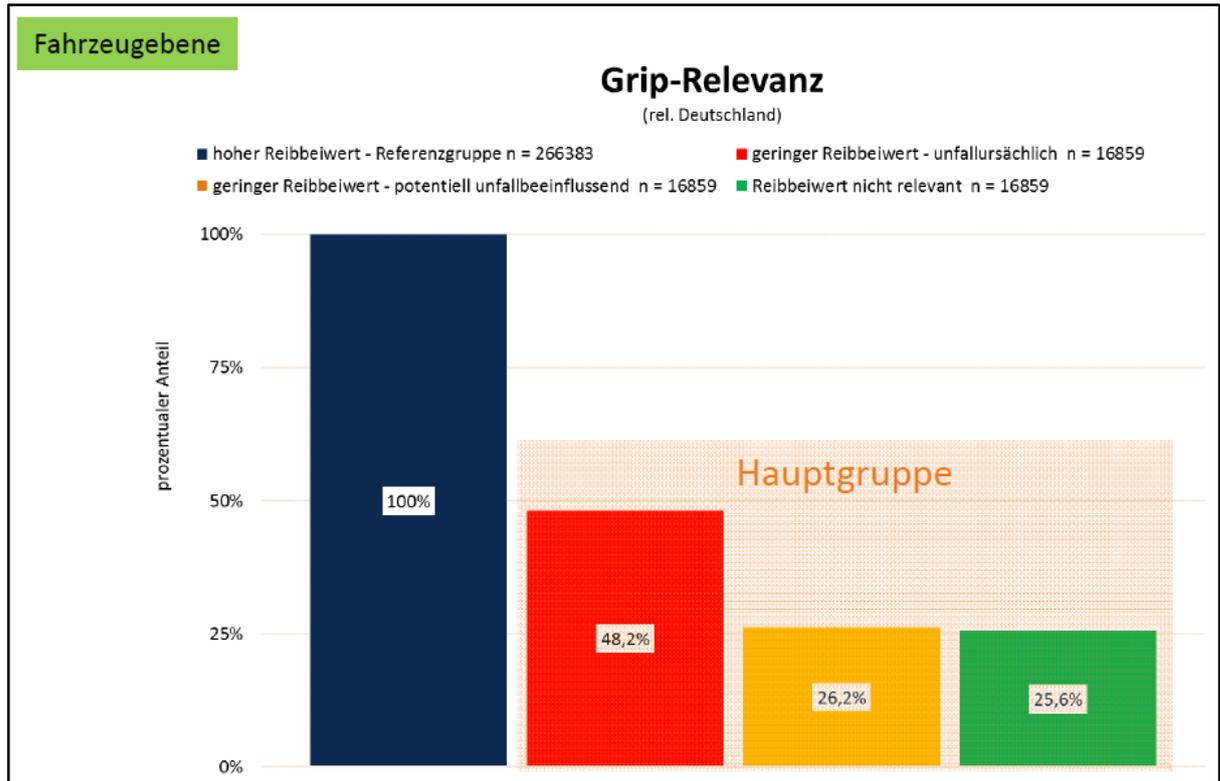


Abbildung 17: Vergleich der Grip-Relevanz für das Unfallgeschehen bei Glätte

Damit zeigt sich noch mal deutlich, dass ein geringer Reibwert im Gesamtunfallgeschehen und insbesondere bei der Anzahl der verunglückten Verkehrsteilnehmer (s.o.) eine erhebliche Rolle spielt und dass sich hinter einer effizienten Reibwertschätzung, die das Vermeiden solcher Unfälle zum Ziel hat, ein großes Potential birgt.

## 2.2 Das Unfallvermeidungspotential durch Reibwertschätzung

Im Jahr 2014 wurden fast 14.000 Menschen bei Unfällen, die durch Glätte verursacht wurden, verletzt, mindestens 3,6 % der Verkehrstoten sind auf Unfälle zurückzuführen die durch Glätte verursacht wurden. Die Zahl der Getöteten und Verletzten, die bei Unfällen mit Glätte verunglückten, ist ungleich höher. Hier war die Glätte nicht die Hauptunfallursache kann, aber einen entscheidenden Beitrag als Unfallursache sein. Die Auswertung der Unfallstatistik zeigt (siehe Abbildung 5), dass das Risiko bei einem Glätteunfall tödlich verletzt zu werden um den Faktor 2,7 erhöht ist. Die gezeigten Zahlen zeigen eindrücklich, dass es unbedingt sinnvoll ist ein Verfahren zu entwickeln, deren Ziel es ist den Reibwert zu schätzen, um Unfälle zu vermeiden oder wenigstens deren Folgen zu minimieren. Ein gut funktionierendes System hätte ein großes Potential die Unfallstatistik positiv zu beeinflussen. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass das Wissen um einen aktuellen niedrigen Reibwert nicht nur

für den Fahrer, sondern auch für aktuelle und zukünftige Fahrerassistenzsysteme relevant sein kann, ergibt sich für die Reibwertschätzung der Mehrwert, dass dieses System sowohl für Fahrzeuginsassen als auch für ungeschützte Verkehrsteilnehmer einen Sicherheitsgewinn bieten kann.

### 3 Reibung zwischen Reifen und Straße

Wenn zwei Körper aneinander reiben, entsteht eine Reibungskraft  $F_R$ . Diese ist das Produkt aus der Reibungszahl  $\mu$  (auch Reibwert genannt) und einer Normalkraft  $F_N$ . Damit ergibt sich die Basisformel des Coulomb'schen Reibungsgesetzes wie folgt:

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (\text{Gl. 1})$$

Reibung kann prinzipiell zwischen allen beliebigen Stoffen vorkommen, wie zum Beispiel zwischen Metall-Metall, Metall-Beton oder Glas-Stein. Ein Spezialfall ist Reibung mit Beteiligung von Gummi. Die Reibungsphysik lässt sich in diesem Fall nicht mehr allein durch die Coulomb'sche Reibung beschreiben, sondern sie wird von diversen anderen Effekten beeinflusst. Im Falle der Reibung eines Gummireifens auf einer Straßenoberfläche können grundsätzlich drei Reibungsarten auftreten:

- die Haftreibung,
- die Gleitreibung und
- die Rollreibung.

Diese Reibungsarten treten je nach Fahrsituation auf:

- Haftreibung tritt nur bei stehenden Reifen auf,
- Rollreibung tritt während der Fahrt auf,
- Reine Gleitreibung tritt beim Rutschen des Reifens auf der Straße auf.

Letzteres ist bei einem stehen Fahrzeug und einem durchdrehenden Rad der Fall, genauso wie bei einem sich bewegendem Fahrzeug und einem blockierten Rad.

Weiterhin ergibt sich beim Reifen-Fahrbahn-Kontakt die Besonderheit, dass die Rollreibung praktisch immer auch mit Schlupf, also mit Gleitreibung verbunden ist. Das bedeutet, dass es neben dem eigentlichen Abrollvorgang auch immer zu einer Verformung des Reifens kommt. Dieser Effekt macht die Bestimmung des Reibwerts zu einer komplexen Aufgabe. Ein schlupffrei abrollendes Rad ist bestenfalls unter nahezu Idealbedingungen zu beobachten, bei denen auf das Rad keine Längs- und Querkräfte wirken.

Nach [Bachmann, 1998] wird das System Reifen-Straßen-Reibung in vier grundsätzliche Parametergruppen unterteilt (Abbildung 18).

Dem Reibwert kommt aus Sicht der Fahrzeugsicherheit eine besondere Bedeutung zu. Er bestimmt in welchem Maß Längs- und Seitenkräfte übertragen werden können und daraus resultierend wie stark das Fahrzeug verzögert werden kann. So bewirkt eine Verringerung des Reibwerts um 30 % eine Verlängerung des Bremsweges um 43 %. Die Restgeschwindigkeit am ursprünglichen Anhaltepunkt, beträgt noch 55 %. Eine weitere Beispielrechnung zeigt, dass der Bremsweg um 233 % steigt, falls  $\mu$

auf 30 % des ursprünglichen Werts absinkt, die Restgeschwindigkeit beträgt dann 84 %. Steigt  $\mu$  um 20 %, so würde der Bremsweg um 16,7 % verkürzt werden. Bei diesen Werten handelt es sich um theoretische Berechnungen nach folgender Formel:

$$v_r = v_0 \sqrt{\frac{\mu_0 - \mu}{\mu_0}} \quad , \quad (Gl. 2)$$

wobei  $v_r$  die Restgeschwindigkeit,  $v_0$  die Anfangsgeschwindigkeit,  $\mu_0$  der ursprüngliche Reibwert und  $\mu$  der veränderte Reibwert ist.

Parametergruppe	Parameter
<b>Reifen</b>	Typ (Bauart)Laufstreifen Mischung
<b>Fahrbahn</b>	Geometrie Fahrbahndecke
<b>Zwischenmedium</b>	Art Schichtdicke Temperatur Dichte
<b>Fahrzeug</b>	Geschwindigkeit Radkräfte, -momente Radstellung Radbetriebspunkt Überlagerung von Längs- und Seitenkräften

Abbildung 18: Einflüsse auf den Reibwert unterteilt in Parametergruppen und dazugehörige Parameter  
[veränderte Darstellung nach: Bachmann, 1998]

### 3.1 Schlupf

Der Schlupf ist eine dimensionslose Zahl und beschreibt das Verhältnis zwischen Umfangsgeschwindigkeit des Reifens und Fahrzeuggeschwindigkeit. Der Einfachheit halber wird in der Regel zwischen Bremsschlupf und Antriebsschlupf unterschieden. Von 100 % Bremsschlupf wird gesprochen, wenn ein Rad blockiert, das Fahrzeug aber noch eine Geschwindigkeit besitzt. Im Gegensatz dazu bedeuten 100 % Antriebsschlupf, dass sich ein Rad dreht, während das Fahrzeug vollständig steht. Zwischen den Größen „Reibwert“ und „Schlupf“ gibt es einen unmittelbaren Zusammenhang, der allerdings von verschiedenen Parametern beeinflusst wird. Der Zusammenhang zwischen beiden Größen ist in Abbildung 19 dargestellt.

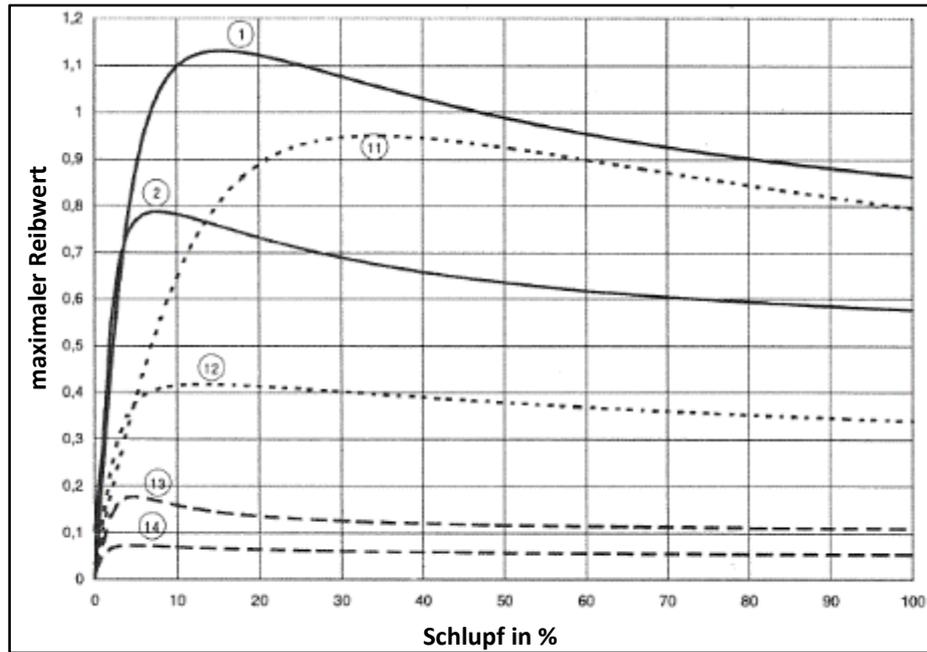


Abbildung 19: Reibwert-Schlupf-Kurven des Standardreifens unter Variation der Fahrbahnoberfläche und der Witterungsverhältnissen; 1: Asphalt trocken, 2: Asphalt feucht, 11: Kopfsteinpflaster trocken, 12: Kopfsteinpflaster feucht, 13: Reif, 14: Eis [Abbildung gemäß Bachmann, 1998, S. 60]

Der maximale Reibwert stellt sich in Abhängigkeit von der Straßenoberfläche und von der Zwischenschicht, in der Regel für einen Schlupfwert zwischen 5 und 20 %, ein. Um eine optimale Kraftübertragung zwischen Reifen und Straße zu gewährleisten, muss versucht werden bei einer Bremsung diese Schlupfwerte darzustellen. Das Anti-Blockier-System versucht genau das sicherzustellen und auf den entsprechenden Schlupfwert zu „regeln“.

### 3.2 Gummireibungstheorie

Im vorherigen Kapitel wurde die Reibung zunächst über das Coulomb'sche Reibungsgesetz beschrieben. Die Reibungseffekte zwischen Gummi und anderen Reibpartnern ist aber weitaus komplexer und muss über mehrere Effekte der Gummireibungstheorie beschrieben werden.

Die Gummireibung setzt sich aus den Komponenten der Adhäsion, Hysterese, Kohäsion, Verzahnung und der viskosen Reibung zusammen. Diese Komponenten ergeben sich weitestgehend aus der elastischen Verformung des Reifens.

Die im Folgenden beschriebenen Anteile der Gummireibungstheorie stammen im Wesentlichen aus [Köppen, 2015].

### 3.2.1 Adhäsion

Die Adhäsionskomponente erklärt einen Aspekt der Reibungstheorie zwischen Gummi und Fahrbahnoberfläche. Dieser bezieht sich auf den molekularen Bereich der Oberfläche des Gummis, der direkten Kontakt zur Fahrbahnoberfläche hat. Dies hat aber auch Einfluss bis hin zum mikroskopischen Bereich.

Die Kettenmoleküle des Gummis gehen dabei mit den Atomen der Fahrbahnoberfläche Verbindungen ein, die molekulare Bindungskräfte erzeugen. Rollt der Gummi nach eingehender Verbindung weiter, so kommt es zu folgendem Prozess. Die Polymerketten in dem Gummi dehnen sich und halten – trotz der Entfernung des Gummis bei vorherrschender Drehung des Reifens – Kontakt zur Fahrbahn. Anschließend kommt es zum Reißen der molekularen Verbindungen, zur Entspannung und zur Eingliederung der Polymerketten des Gummis in ihre Ausgangslage. Je mehr molekulare Verbindungen vorliegen und je stärker die Bindungskraft der Bindungen ist, desto stärker ist der Adhäsionsanteil der Reibung [Eichhorn, 1994; Bachmann, 1998].

Da diese Komponente im Molekularbereich stattfindet, ist der Effekt der Adhäsion bei sauberer Oberfläche größer, da es so zu einer größeren Kontaktfläche zwischen Reifengummi und Fahrbahn kommt. Daran lässt sich auch verdeutlichen, dass bei niedrigerem Reifenfülldruck die Reibung im Molekularbereich höher ist, da der Gummi eine größere Kontaktfläche mit der Straße erzeugt. Zwischenmedien wie Staub oder auch Wasser verhindern die Bildung dieser Bindungskräfte. Die Adhäsionskomponente hat unter den hier noch folgend genannten Reibungskomponenten den größten Einfluss auf die Reibkraft des Gummis [Bachmann, 1996].

### 3.2.2 Hysterese

Abseits des Molekularbereichs existiert im mikroskopischen Bereich die Hysteresekomponente. Im Gummi kommt es dabei, durch Gleiten des Gummis und auf den Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche, zu Verformungen innerhalb des Gummis. Diese Deformation hat einen Energieverlust zur Folge, der zu Teilen direkt in Wärme umgewandelt wird, zu Teilen aber auch in einer Reibungskraft resultiert [Bachmann, 1998].

Je rauer demzufolge die Fahrbahnoberfläche ist, desto stärker hat die Hysteresekomponente Anteil an der Reibung. Entsprechend der Ausprägung der Rauheit können eventuell vorliegende Zwischenmedien, z.B. Verunreinigungen oder Wasserfilme, keinen großen Einfluss auf diese Komponente der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche haben [Eichhorn, 1994]. Ihr Anteil ist daher gerade bei nassen Straßenverhältnissen entsprechend groß, da die Adhäsionskomponente in diesem Szenario kaum noch vorliegt.

### 3.2.3 Viskose Reibung

Die Viskose Reibung tritt auf, wenn sich ein Zwischenmedium zwischen Reifen und Fahrbahn befindet. Dies können Sandauflagerungen oder aber auch Wasser sein. Es kann zu reiner viskoser Reibung kommen, falls sich der Reifen komplett auf diesem Zwischenmedium befindet. Dieser Effekt tritt unter anderem bei Aquaplaning auf [Eichhorn, 1994]. Die Reibung ist in diesem Fall sehr klein bzw. gar nicht mehr messbar, so fällt es auch schwer das Auto im Falle von Aquaplaning unter Kontrolle zu halten.

### 3.2.4 Kohäsion

Die letzte spezielle Komponente der Reibungstheorie zwischen Gummi und Fahrbahn ist die Kohäsion. Sie beschreibt die Reibungskräfte, die dadurch entstehen, dass es zu Rissen in dem Gummi kommt bzw. Teile ganz herausgerissen werden. Dabei wird nur der Bereich betrachtet der direkten Kontakt zur Fahrbahn hat. Diese Reibungskomponente hat im Vergleich zur Adhäsion und Hysterese eher negativen Einfluss auf den Reibwert [Eichhorn, 1994]. Dieser wird nicht wirklich erhöht, es wird mehr Energie aufgewendet, um den Gummi langfristig zu schädigen. Es tritt Verschleiß auf.

### 3.2.5 Verzahnung

Die Verzahnung ist eine Reibkomponente, die sich hingegen der bisher vier genauer beschriebenen Komponenten auch ohne Erweiterung des Coulomb'schen Reibungsgesetzes erklären lässt. Dabei ist die Verkantung zwischen dem Reifenprofil und der Rauheit der Straße zu verstehen [Continental, 2011]. Dieser Effekt kann mittels spezieller Reifenprofile verstärkt werden, ist jedoch immer auch von der vorhandenen Straßenrauheit abhängig [Kfz, o.J.]. Außerdem fällt der Verzahnungs-Effekt sehr niedrig aus. Verzahnungen treten auch beim Hysterese-Effekt auf [Continental, 2011].

## 3.3 Die Rauheit der Fahrbahn (Oberflächenrauheit)

Die Oberflächenstruktur wird über ihre Rauheit beschrieben. Dabei werden die folgenden Rauheitsarten unterschieden:

- die Mikrorauheit,
- die Makrorauheit,
- die Megarauheit,
- und die Unebenheiten.

Zur Beschreibung der Fahrbahn selbst gibt es noch weitere Kenngrößen, wie beispielsweise das Drainagevermögen, die Deckenstruktur, Spurrinnen oder die Fahrbahnneigung. Die Oberflächenrauheit der Fahrbahn lässt sich mit verschiedenen Verfahren messen und quantifizieren (s. Kapitel 3.6). Im Folgenden folgt jeweils eine kurze Erklärung der einzelnen Rauheiten.

### **3.3.1 Mikrorauheit**

Bei der Mikrorauheit wird auch von „Feinrauheit“ gesprochen. Hierbei werden Rauheitselemente betrachtet, die kleiner als 0,5 mm sind. Entscheidend bei der Größe ist die horizontale Ausdehnung.

### **3.3.2 Makrorauheit**

Da wo die Mikrorauheit aufhört, setzt die Makrorauheit ein. Für den Begriff der Makrorauheit wird oftmals auch der Begriff „Grobrauheit“ verwendet. Auf der Straße werden Rauheitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung von 0,5 mm bis zu 50 mm betrachtet. In dieser Größendimension fängt auch das Drainagevermögen an zu wirken, so kann Wasser zwischen der Körnung ablaufen.

Gerade bei Griffigkeitsmessverfahren mit großen Geschwindigkeiten ist diese Makrorauheit relevant, da deren Einfluss auf die Griffigkeit bei hohen Geschwindigkeiten den Einfluss der Mikrorauheit bei weitem übersteigt. Trotz der stark unterschiedlichen Ausprägung, haben sowohl Mikro- als auch Makrorauheit immer Einfluss auf die Griffigkeit.

### **3.3.3 Megarauheit**

Abseits der Mikro- und der Makrorauheit wird die Megarauheit in vielen Quellen gar nicht mehr als Einflussparameter berücksichtigt. Hierbei wird von Ausdehnungen von 50 mm bis zu 500 mm ausgegangen. Dabei kann es zu Wasseransammlungen auf der Straße kommen. Typisch sind z.B. Bodenwellen oder Schlaglöcher.

### **3.3.4 Unebenheiten**

Ab 500 mm werden die Rauheitselemente als Unebenheit bezeichnet. Damit werden nicht ebene Abschnitte in Längsrichtung bezeichnet. Diese haben einen großen Einfluss auf die Fahrsicherheit, den Fahrkomfort und die Beanspruchung der Straßenbefestigung, sind jedoch sehr schwer zu erfassen.

### 3.4 Literaturstudie zur Reibwertmessung

Der maximale Reibwert  $\mu_{\max}$  und die ihn beeinflussenden Parameter wurden in zahlreichen Studien untersucht. Aus diesen Untersuchungen ergaben sich in der Regel Darstellungen in denen der maximale Reibwert über den jeweiligen Parameter abgetragen wurde. Viele der im Folgenden dargestellten Untersuchungen stammen aus den 80iger und 90iger Jahren und sind daher nur eingeschränkt auf das Verhalten heutiger Reifen zu übertragen. Dennoch stellen sie grundsätzliche Zusammenhänge der Reifenreibung dar. Die Darstellung der Ergebnisse der Literaturstudie beschränkt sich auf die wesentlichen, für das Forschungsprojekt relevanten Ergebnisse.

#### 3.4.1 Einfluss der Geschwindigkeit auf den maximalen Reibwert

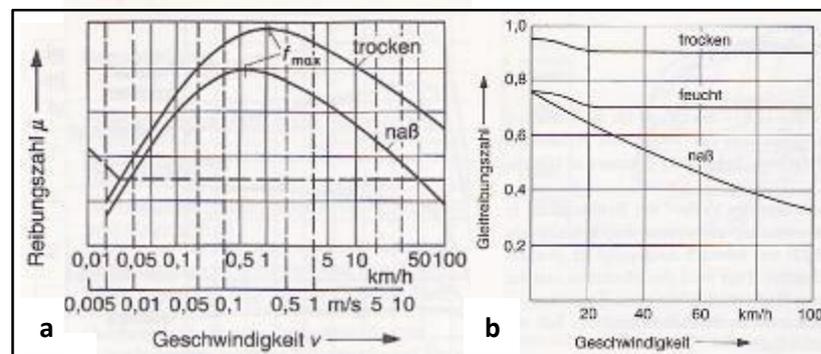


Abbildung 20: Maximaler Reibwert in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit [ReimpellSponagel, 1986]

Mit steigender Geschwindigkeit, erreicht der maximale Reibwert ein Maximum und fällt anschließend wieder ab. Das Maximum in Abbildung 20a wird auf nasser Fahrbahn bereits bei geringeren Geschwindigkeiten erreicht [ReimpellSponagel, 1986].

Mit zunehmender Geschwindigkeit bleibt bei trockener und feuchter Fahrbahn der maximale Reibwert konstant, bei nasser Fahrbahn nimmt der maximale Reibwert ab (Abbildung 20b) [Reimpell Sponagel, 1986].

### 3.4.2 Einfluss der Geschwindigkeit und der Wassertiefe auf den maximalen Reibwert

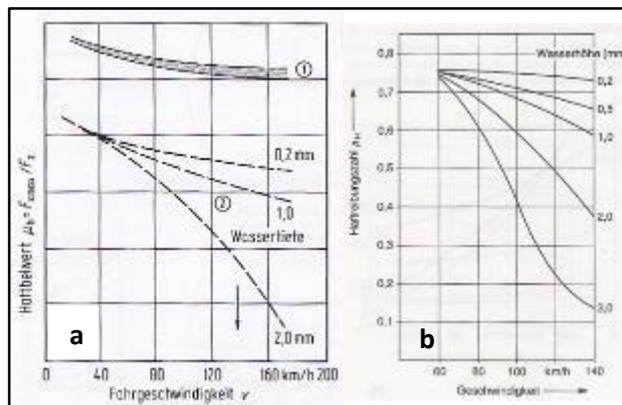


Abbildung 21: Maximaler Reibwert in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und Wassertiefe.

a: [MitschkeWallentowitz, 2004] b: [ReimpellSponagel, 1986]

In Abbildung 21a ist der Einfluss der Wassertiefe und Fahrgeschwindigkeit auf den maximalen Reibwert  $\mu$  zu erkennen. Die Datenreihe mit der Kennzeichnung 1 stellt dabei eine trockene Fahrbahn, die Datenreihen mit der Kennzeichnung 2 stellen nasse Fahrbahnen mit unterschiedlichen Wassertiefen dar. Auf trockener Fahrbahn sinkt der maximale Reibwert mit steigender Geschwindigkeit nicht so stark wie auf nasser Fahrbahn. Je höher die Wassertiefe ist, desto stärker sinkt der maximale Reibwert mit steigender Geschwindigkeit. Kann das gesamte Wasser durch die Reifen nicht mehr abgeleitet werden, so ist eine Kraftübertragung zwischen Reifen und Straßenoberfläche nicht mehr gewährleistet und der maximale Reibwert geht, im Falle einer Wassertiefe von 2mm und einer Geschwindigkeit über 160 km/h gegen null, in diesem Fall wird von Aquaplaning gesprochen [MitschkeWallentowitz, 2004].

Abbildung 21b zeigt ebenfalls den Zusammenhang zwischen sinkendem, maximalem Reibwert und steigender Wassertiefe [ReimpellSponagel, 1986].

### 3.4.3 Einfluss des Schlupfs auf den maximalen Reibwert

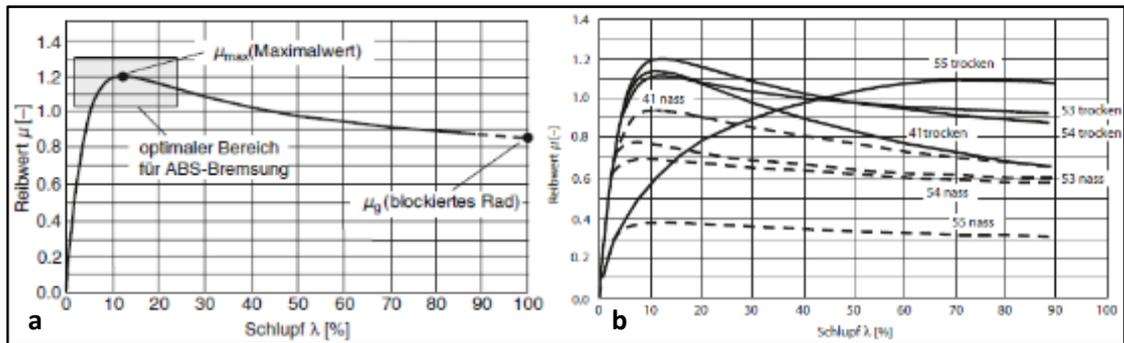


Abbildung 22: Beispiel einer (a) und Beispiele einiger (b) Kraftschluss-Schlupf-Kurven für Fahrbahnen. [BreuerBill, 2003]

Der in Abbildung 22a und Abbildung 22b gezeigte maximale Reibwert ist eine Funktion des Schlupfes zwischen Reifen und Fahrbahn. Der maximale Reibwert ist durch  $\mu_{max}$  gekennzeichnet. Steigt der Schlupf weiter an, so sinkt die Kurve bei 100% Schlupf auf die Gleitreibungszahl (Abbildung 22a) (s. auch Kapitel 3.1).

In Abbildung 22b ist eine zusätzliche Abhängigkeit bezüglich des Fahrbahnzustandes dargestellt [BreuerBill, 2003].

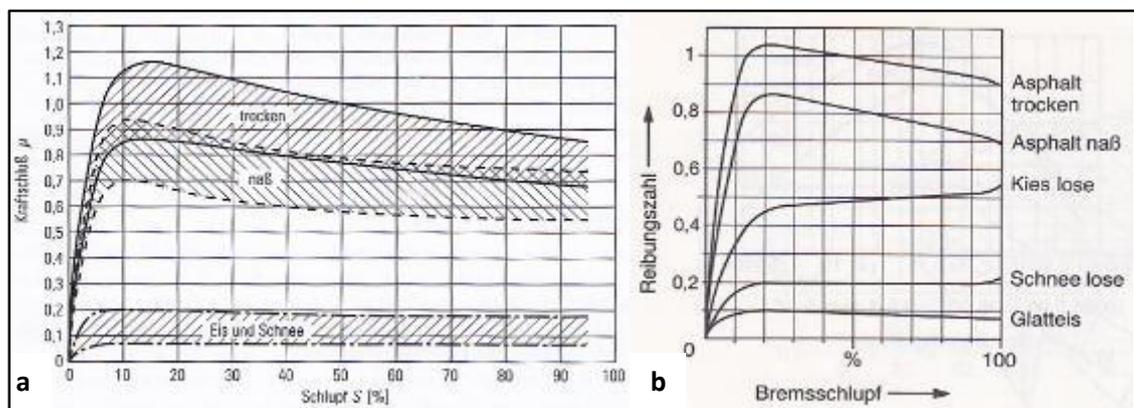


Abbildung 23: a: Bandbreiten für trockene, nasse und Schneebedeckte Fahrbahn. [MitschkeWallentowitz2, 2004], b: Verlauf des maximalen Reibwertes als Funktion des Schlupfes für verschiedene Oberflächen [ReimpellSponagel2, 1986]

Der maximale Reibwert für trockene Fahrbahnen weist die größte Bandbreite mit den höchsten Werten auf, allerdings gibt es Überschneidungen mit der Bandbreite für nasse Fahrbahnzustände. Die

Reibwerte für Eis und Schnee liegen weit unterhalb von jenen für trockene und nasse Fahrbahnzustände (Abbildung 23a).

In Abbildung 23b sind eindeutige Maxima für trockenem und nassem Asphalt, bei geringem Bremschlupf zu erkennen. Die Datenreihen für losen Kies und Schnee erreichen den maximalen Reibwert erst bei 100% Bremschlupf, aufgrund des höheren Schallwiderstands bei einem blockierenden Rad [ReimpellSponagel, 1986].

### 3.4.4 Einfluss der Temperatur auf den maximalen Reibwert

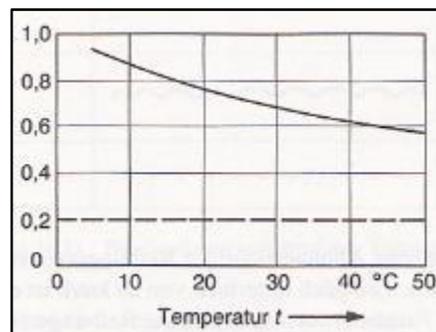


Abbildung 24: Maximaler Reibwert in Abhängigkeit von der Temperatur [ReimpellSponagel, 1986]

Mit steigender Temperatur sinkt der Reibwert (Abbildung 24) [ReimpellSponagel, 1986].

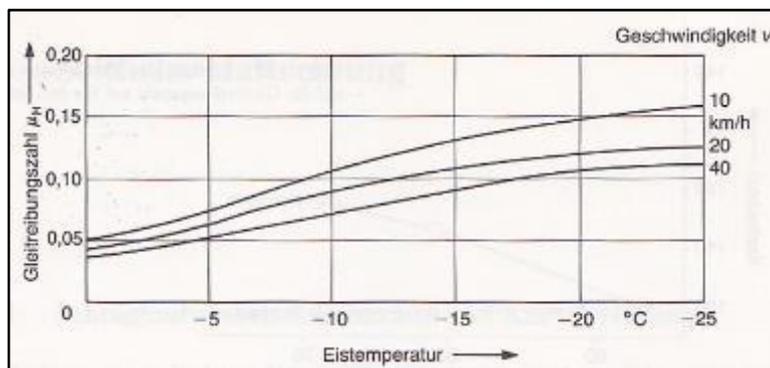


Abbildung 25: Einfluss der Eistemperatur auf die Gleitreibungszahl eines Winterreifens [ReimpellSponagel, 1986]

Auf vereisten Oberflächen ist zu beobachten, dass der Reibwert mit abfallender Temperatur zunimmt. (Abbildung 25) [ReimpellSponagel, 1986]. Das ist dem Effekt geschuldet, dass der Wasserfilm, der sich bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt zwischen Reifen und Eisoberfläche bildet unter kälteren Bedingungen kaum noch entstehen kann.

### 3.4.5 Einfluss der Reifenprofiltiefe auf den maximalen Reibwert

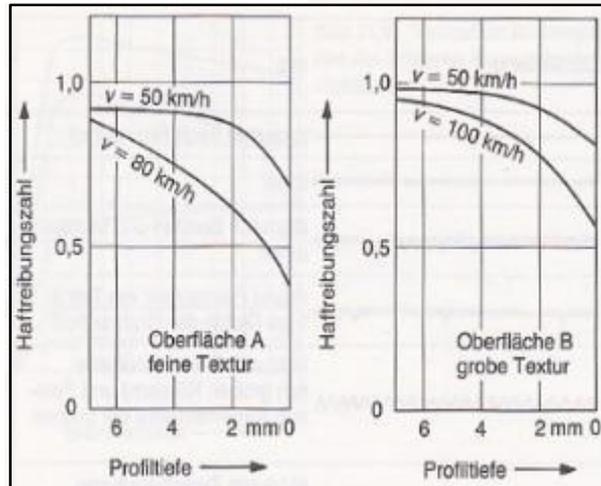


Abbildung 26: maximaler Reibwert in Abhängigkeit von der Profiltiefe. Oberfläche A: Asphaltbeton mit geschlossener Oberfläche, Oberfläche B: neuer Zementbeton [ReimpellSponagel, 1986]

Mit abnehmender Profiltiefe nimmt der maximale Reibwert ab, des Weiteren fällt der maximale Reibwert bei höheren Geschwindigkeiten über der Profiltiefe steiler ab und ist abhängig von der Oberflächentextur (Abbildung 26). [ReimpellSponagel, 1986]

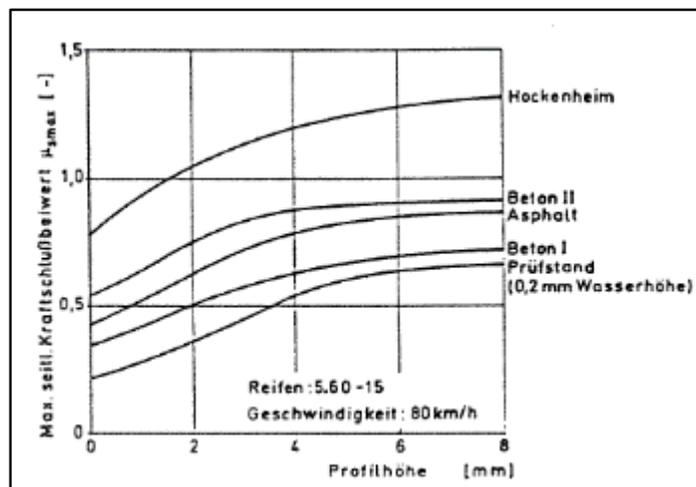


Abbildung 27: Maximaler Reibwert in Abhängigkeit von der Profiltiefe und unterschiedlichen Fahrbahnbelägen [Bachmann, 1996]

Mit steigender Profiltiefe nimmt der maximale Reibwert zu, dieser ist ebenfalls von der Fahrbahnoberfläche abhängig. Die Datenreihe vom Prüfstand, mit 0,2 mm Wasserhöhe hat generell den schlechtesten Reibwertverlauf (Abbildung 27).

Eine detaillierte Literaturrecherche zum Reibwert wurde in [Bachmann, 1996] veröffentlicht.

### 3.5 Literaturstudie zu Methoden der Reibwertpotentialschätzung

Methoden zur Schätzung des Reibwertpotentials auf Fahrbahnen, werden 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 Reibwertpotential 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 sowie deren Vor- und Nachteile diskutiert.

#### 3.5.1 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.

**Beispiel 1:** Der Zustand der Fahrbahnoberfläche wird hierbei ebenfalls in Klassen eingeteilt. Dazu gehören der Typ (Wasser, Schnee, Eis, Öl), die Schichtdicke und die Temperatur.

**Beispiel 2:** Ob eine Fahrbahn einen hohen Reibwert besitzt, hängt vor allem vom Straßentyp und möglichen Schmierstoffen ab. Die Art eines Schmierstoffes (Wasser, Schnee, Eis, Öl), die Höhe bzw. Menge und die vorherrschende Oberflächentemperatur kann hierbei einen enormen/entscheidenden/maßgeblichen Einfluss auf den Reibwert darstellen. Diese Informationen können als Parameter, die den Zustand der Oberfläche beschreiben, zusammengefasst werden.

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 aufwändig über externe Sensoren gemessen und verarbeitet werden. Optisch messende Sensoren, wie in [Breuer, 1992] und [Eichhorn, 1992] beschrieben, können zum Beispiel 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 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 Reibwertpotential zu liefern. Diese Methode führt zu einer Genauigkeit, in der der berechnete und tatsächliche Reibwert ( $\mu_{\max}$ -Werte) 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.

### **3.5.2 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 Mikrophon am Fahrzeug installiert, welches die Abrollgeräusche 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.

### **3.6 Verfahren zur Vermessung der Oberflächengüte**

Zur Ermittlung der Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen kommen in der Praxis unterschiedliche Verfahren zur Anwendung. Im Vergleich unterscheiden sich die einzelnen Messverfahren zum Beispiel anhand der verwendeten Messwerkzeuge. Diese können entweder mobiler (Messanhänger, Messfahrzeug) oder stationärer Art (Pendel, Ausflussmesser nach Moore) sein. Je nach Verfahren wird dann entweder die Mikro- oder die Makrorauheit von Fahrbahnoberflächen gemessen. Bei der Mikrorauheit werden Oberflächenelemente betrachtet, die kleiner als 0,5 mm sind. Elemente die über diesem Wert liegen, werden als Makrorauheit betrachtet. Abbildung 132 in Anhang 10.1 veranschaulicht anhand ausgewählter Beispiele die Vielzahl der weltweit genutzten Messverfahren in einer Übersicht. In Deutschland sind derzeit der Skid Resistance Tester (SRT), das

Seitenkraftmessverfahren (SKM) und der Griptester anerkannt und in technischen Regelwerken beschrieben. Der Stuttgarter Reibungsmesser (SRM) ist ebenfalls im Regelwerk festgehalten, wird jedoch in der Praxis nicht mehr angewandt [GgGm1, 2012]. Für die Aufstellung und Fortschreibung des Technischen Regelwerkes ist die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) verantwortlich. Die FGSV ist ebenfalls Herausgeber des Werkes und leistet in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Institut für Normung (DIN) einen Beitrag zum Entstehen der Europäischen Normen [FgSV, 2014].

### **3.6.1 Skid Resistance Tester**

Der Skid Resistance Tester (SRT) ist eine Methode zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen. Der Aufbau des Messgerätes und das genaue Messverfahren ist in der DIN EN 13036-4 aufgeführt und beschrieben. In den folgenden Abschnitten sind die wesentlichen Informationen und Eigenschaften zum Aufbau und zur Funktionsweise zusammengefasst. Ebenfalls wird auf die wichtigsten Punkte im Ablauf der Methode eingegangen. Zur Qualitätssicherung ist eine jährliche Kalibrierung des Messgeräts durch von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) anerkannte Kalibrierstellen vorzunehmen. Vor Erstbetrieb können dort ebenso Qualifikationslehrgänge absolviert werden [GgGm2, 2012].

#### **Aufbau und Funktionsweise:**

Abbildung 28 veranschaulicht den allgemeinen Aufbau des SRTs.

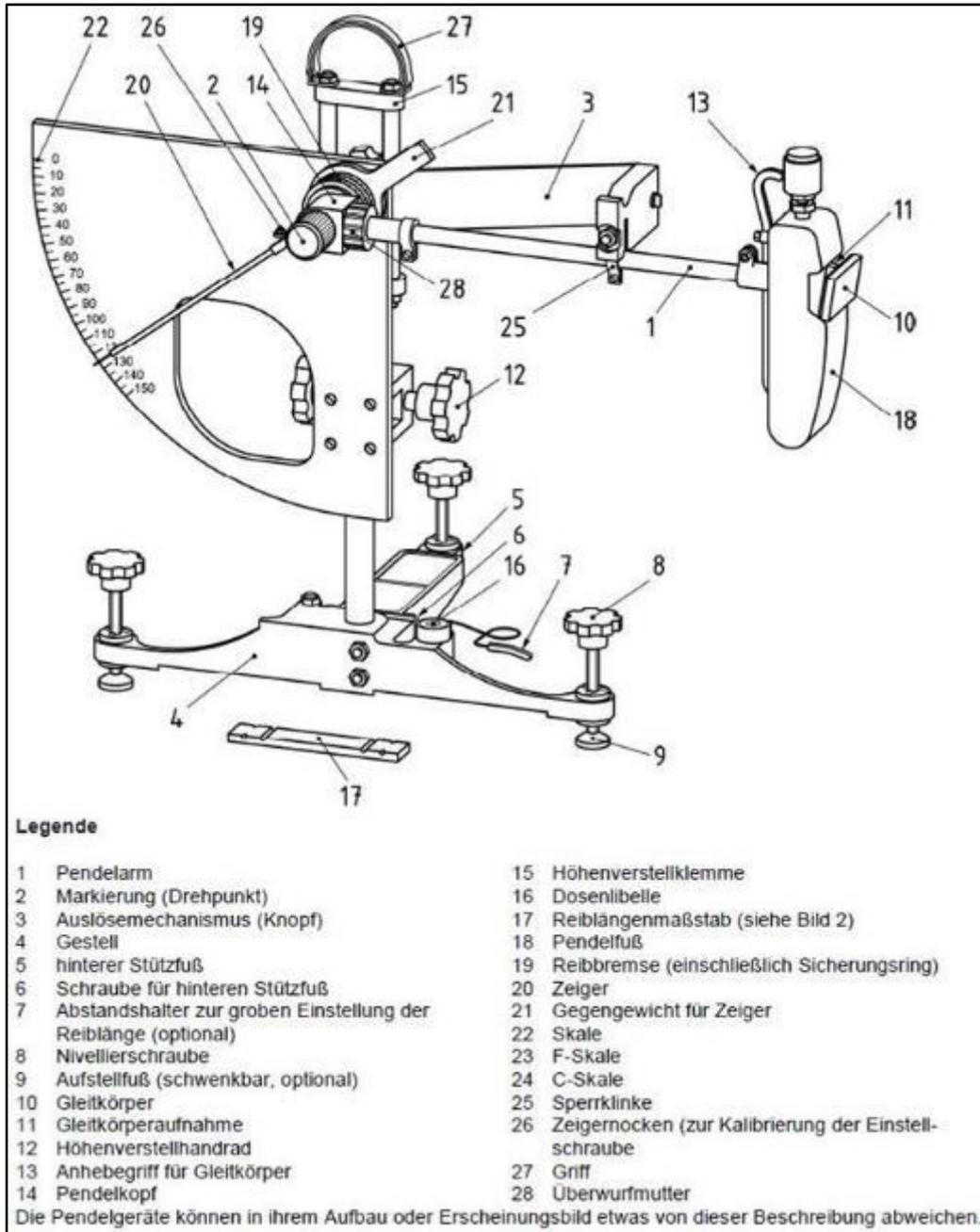


Abbildung 28: Aufbau des SRT (oben) mit angegebener Legende (unten) [DIN, 2011]

Der SRT ist ein stationäres Messgerät. Es dient der punktuellen Messung der Mikrorauheiten in kleinflächigen Bereichen (von rund 125 mm Länge und 127 mm Breite) [DIN, 2011]. Anhand eines durchdefinierten Ablaufs können reproduzierbare Messwerte aufgenommen werden. Mit Hilfe der Messwerte lassen sich unterschiedliche Straßentypen miteinander vergleichen und es ist möglich Aussagen zur Oberflächenqualität zu treffen. Über drei justierbare Aufstellfüße (9) wird das Messgerät mit Hilfe der Dosenlibelle (16) in eine stabile und waagerechte Position gebracht. Ein

korrekter/ordnungsgemäßer Aufbau ist eine Grundvoraussetzung für repräsentative und reproduzierbare Messergebnisse. Auf den Aufstellfüßen ist eine Pendelvorrichtung befestigt. Diese besteht u.a. aus einem Pendelarm (1) und einem Pendelfuß (18). Der Pendelfuß besitzt eine vordefinierte Masse, damit der Pendelfuß in seinen einzelnen Durchläufen immer eine möglichst gleiche Fallgeschwindigkeit aufbaut. An der Unterseite des Pendelfußes ist ein federbelasteter Gleitkörper (10) befestigt. Der Gleitkörper ist ein genormter Reibgummi mit einer Reibkante von circa 1 mm bis 2,5 mm und ist so zu befestigen, dass sich die Reibkante in einem definierten Abstand (von  $514 \pm 6$  mm) zur Drehachse befindet [DIN, 2011]. Über diverse Einstellschrauben, wie zum Beispiel in (12) und (26), können weiterhin Höhenjustierungen und weitere Feineinstellungen vorgenommen werden. Mit Hilfe eines Reiblängenmaßstabes (17) kann sichergestellt werden, dass jede Messung die gleiche feste Reiblänge von 126 mm hat [DIN, 2011]. Hierfür wird der Reiblängenmaßstab zunächst zentriert und senkrecht unterhalb der Drehachse auf die Prüboberfläche gelegt. Das Pendel wird dann über die Höhenjustierung so eingestellt, dass der Gleitkörper jeweils auf die linke und rechte Markierung auf dem Reiblängenmaßstab trifft. Die Abbildung 29 veranschaulicht, an welcher Stelle der Reibgummi abgesetzt wird.

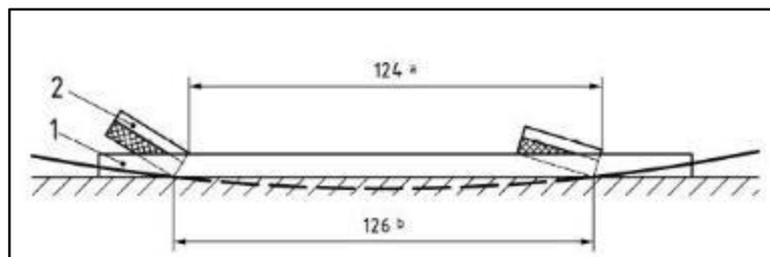


Abbildung 29: Einstellen der Reiblänge nach [DIN, 2011]

Über den Zeiger (20) kann anhand der Skale (22) der aktuelle Wert jeder Messung abgelesen werden. Der Zeiger ist hierbei frei beweglich an der Drehachse des Pendels befestigt und schwingt parallel zum Pendelarm mit. An der Stelle, an der das Pendel seine maximale Höhe erreicht hat, verbleibt der Zeiger. Ein Gegengewicht (21) verhindert, dass der Zeiger weiter schwingt, als das Pendel selbst.

Die einzelnen Schritte zur Durchführung einer Messung sind detailliert in der DIN EN 13036-4 beschrieben und an dieser Stelle kurz zusammengefasst. In der Norm wird zwischen Feld- und Labormessungen unterschieden. Im Rahmen des Projekts wurden allerdings vorrangig Feldmessungen durchgeführt. Daher wird an dieser Stelle nur auf Aspekte einer Feldmessung eingegangen.

#### **Durchführung einer Messung:**

Zu Beginn und am Ende eines Messtages werden Referenzmessungen an einem vorher bestimmten Untergrund durchgeführt. Weichen die beiden Referenzmessungen deutlich voneinander ab, ist dies

ein Indiz/Nachweis/Anzeichen dafür, dass sich das Messgerät während der durchgeführten Messungen verstellt haben könnte. Die aufgenommenen Messwerte sind damit nicht valide.

Im Rahmen des Projektes wurden insgesamt 24 Straßenabschnitte auf ihre Griffigkeit untersucht. Hierbei wurden an jedem Bremspunkt (ausgenommen doppelte Bremspunkte und Bremspunkte auf Autobahnen) Straßenabschnitte von rund 10 – 40 m Länge mit dem SRT vermessen. Die Länge des Messbereiches variierte, in Abhängigkeit des an der Stelle erzielten Bremsweges einer Vollverzögerung. An drei Messpunkten (am Start, in der Mitte und am Ende jedes Bremsweges) wurden dann jeweils fünf Messungen durchgeführt. Damit ergeben sich 15 Messwerte je Bremspunkt.

Das Messgerät wird der DIN EN 13036-4 entsprechend aufgestellt, so dass es waagrecht und stabil auf der zu untersuchenden Fahrbahnoberfläche steht. Das Messgerät sollte so ausgerichtet sein, so dass sein Pendel in der Fahrspur und in Fahrtrichtung schwingen kann. Das Pendel sollte beim Schwingen ohne Bodenkontakt genau die Nullposition auf der Messskala erreichen, andernfalls sind einige Feineinstellungen vorzunehmen [Köppen, 2015]. Ebenso wird über eine Höhenjustierung die vorgegebene Messlänge (126 mm nach DIN EN 13036-4) eingestellt [DIN, 2011]. Der Pendelarm wird zu Beginn eines Schwingvorganges mit Hilfe des Anhebegriiffs (13) in eine Haltevorrichtung eingerastet. Dort hängt er in einer horizontalen Lage parallel zur Prüffläche. Mit einem Handfeger wird die Prüffläche dann von losen Partikeln befreit und für jeden Durchgang mit einem Wasserfilm versehen. Über einen Auslösemechanismus wird der Pendelarm aus seiner Halterung gelöst und schwingt über die Messoberfläche. Der Gleitkörper trifft mit einer Geschwindigkeit von rund 10 km/h auf die Prüffläche und streicht den Reibgummi über die Oberfläche. Der erste Pendelvorgang wird hierbei nicht gemessen und dient der Adjustierung des Gleitkörpers an die Straßenneigung [Köppen, 2015]. Der durch die Reibung auftretende Energieverlust, verringert die Geschwindigkeit und damit die maximal mögliche Steighöhe des Pendels. Erreicht der Pendelarm seinen höchsten Punkt, kann über einen Zeiger auf der fest integrierten Skale, ein Pendelwert abgelesen werden. Der Pendelwert/SRT-Wert ist ein genormter Wert für die Griffigkeit der Prüfoberfläche [DIN, 2011]. Beim Zurückschwingen des Pendels sollte der Pendelarm manuell aufgehalten werden damit der Gleitkörper nicht falsch herum auf die Messoberfläche trifft [Köppen, 2015]. Mit Hilfe einer integrierten Hebevorrichtung kann der Gleitkörper ohne Berührung der Prüffläche zurück in die Ausgangsposition gebracht werden. Die fünf aufgenommenen Messwerte an einem Messpunkt werden zu einem Mittelwert (als Norm PTV bezeichnet) zusammengefasst [DIN, 2011]. An jedem Messpunkt wird vorher und nachher noch die Temperatur von Prüffläche und Reibgummi aufgenommen. Diese Werte fließen dann in der Berechnung des temperaturkorrigierten Mittelwerts (in der Norm als  $PTV_{\text{corr}}$  bezeichnet) ein [DIN, 2011]. Die Temperaturkorrektur ergibt sich aus der mittleren Temperatur des Gleitkörpers aus den beiden Messungen. Das Ergebnis ist ein dimensionsloser SRT-Wert, der sich mit anderen SRT-Messungen vergleichen und mit anderen Verfahren korrelieren lässt. Für weitergehende Informationen sei an dieser Stelle auf die DIN in [DIN, 2011] hingewiesen. In der Praxis wird die SRT-Methode oft mit dem „Ausflussmesser nach Moore“

kombiniert, um mit der zusätzlichen Methode die Makrorauheit der Prüfoberfläche zu ermitteln [GgGm2, 2012].

### 3.6.2 Seitenkraftmessverfahren (SKM)

Ein weiteres Verfahren ist das Seitenkraftmessverfahren (SKM-Verfahren, engl. Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine, kurz SCRIM), mit dem sich sowohl die Mikro- als auch die Makrorauheit von Fahrbahnoberflächen messen lässt [Köppen, 2015]. Ein schnellfahrendes Messfahrzeug zeichnet, während der Fahrt über ein schräg gestelltes Messrad (rund 20 °), kontinuierlich Messwerte auf (s. Abbildung 30).



Abbildung 30: SKM Griffigkeitsmessfahrzeug [TÜV, 2016]

Das Messrad ist ein profilloser schmaler Messreifen und rollt bei einer definierten Radlast von 1,96 kN unter Seitenschlupf ab [GgGm3, 2012]. Hierbei entstehen Schlupfwerte von rund 34 % [Köppen, 2015]. Bei Geschwindigkeiten von 40, 60 und 80 km/h (für Stadt, Land und Autobahn) wird die Fahrbahn mit einem Wasserfilm von rund 0,5 mm benetzt und der Seitenkraftbeiwert  $\mu_y$  ermittelt. Der Seitenkraftbeiwert dient zur Bewertung der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche und ergibt sich aus dem Quotienten der gemessenen Seitenführungskraft und der Normalkraft [Brückert, 2012]. Da die Normalkraft von 1,96 kN konstant gehalten wird, hängt der berechnete Seitenkraftbeiwert von der gemessenen Seitenkraft ab. Die wiederum wird während der Fahrt im Wesentlichen durch die Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche, des Messreifens und dem vorhandenem Zwischenmedium (Trockenheit, Nässe, Schnee) beeinflusst. Des Weiteren spielen die vorliegenden Temperaturbedingungen von Reifen, Fahrbahn, Luft und Annässungswasser eine große Rolle [Brückert, 2012]. Die erreichte Auflösung bei den Messungen beträgt rund 1 m [GgGm3, 2012]. Damit die gemessenen Werte aussagekräftig und reproduzierbar sind, müssen, wie auch bei allen anderen Verfahren, spezielle Randbedingungen bei der Durchführung eingehalten werden. Für das SKM-Verfahren sind diese u.a. in der Technischen Prüfvorschrift TP Griff-STB (SKM) festgehalten [Brückert, 2012].

Im Rahmen des Projekts lagen für die Versuchsstrecke vereinzelt SKM-Messwerte (einige Landstraßen in Brandenburg) vor, die mit den durchgeführten SRT-Messungen verglichen und korreliert werden konnten. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.5.2 nachzulesen. Eine vollständige Vermessung der in diesem Projekt genutzten Teststrecke mittels SKM ist für den zweiten Projektteil geplant.

### 3.6.3 Skiddometer

Ein weiteres Verfahren zur Vermessung der Straßenoberfläche stellt der Skiddometer dar. Der Skiddometer ist ein Dreiradanhänger mit einem Messrad, der zur dynamischen Zustandserfassung der Griffigkeit für Straßen und Flugpisten verwendet wird (s. Abbildung 31).



Abbildung 31: Skiddometer BV11 [JSC, 2016]

Der Anhänger wird an ein Zugfahrzeug gespannt und hinterhergezogen. Das Messrad wird bei einer vordefinierten Radlast von 1,1 kN entweder komplett blockiert oder rollt unter rund 17 % Schlupf ab [Lindenmann, 2010]. Bei diesem Vorgang wird die Fahrbahn ebenfalls mit einem Wasserfilm benetzt. Bei den Messungen ist zu berücksichtigen, dass der mitgeführte Tank von rund 1000 Liter nur für rund 7 km ausreicht [Lindenmann, 2010]. Die bei der Fahrt entstehende Reibkraft wird durch die Messung eines Drehmomentes am Messrad mittels Dehnmessstreifen ermittelt. Der Reibungskoeffizienten ergibt sich hierbei ebenfalls durch den Quotienten aus Reib- und Normalkraft.

## 4 Methodik zur Reibwertpotentialmessung

Für die Entwicklung eines Verfahrens zur Schätzung des maximalen Reibwerts ist es zunächst notwendig, ein möglichst umfassendes Wissen über den Reibwert und seine Einflussgrößen zu haben. Dieses Wissen kann einerseits auf Basis einer Literaturstudie gewonnen werden (s. Kapitel 3.4), andererseits hat sich aber schnell gezeigt, dass aktuelle Messwerte notwendig sind, mit deren Hilfe ein entsprechendes Verfahren entwickelt wird. Da der Reibwert nicht direkt gemessen werden kann, muss er aus einer anderen Größe hergeleitet werden. Dafür erweist sich die maximale Fahrzeugbeschleunigung als hilfreich. Das bedeutet, dass mit dem Fahrzeug eine Vollbremsung derart durchgeführt werden muss, dass das gesamte Haftpotential ausgenutzt wird und das Fahrzeug mittels der ABS-Regelung in den Bereich der des maximalen Reibwertwerts hineingeregelt wird. Eine genaue Beschreibung dieses Verfahrens findet sich in Kapitel 4.2.

Zunächst musste eine Teststrecke festgelegt werden, auf der wiederum die Bremspunkte definiert werden. An diesen Bremspunkten wurden dann die Vollbremsungen, also die Verzögerungsmessungen wiederholt durchgeführt, sodass sich bei identischen Randbedingungen vergleichbare Werte einstellen. Die Teststrecke wird in Kapitel 4.1 beschrieben.

Zur Durchführung der Messfahrten wurde ein Testfahrzeug benötigt, welches mit geeigneter Messtechnik ausgestattet war um die Fahrzeuglängsverzögerung zu messen. Weiterhin wurde Messtechnik benötigt, die relevante Parameter erfasst, die den Reibwert direkt oder indirekt beeinflussen. Eine Beschreibung des Messfahrzeugs und der genutzten Messtechnik befindet sich im Kapitel 4.3.

### 4.1 Definition der Teststrecke

Zur Durchführung der Messungen des Reibwertpotentials wurden auf der Messstrecke 32 Bremspunkte festgelegt. Diese liegen innerorts, außerorts und auf der Autobahn, es wird auf den Oberflächen Asphalt, Beton und Kopfsteinpflaster gebremst und es wurde auf die Nähe zu Wetterstationen (WS) und Glättemeldeanlagen (GMA), sowie auf bauliche Besonderheiten, wie Brücken und auf die Durchführbarkeit von Bremstests im täglichen Verkehrsgeschehen geachtet. Für die Versuchsfahrten wurde eine Strecke im Südwesten Berlins festgelegt, die durch Berlin und Brandenburg und über die Bundesautobahnen A115 und A10 verläuft. Durch die gewählte Streckenführung ist eine unmittelbare Nähe zur GMA Fahlhorst gegeben, außerdem sind die berücksichtigten Wetterstationen nicht weiter als 10 km entfernt (Abbildung 32).

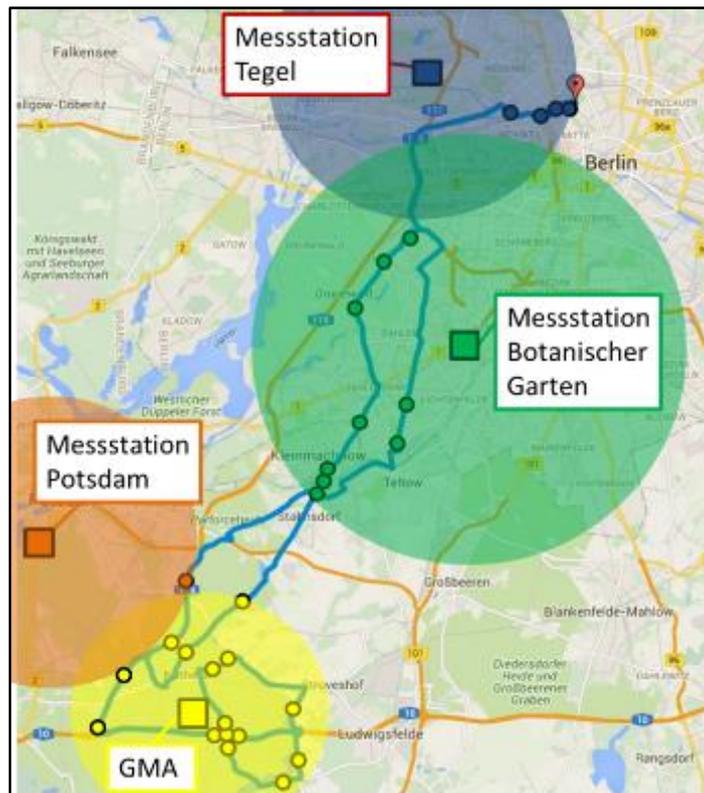


Abbildung 32: Verlauf der Messstrecke mit Bremspunkten, Wetterstationen (WS) und Glättmeldeanlage (GMA)

Zu allen Bremspunkten wurden detaillierte Daten erhoben. Dazu zählte die Vermessung mit dem Skid-Tester, sowie die Erfassung der Oberfläche, die Lage zur nächsten WS und zur nächsten GMA und die Ortskoordinaten des Bremspunkts. Spezifische Besonderheiten an einzelnen Bremspunkten wurden zusätzlich erfasst. Eine Darstellung der Informationen zu einem Bremspunkt ist in Abbildung 33 zu sehen.

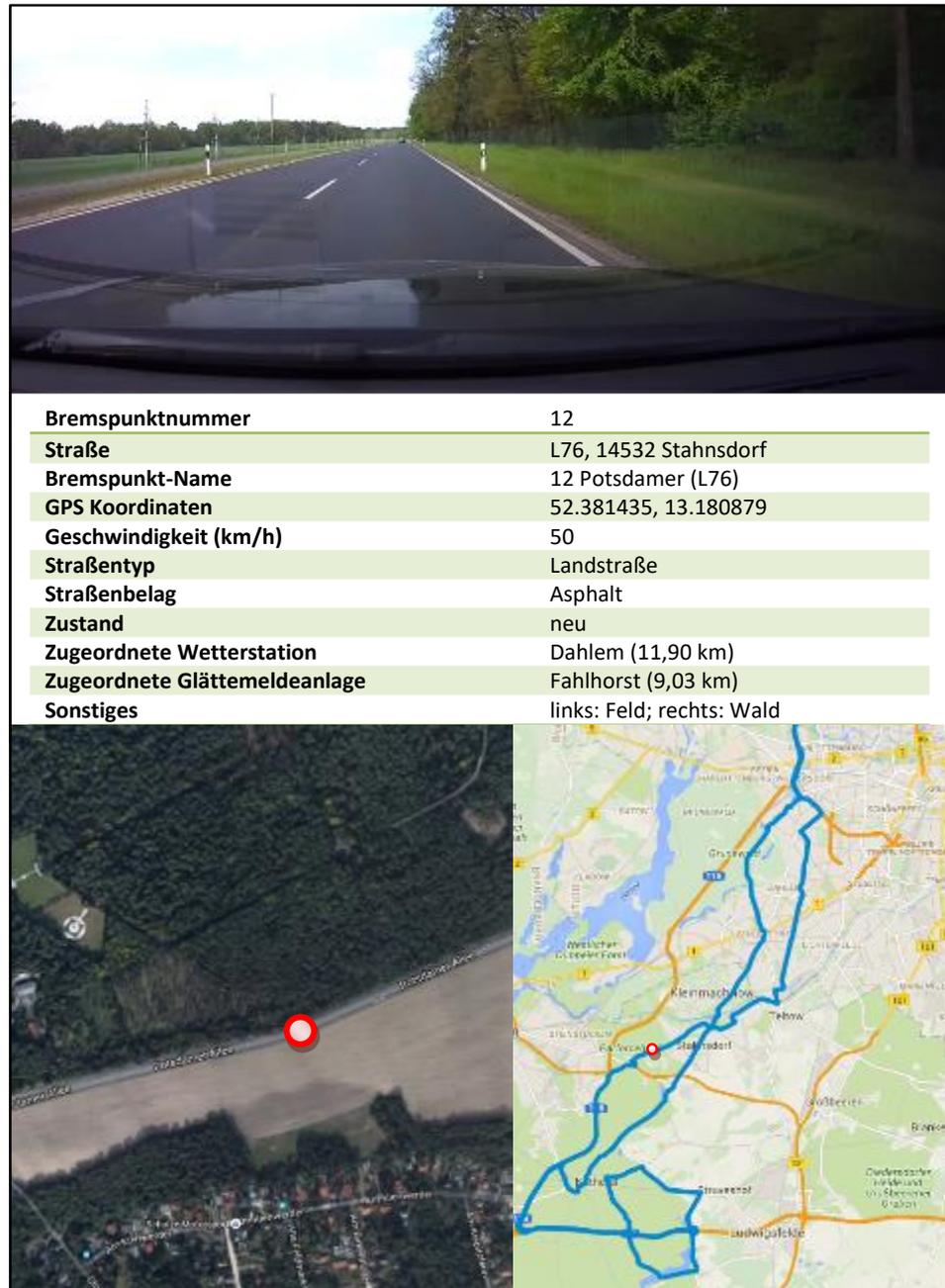


Abbildung 33: Informationen zu Bremspunkt 12

Eine vollständige Darstellung aller Bremspunkte befindet sich in Kapitel 10.2.

Bei allen Bremspunkten wurde darauf geachtet, dass die Straße an dieser Stelle waagrecht verläuft, so dass Einflüsse auf die Fahrzeugverzögerung, die sich aus dem Gefälle der Straße ergeben würden, ausgeschlossen wurden.

## 4.2 Messung des maximalen Reibwerts

An den Bremspunkten wurde im Verlauf einer Messfahrt jeweils einmal gebremst. Bei Ausgangsgeschwindigkeiten zwischen 30 und 120 km/h wurde dabei das Bremspedal derart betätigt, dass sich im Hauptbremszylinder ein Mindestdruck von 175 bar aufbaute und die Bremsanlage verlässlich in den Regelbereich des ABS kam. Damit wurde sichergestellt, dass das Fahrzeug die maximal mögliche Verzögerung erreicht. Diese Fahrzeugverzögerung wurde über einen Servo-Beschleunigungsaufnehmer über einen Zeitraum von 0,5 Sekunden gemessen und anschließend gemittelt (Abbildung 34). Aus diesem Wert wurde mit

$$\overline{\mu_{max}} = \left| \frac{\overline{a}}{g} \right| \quad (\text{Gl. 3})$$

der maximale Reibwert berechnet.

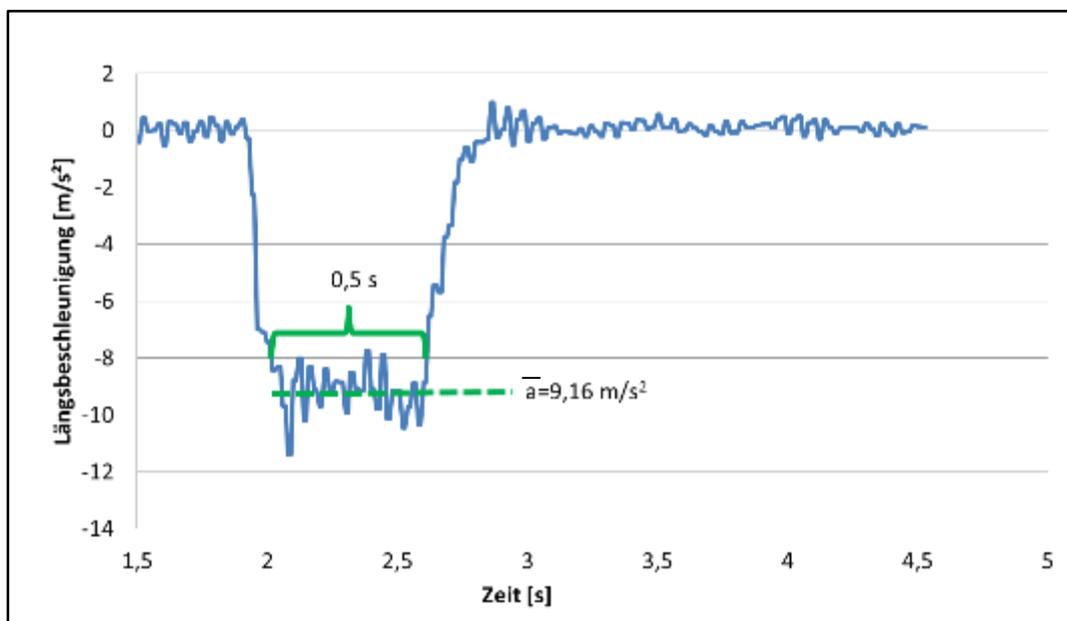


Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der Fahrzeugverzögerung bei einer Vollbremsung

Da die Messfahrten in einem Zeitraum von 10 Monaten durchgeführt wurden, konnte ein breites Spektrum verschiedener Wetterverhältnisse erfasst werden. Dazu zählen verschiedene Regenintensitäten und daraus resultierend verschiedene Wasserhöhen, Messungen bei geschlossener Schneedecke oder Schneematsch sowie verschiedene Oberflächentemperaturen unter trockenen Bedingungen. Über den gesamten Messzeitraum wurde regelmäßig zwischen Sommer- und Winterreifen gewechselt, sodass für beide Reifentypen Ergebnisse zu den genannten Wetterbedingungen vorliegen. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung lagen 2.080 Datensätze vor.

## 4.3 Die Messtechnik

Zur Erfassung aller relevanter Fahrzeug- und Umgebungsdaten, wurden verschiedene Messsensoren und Datenquellen verwendet. Die fahrzeugseitigen Daten wurden im Wesentlichen über den Datenbus erhoben. Die Fahrzeugverzögerung selbst wurde über einen zusätzlich installierten 3-axialen Beschleunigungsaufnehmer erfasst. Weiterhin wurden Wetterdaten, wie die Oberflächentemperatur, Lufttemperatur und Luftdruck über ein System zur Wettererfassung gemessen. Weitere Wetterdaten wurden mit Hilfe von Wetterstationen und Glättemeldeanlagen erfasst. Im Folgenden werden das Messfahrzeug und die genutzte Messsensorik vorgestellt.

### 4.3.1 Messfahrzeug

Das Fahrzeug, mit dem die Messfahrten durchgeführt wurden, war ein heckangetriebener BMW 330i. Die Abbildung 35 zeigt das Fahrzeug auf einer Testfahrt auf einem Prüfgelände. Das Fahrzeug wiegt rund 1,8 Tonnen und hat u.a. serienmäßig die elektronischen Fahrstabilitätssysteme DSC, ABS und den Bremsassistent DBC integriert. Die Bremsanlage besteht aus Einkolben-Faustsattel-Scheibenbremsen mit einem Durchmesser vorne 348x30 mm und hinten 336x22 mm.



Abbildung 35: Das Messfahrzeug BMW 330i auf dem Prüfgelände

Im Rahmen des Projektes standen zwei unterschiedliche Reifentypen zur Verfügung. Das waren zum einen zwei neue Sätze Sommerreifen der Marke Bridgestone und zum anderen zwei neue M+S Reifen der Marke Dunlop. Hierbei handelte es sich jeweils um das gleiche Modell „Potenza“ (Bridgestone) und „SP Winter Sport 3D“ (Dunlop) mit demselben Herstellungsdatum. Der Reifenfülldruck wurde vor und nach jeder Messfahrt kontrolliert und auf 2,0 bar an der Vorderachse und auf 2,4 bar an der

Hinterachse eingestellt. Nach der Messfahrt wurde der Fülldruck erneut überprüft. In Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur betrug er jeweils zwischen 2,0 bis 2,6 bar auf der Vorderachse und 2,2 bis 2,8 bar auf der Hinterachse (s. Abbildung 36). Außerdem wurden in regelmäßigen Abständen die Profiltiefen notiert, um auch hier mögliche Einflüsse auf den maximalen Reibwert identifizieren zu können.

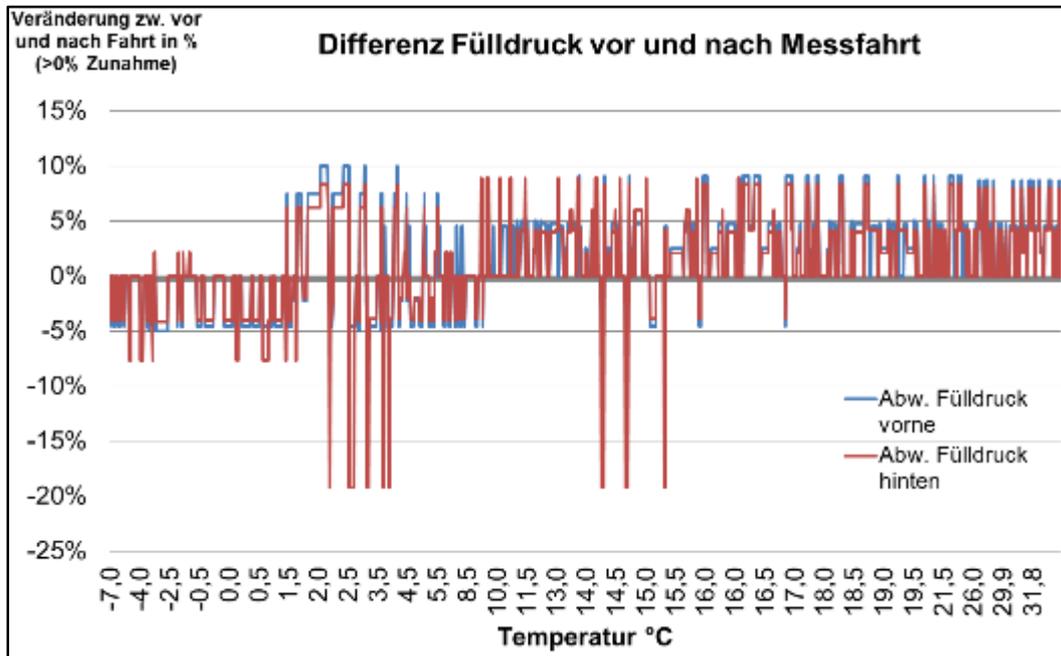


Abbildung 36: Differenz des Fülldrucks vor und nach der Messfahrt in Abhängigkeit von der Temperatur

#### 4.3.2 CAN-Bus (Controller Area Network)

Der Begriff CAN (Controller Area Network) beschreibt ein serielles Bussystem. In Fahrzeugen verbindet bzw. vernetzt der CAN-Bus einzelne Steuergeräte, Assistenz- und Anzeigesysteme miteinander und ermöglicht dadurch die Kommunikation unter den einzelnen Systemen miteinander. Hierbei können zum Beispiel wichtige dynamische Messgrößen, wie Fahrgeschwindigkeit, Längs- und Querschleunigung bei hohen Übertragungsraten (von bis zu 1 Mbit/s auf 40 m Kabellänge) ausgetauscht und dem Fahrer übermittelt werden. Die Übermittlung geschieht anhand sogenannter Telegramme, welche die zu übermittelnde Information in einer binär codierten Nachrichtform verschlüsselt übermitteln. Die Nachrichten werden vom Absender priorisiert, so dass zeitkritische Informationen den gewünschten Empfänger als erstes zugestellt werden können. Den detaillierten Aufbau der Nachrichten und weitere wichtige Eigenschaften von CAN-Bussystemen sind in den ISO-Standards (ISO-11898-1 und folgend) festgehalten. Über eine Schnittstelle am Fahrzeug können die übermittelten Nachrichten abgegriffen und mitgelesen werden. Hierbei wird eine Kabelverbindung zwischen Fahrzeug und einer Hardware (dSpace Autobox) hergestellt. Die Nachrichten können dann

mit einer entsprechenden Software („Control Desk“ des Unternehmens dSpace GmbH) mittels einer sogenannten „data base CAN“ - Datei (kurz DBC-Datei) identifiziert und umgerechnet werden. Die DBC-Datei enthält hierfür alle wesentlichen Eigenschaften, Kennzeichnungen und mögliche Umrechnungsfaktoren der einzelnen Nachrichten. Im „Control Desk“ können gewünschte Informationen ausgegeben und weiterverarbeitet werden. Im Rahmen des Projektes waren im Wesentlichen die Informationen vom Regensensor, dem Scheibenwischer, der Außentemperatursensor, der Bremsdruck, die reale Fahrzeuggeschwindigkeit und die angezeigte Geschwindigkeit am Tacho von Relevanz. Alle weiteren aufgenommenen Information vom CAN-Bus sind im Anhang nachzulesen (vgl. Abbildung 166).

### 4.3.3 Fahrzeugbeschleunigungsmessung mittels ADMA-G

Der „Automotive Dynamic Motion Analyzer“ (kurz ADMA-G) des Unternehmens GeneSys GmbH ist ein hochgenaues Faserkreisel-System. Dieses Messsystem wurde speziell für hochpräzise Fahrdynamikmessungen im Automobilbereich entwickelt. Der ADMA-G kommt hierbei ohne bewegte Teile aus und ist daher robust und unempfindlich gegen Erschütterungen. Drei faseroptische Drehratensensoren erfassen alle Drehbewegungen des Fahrzeuges. Die drei Servo-Beschleunigungsmesser dienen zur Erfassung der Längs-, Quer- und Vertikalbeschleunigung. Hierbei erreicht der ADMA-G Genauigkeiten von 1 mg [GeneSys, 2015]. Die ermittelten Beschleunigungsdaten können als CAN-Nachricht in höheren Ausgaberraten (bis zu 400 Hz) übermittelt werden, als vergleichsweise im Fahrzeug eigenem CAN-Bus-System [GeneSys, 2015]. Dies ist möglich, da im Vergleich zum CAN-Bus im Fahrzeug beim ADMA-G nur ein Bruchteil von Nachrichten übertragen werden müssen. Ein integriertes GPS-System liefert zusätzlich hochgenaue Positionsdaten. Hierfür wird ein GPS-Empfänger mit einer Magnethalterung auf dem Fahrzeugdach befestigt und mit dem ADMA-G verbunden. Im Messfahrzeug wurde der ADMA-G an eine eigenentwickelte Metallkonstruktion fest mit dem Fahrzeug verbunden. Die Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen das eingebaute System im und am Messfahrzeug.



Abbildung 37: Produktfoto [GeneSys, 2015] und der eingebaute ADMA-G im Messfahrzeug



Abbildung 38: Der GPS-Empfänger auf dem Dach des Messfahrzeuges

Der ADMA-G wurde in diesem Projekt ebenfalls mit der dSpace Autobox verbunden. Die ermittelten Beschleunigungsdaten in Längsrichtung und die GPS-Daten wurden hierbei genutzt und weiterverarbeitet.

#### **4.3.4 Vaisala DSP 211**

Das finnische Unternehmen Vaisala bietet mit dem mobilen Messsystem „Vaisala DSP 211“ die Möglichkeit Frosttemperaturen auf Fahrbahnen zu erkennen und bestimmte Wetterparameter lokal am Fahrzeug zu beobachten. Das mobile Messsystem wird hierbei außen am Fahrzeug befestigt und besteht insgesamt aus 2 Modulen und einer Displayeinheit. Ein Wettersensor erfasst die unmittelbare Außentemperatur und Luftfeuchtigkeit am Fahrzeug und gibt zudem den Taupunkt aus. Dieser Sensor kann zum Beispiel zwischen Kotflügel und Motorhaube des Fahrzeuges befestigt werden. Ein Infrarotsensor ermittelt die Oberflächentemperatur der Fahrbahn. Dieser wird seitlich am Fahrzeug in rund 90 cm Höhe befestigt. Die Abbildung 39 zeigt hierbei die einzelnen Messeinheiten und Abbildung 40 eine Anbauvariante der beiden Messeinheiten an das Messfahrzeug. Das optische Messgerät absorbiert hierbei alle Infrarot-Emissionen von der Straßenoberfläche und konvertiert diese in ein elektrisches Signal. Dieses Signal wird dann mit Daten aus dem internen Temperatursensor verarbeitet und skaliert. Für einen ordnungsgemäßen Gebrauch sollte der Sensor senkrecht zur Fahrbahnoberfläche befestigt werden. Die Daten aus beiden Sensoreinheiten laufen über Kabelverbindungen in ein duales LED-Display, welches die Messwerte ausgibt und mit einer Warnleuchte vor drohender Eisgefahr warnt. Es gibt weiterhin die Möglichkeit die Daten via serieller Datenschnittstelle auszugeben. In dem Projekt liefern die Parameter Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Taupunkt und Oberflächentemperatur einen wichtigen Input.



Abbildung 39: Messeinheiten der „Vaisala DSP 211“ – Messtechnik [Vaisala, 2010]



Abbildung 40: Anbauvariante der „Vaisala DSP 211“ Messeinheiten

#### 4.3.5 dSpace Autobox

Die Autobox der Firma dSpace ist im Allgemeinen eine leistungsstarke mobile Rechner-Hardware mit umfangreichem Software-Paket. Mit diesem System können aufwendige Messfahrten, Regelexperimente und Reglerentwicklungen in Echtzeit durchgeführt und im Fahrzeug erprobt werden. Die „ds1007“ Prozessorkarte bietet hierfür eine hohe Rechenleistung und verschiedene Schnittstellen (CAN, Seriell, Ethernet), um externe Messdaten einfließen zu lassen. Die Messdaten können daraufhin direkt in der Autobox echtzeitfähig verarbeitet werden. Über eine Ethernet-Verbindung wird die Autobox mit einem Notebook verbunden. Auf dem Notebook sollte hierfür die notwendige Software installiert werden. Im Programm „Control Desk“ können alle einfließenden und berechneten Messdaten ausgegeben werden. Alle Einstellungen, Berechnungen und Automatisierungen sind im „Control Desk“ selbst oder über die Software-Verknüpfung zu MATLAB/SIMULINK der Firma MathWorks® programmierbar. Unterstützte Programmiersprachen

sind neben dem umfangreichen SIMULINK Blockset der Matlab-, C- (bzw. C++) und Python-Code. Die Autobox ist im Messfahrzeug die zentrale Recheneinheit. In dieser laufen die Messdaten aus den unterschiedlichen Sensoren zusammen, werden dort verarbeitet und die Software am Laptop ausgegeben. Abbildung 41 veranschaulicht den Einbau der Autobox in den Kofferraum des Messfahrzeuges.



Abbildung 41: Die Autobox von dSpace im Messfahrzeug

#### 4.3.6 Dashcam – Blackvue DR650GW – 2CH

Ein Ziel des Projektes ist es das Zwischenmedium auf der Straßenoberfläche aus verschiedenen Wetterparametern möglichst genau zu bestimmen. Um die Ergebnisse aus dem Schätzalgorithmus mit denen in der Vergangenheit vorgeherrschten Bedingungen vergleichen zu können, wurde eine Kamera im Messfahrzeug installiert. Die Blackvue DR650GW-2CH gehört zu den sogenannten „Dashcams“ und besteht aus einer Front- und einer Heckkamera (Abbildung 42). Die FullHD-Frontkamera (1080p) wurde im Innenraum hinter dem Rückspiegel befestigt. Mit der Frontkamera werden vor allem die einzelnen Vollbremsungen einer Messfahrt aufgezeichnet. Dadurch können nicht nur Informationen zum aktuellen Wettergeschehen, sondern ebenfalls zu anderen Ereignissen aufgezeichnet werden. Ein Beispiel war, dass die Straße aufgrund von Bauarbeiten durch Split bedeckt war. Mit Hilfe der Kamera war es möglich, diesen Störeffekt einer Bremsung im Videobild zu sehen und zu hören. Durch einen eingebauten Beschleunigungssensor löst die Aufnahme immer dann automatisch aus, wenn ein regelbarer Schwellwert überschritten wird.



Abbildung 42: Die Dashcam „Blackvue DR650GW – 2CH“ [Blackvue, 2015]

#### 4.4 Erfassung von Wetterdaten

Als wesentliche Einflussgröße für den maximalen Reibwert gilt die Zwischenschicht, also der unmittelbare Zustand der Straßenoberfläche. Diese kann beispielsweise „trocken“; „nass“ oder „vereist“ sein. Der Zustand der Zwischenschicht ist im Wesentlichen vom Wetter abhängig, woraus sich die Notwendigkeit ergibt, dieses möglichst genau zu kennen. Im Sinne der Zielsetzung dieses Forschungsprojekts soll dafür keine zusätzliche Messtechnik am Fahrzeug verbaut werden, sondern es soll auf bereits verfügbare Informationen zurückgegriffen werden. Als Informationsquelle für Wetterdaten gibt es dafür ein gut ausgebautes und sehr dichtes Netz aus Wetterstationen. Diese liefern in dichter Folge aktuelle Wetterdaten von ihrem Standort. Eine spezielle Form der Wetterstationen stellen Glättemeldeanlagen (GMA) dar. Diese erfassen ebenfalls alle relevanten Wetterdaten, darüber hinaus stellen sie Daten zum aktuellen Zustand der Zwischenschicht auf der Straße zur Verfügung, an der sie installiert sind. Dies ist in der Regel an Autobahnen der Fall. Im Folgenden sind diese beiden Typen von Wetterstationen beschrieben.

##### Wetterstationen

Wetterstationen (WS) sind ein wichtiger Bestandteil für die Erstellung von Wettervorhersagen und um langfristige und kurzfristige Prognosen beispielsweise für Wetterwarnungen erstellen zu können. Die Erfassung meteorologischer Parameter dient der Überwachung und Bewertung der Umwelt, sowie Forschungszwecken (vgl. Abbildung 43).

Der größte Wetterdienstleister in Deutschland ist der staatliche Deutsche Wetterdienst (DWD). Der DWD betreibt 183 hauptamtliche Wetterstationen, sowie 1.795 nebenamtliche Wetter- und Niederschlagsstationen [DWD1, 2016]. Diese unterliegen den internationalen Standards und nutzen festgelegte Standorte und Messinstrumente.



Abbildung 43: Wetterstation im Botanischen Garten Berlin-Dahlem

Erhobene meteorologische Parameter sind unter anderem: Bodendruck<sup>1</sup>, Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Schneehöhe, Bedeckungsgrad, und Wettergeschehen.

Die aufgenommenen Rohdaten werden zunächst geprüft und vorverarbeitet, ehe sie zur weiteren Verwendung freigegeben werden.

Für die Auswertung der Messdaten innerhalb dieses Forschungsprojekts wurde auf das Messnetz des DWD zurückgegriffen. Dieser stellt in seiner kostenfreien Grundversorgung die Daten von 78 Messstationen in Deutschland zur Verfügung. Die kostenfreie Grundversorgung stellt einen kleinen Bereich der Leistungen des DWD dar [DWD2, 2016]. Ein Teil der Grundversorgung wird über FTP-Server bereitgestellt. Alle anderen meteorologischen Parameter können im Nachhinein kostenfrei vom Archiv des DWD bezogen werden.

---

<sup>1</sup> Bodendruck: mittlerer atmosphärischer Bodendruck. Druck des Luftdrucks im Bodenniveau.

Die Messwerte der kostenfreien Grundversorgung werden stündlich aktualisiert und liefern Informationen über Luftdruck, Lufttemperatur, Niederschlagsmenge, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, aktuelle Wettergeschehen, Pollenflug und Böen.

### **Glättemeldeanlagen**



Abbildung 44: Glättemeldeanlage Fahlhorst

Glättemeldeanlagen (GMA) dienen der Erfassung von meteorologischen Parametern und der Überwachung besonders glätteanfälliger Bereiche im Straßennetz, um beispielsweise über die Gefriertemperatur Prognosen für Winterdienstesätze zu erstellen [GMA1, 2016]. Deutschlandweit gibt es über 1.300 GMA, vorrangig an Autobahnen, Autobahnbrücken und stark befahrenen Landstraßen (vgl. Abbildung 44).

Die Daten werden alle 15 Minuten aktualisiert und können über die kostenfreie Grundversorgung des Deutschen Wetterdienstes abgerufen werden. Dabei werden die Messwerte aller meteorologischen Parameter aktuell übertragen, lediglich für die Messwerte zum Parameter Windstärke und -richtung, werden 10minütige Mittel gebildet.

Standardmäßig werden folgende atmosphärische Parameter aufgezeichnet: Lufttemperatur, Taupunkttemperatur, Sichtweite, Windrichtung und-geschwindigkeit, sowie Niederschlagsart, -höhe und-intensität.

Ein wichtiger Bestandteil der GMA ist die im Fahrbahnbelag eingelassene Sonde, welche meteorologische Parameter im Zusammenhang mit der Straße aufnimmt: die Belagstemperatur an

einer Standardposition, sowie an einem beliebigen anderen Standort, die Untergrundtemperatur in einer standardmäßigen Tiefe von 30 cm, sowie in 15 cm oder 7 cm Tiefe, die Wasserfilmdicke und-dickenklasse und der Straßenzustand [GMA2, 2016].



Abbildung 45: Fahrbahnsonde [MG, 2016]

Manche Sonden lassen sich auch künstlich kühlen, sodass zeitabhängige Prognosen über zukünftige Glättebildungen erstellt werden können. Daraus kann die Autobahnmeisterei Rückschlüsse über notwendige Streueinsätze ableiten (vgl. Abbildung 45).

## 4.5 Die Reibwertdatenbank

Alle erhobenen Daten wurden in einer Datenbank abgelegt. So ist es möglich kurzfristig Auswertungen über eine Vielzahl von Parametern vorzunehmen. In der Datenbank entspricht jede durchgeführte Vollbremsung einem Datensatz. Zu dieser Bremsung wurde entsprechend der ermittelte mittlere maximale Reibwert erhoben, alle aufgezeichneten Wetterdaten, sämtliche Informationen, die das Fahrzeug zur Verfügung stellt, die Beobachtung des Fahrers zur Zwischenschicht und die Daten, die zu Kontrollzwecken von der zusätzlichen Messtechnik aufgezeichnet wurden. Eine Übersicht über alle erhobenen Daten ist in Anhang 10.3 zu finden, die detaillierte Auswertung der erhobenen Messdaten folgt in Kapitel 5.

## 5 Versuchsergebnisse

Im Verlauf der Testfahrten konnten insgesamt 2.080 Testbremsungen durchgeführt werden. Mit allen dazu jeweils erfassten Informationen entstand daraus eine umfassende Datenbank. Mittels dieser Datenbank lassen sich zahlreiche Zusammenhänge zwischen dem maximalen Reibwertpotential und möglichen Einflussgrößen untersuchen. Damit stellt dieses Wissen eine notwendige Grundlage für das zu entwickelnde Schätzmodell dar.

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse zum Reibwertpotential, die sich aus den Testbremsungen ableiten lassen, dargestellt. Um die Validität dieser Ergebnisse bewerten zu können, wurde zunächst die Qualität der einzelnen Daten untersucht. Dazu wurden verschiedene Quervergleiche einzelner Messdaten vorgenommen. So wurde beispielsweise die Messgenauigkeit des fahrzeugseitigen Außenthermometers mit den Temperaturmessungen des Vaisala-Sensors und mit den Messdaten nahegelegener Wetterstationen verglichen.

Weiterhin wurden den gemessenen maximalen Reibwerten Vergleichsmessungen mit dem Skid Tester und mit dem Seitenkraftmessverfahren gegenübergestellt. Da alle Verfahren letztendlich die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche, oder aus Fahrzeugsicht auch das Verzögerungspotential messen, sollten im qualitativen Vergleich zumindest ähnliche Ergebnisse zu erwarten sein.

Abschließend wird in diesem Kapitel untersucht, inwiefern es anhand der gewonnenen Messdaten möglich ist, die zahlreichen Asphaltoberfläche zu klassifizieren und dadurch möglicherweise eine feingliedrige Einteilung der Straßenoberfläche zu ermöglichen. Das kann sich auf die Genauigkeit des Schätzverfahrens positiv auswirken.

### 5.1 Bewertung der Messdatenqualität

Während der Messfahrten wurden neben der zur Reibwertbestimmung notwendigen Fahrzeugverzögerung zahlreiche weitere Messgrößen erfasst, die für die Entwicklung und Funktionalität des Schätzverfahrens notwendig sind. Hierzu zählen insbesondere Wetterdaten, wie Luft- und Bodentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Regenintensität, Taupunkttemperatur und andere Größen. Um die Qualität und Güte der einzelnen Sensoren zu bewerten und damit Kenntnis darüber zu haben, inwiefern sie für die weitere Datenauswertung nutzbar sind, wurden im Folgenden zahlreiche Messgrößen verschiedener Messgeräte miteinander verglichen. Außerdem wurde ein Vergleich der subjektiven Fahrereinschätzung zum aktuellen Straßenzustand und dem tatsächlich gemessenen maximalen Reibwert erstellt.

### 5.1.1 Vergleich der Lufttemperatur

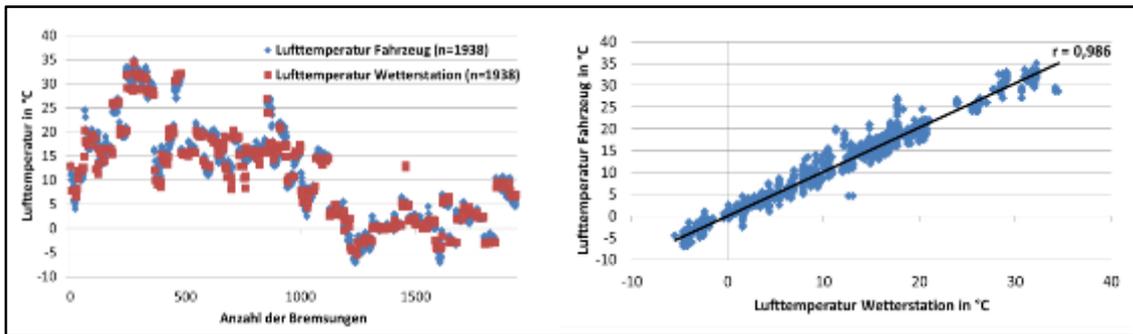


Abbildung 46: l.: Vergleich der Lufttemperatur von Fahrzeug und Wetterstation, r.: Korrelation der Lufttemperatur zwischen der Wetterstation und dem Fahrzeug

In Abbildung 46 wird der gemessene Parameter Lufttemperatur zwischen der Wetterstation und dem Fahrzeug aufgetragen, sowie korreliert. Es zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den gemessenen Temperaturen. Der Korrelationskoeffizient  $r$  liegt bei 0,986 was auf einen starken Zusammenhang schließen lässt bzw. in diesem Fall dafür spricht, dass der Temperatursensor am Fahrzeug, sowie an der Wetterstation gleiche Werte aufzeichnet. Auch die Vergleiche zwischen GMA und Fahrzeug, WS und GMA, Fahrzeug und VAISALA sowie WS und VAISALA zeigen ähnlich gute Korrelationen zwischen 0,940 und 0,970. Lediglich zwischen GMA und VAISALA liegt der Korrelationskoeffizient bei 0,636 und beschreibt somit nur eine mittlere Korrelation, was allerdings an der geringen Datenmenge ( $n = 341$ ) für beide Sensoren liegen kann (Abbildung 167).

### 5.1.2 Vergleich der Oberflächentemperatur

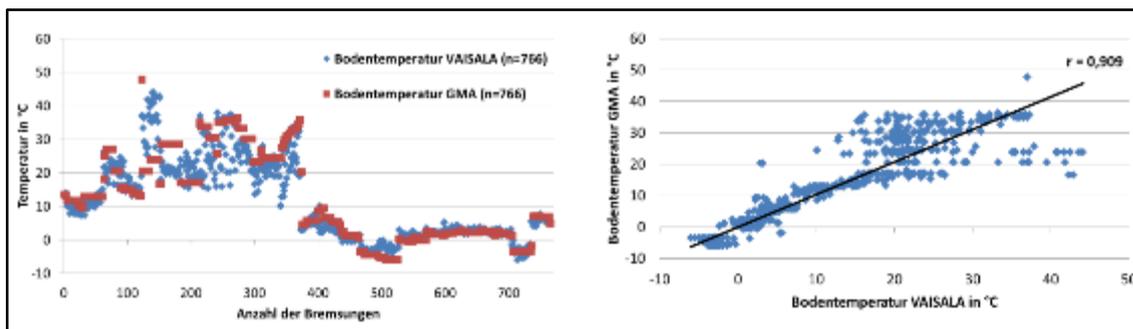


Abbildung 47: l.: Vergleich der Oberflächentemperatur zweier Sensoren, r.: Korrelation der Oberflächentemperatur zwischen zwei Sensoren

Die Datenreihen von der Bodentemperatur des VAISALA und der GMA weisen mit  $n=766$  eine solidere Datenmenge auf. Aus der Korrelation von 0,909 kann geschlussfolgert werden, dass die Messwerte

von VAISALA und GMA in Hinblick auf die Bodentemperatur als ähnlich angesehen werden können, mit geringen Abweichungen (Abbildung 47). Insgesamt kann von gleichen Messwerten zwischen VAISALA und GMA bezüglich der Bodentemperatur ausgegangen werden.

### 5.1.3 Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit

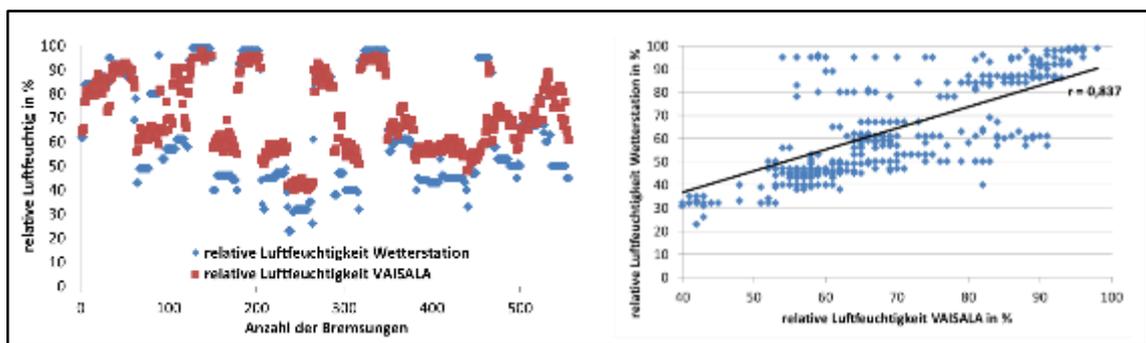


Abbildung 48: l.: Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit zweier Sensoren, r.: Korrelation der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen zwei Sensoren

Die relative Luftfeuchtigkeit zwischen Wetterstation und VAISALA weist mit 556 Messdaten den größten Datensatz auf und stimmt vor allem in den höheren Luftfeuchtigkeitsbereichen überein. Unterschiede können beispielsweise aufgrund der unterschiedlichen Messhöhe oder Oberfläche über welcher gemessen wird, entstehen. Die Wetterstation misst in 2,0 m Höhe über Rasen, der VAISALA hingegen 0,9 m über der jeweiligen Fahrbahnoberfläche. Mit 0,837 zeigt der Korrelationskoeffizient einen hohen Zusammenhang der Messwerte an (Abbildung 48). Ob von einem generellen Offset ausgegangen werden kann, ist am Ende der Vergleiche in Abbildung 51 zu sehen.

### 5.1.4 Vergleich des Taupunkts

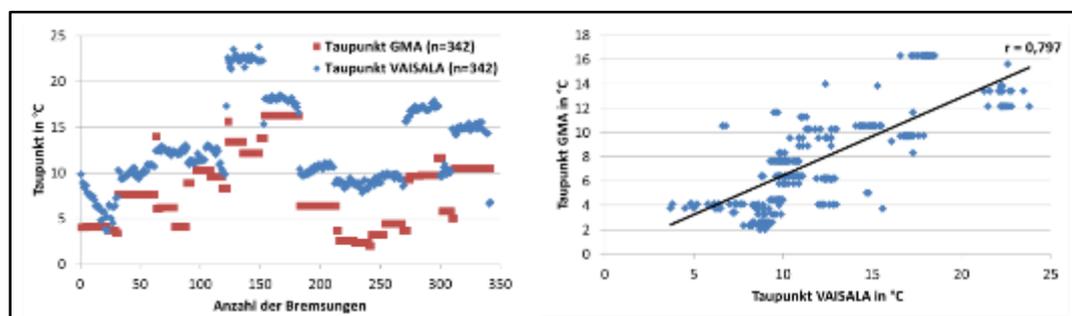


Abbildung 49: l.: Vergleich des Taupunkts zweier Sensoren, r.: Korrelation des Taupunkts zwischen zwei Sensoren

Die Datenreihen von GMA und VAISALA korrelieren mit 0,797 etwas schlechter, als die anderen verglichenen Sensoren bezüglich des Taupunktes. Die GMA liegt mit dem Taupunkt nahezu immer unterhalb der Messwerte des VAISALA, was auf die Messhöhe zurückzuführen sein kann, wobei die Messhöhe der GMA bei 2 m und beim VAISALA bei 0,90 m liegt (Abbildung 49).

### 5.1.5 Vergleich des Fahrbahnzustands

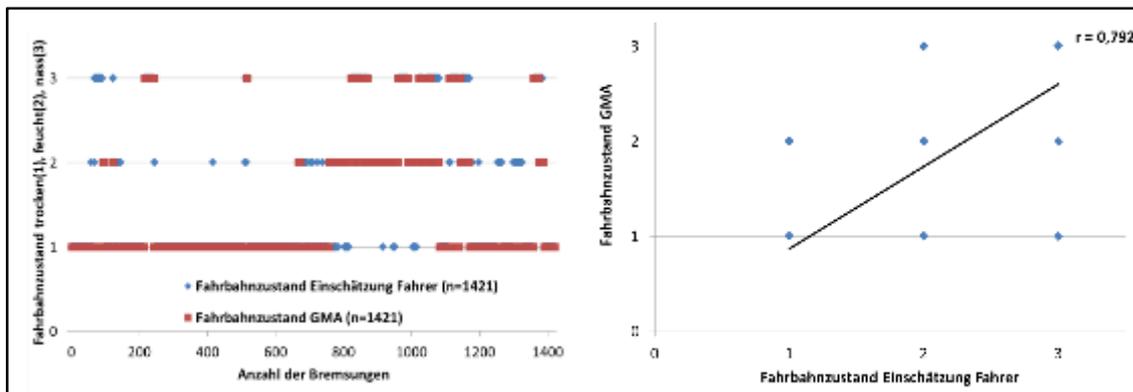


Abbildung 50: l.: Vergleich des Fahrbahnzustands zweier Sensoren, r.: Korrelation des Fahrbahnzustands zwischen zwei Sensoren

Der Fahrbahnzustand der GMA und die Einschätzung zum Fahrbahnzustand des Fahrers weisen teilweise erhebliche Unterschiede auf. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,792 liegt dennoch eine hohe Korrelation vor. Generell ist die GMA nicht in der Lage den Zustand „Trocken“ gut vorherzusagen, kann jedoch gut zwischen feuchten und nassen Fahrbahnzustand unterscheiden und stimmt in diesen Vorhersagen mit der Einschätzung des Fahrers gut überein (Abbildung 50).

### 5.1.6 Vergleich des Fahrzeugsensors und einer Wetterstation für einen halben Tagesgang

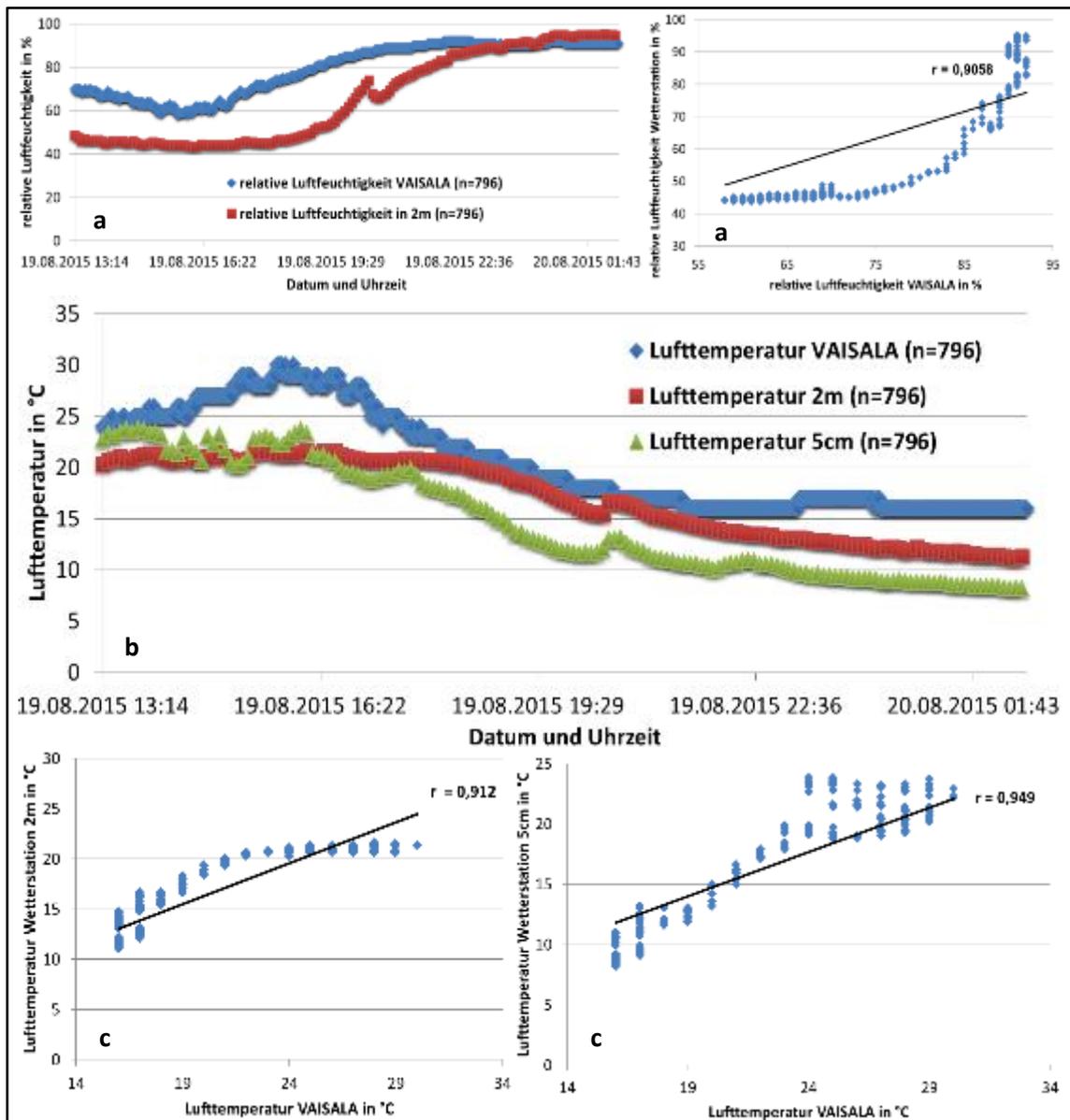


Abbildung 51: Vergleich der Lufttemperatur der Wetterstation in 2m und 5cm mit der Lufttemperatur des VAISALA, sowie Korrelation der Parameter



Abbildung 52: Messfahrzeug im Botanischen Garten Berlin-Dahlem in 30m Entfernung zur Wetterstation

Die Lufttemperatur zwischen VAISALA und Wetterstation liegt mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,940 bei einer hohen Korrelation. In einigen Bremsungen ist zu erkennen, dass die Temperatur der Wetterstation generell unterhalb der Lufttemperatur des VAISALA liegt (siehe Anhang). Vor allem bei der relativen Luftfeuchtigkeit war ein generelles Unterschätzen der Wetterstation im Vergleich zur relativen Luftfeuchtigkeit des VAISALA zu sehen (vgl. Abbildung 48). Um zu überprüfen, ob es einen allgemeinen Offset zwischen Wetterstation und VAISALA gibt, wurde das Messfahrzeug mit VAISALA in 30 m Entfernung zur Wetterstation im Botanischer Garten Dahlem geparkt. Die Messung erfolgte von 13:00 Uhr bis 01:45 Uhr vom 19.08.2015 auf den 20.08.2015. Wie zu erwarten war, lag die relative Luftfeuchtigkeit der Wetterstation unterhalb der relativen Luftfeuchtigkeit des VAISALA, näherte sich aber in den Abendstunden an, bis gegen Mitternacht die relative Luftfeuchtigkeit der Wetterstation sogar leicht über der relativen Luftfeuchtigkeit vom VAISALA lag (Abbildung 51a). Trotz der geringen Entfernung kann vermutet werden, dass der VAISALA durch die direkte Sonneneinstrahlung beeinflusst wurde und sich die Messreihen, aufgrund der ausbleibenden Sonneneinstrahlung am Abend, angleichen. Der Einfluss der Sonneneinstrahlung ist auch gut in Abbildung 51b zu erkennen. Die Datenreihen für die Lufttemperatur in 5 cm und 2 m der Wetterstation liegen generell unterhalb der Messreihe für die Lufttemperatur des VAISALA (vgl. Abbildung 51c). Am Nachmittag sind die Unterschiede der drei Messreihen am größten, auch die Lufttemperatur in 5 cm schwankt sehr stark. Gegen Abend nähern sich die Datensätze an, allerdings gleichen sie sich zu keiner Zeit. Die Korrelationen aller drei Messreihen sind sehr hoch, jedoch konnte mit dem Versuch kein Offset zwischen Wetterstation und VAISALA gefunden werden. Um Störfaktoren, wie die Sonneneinstrahlung, ausschließen zu können muss die Messung an einem bedeckten Tag wiederholt werden.

## 5.2 Ergebnisse der Reibwertmessungen

Im Verlauf des Projekts konnten über den gesamten Zeitraum insgesamt 4.289 Messungen durchgeführt werden. Hierfür wurden entlang einer festgelegten Messroute an 32 Bremspunkten Vollbremsungen aus verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten durchgeführt, im weiteren Projektverlauf wurde auch an anderen Orten gebremst. Die Fahrzeugverzögerung wurde jeweils aufgezeichnet, um Rückschlüsse auf den zu dem Zeitpunkt vorhanden maximalen Reibwert zu ziehen. Die Messungen wurden u.a. bei verschiedenen Tageszeiten und bei unterschiedlichen Wetterbedingungen aufgenommen. Hierbei hat der Fahrer bei jeder Bremsmessung über ein programmiertes Tool Angaben zu Straßen- und Wetterverhältnissen abgegeben (Abbildung 53).

Bremspunkt 1 Grenzstr.		<input checked="" type="checkbox"/> BP genommen			
Niederschlag	Intensität	Strasse	Reibwert		
1 - Kein Niederschlag	Q - keine	A - trocken	Y - normal		
2 - Regen	W - leicht (Niesel)	N - feucht	X - mittel (glatt, nass)		
3 - Eisregen	E - mittel (Normal)	D - nass	C - niedrig (glatt, eis)		
4 - Schnee	R - stark (Schauer)	F - Wasser steht			
5 - Graupel		G - Frost			
6 - Hagel		H - Vereist			
		J - Schnee(matsch)			
		K - Schnee(decke)			

Vorheriger Bremspunkt      Nächster Bremspunkt

Abbildung 53: VBA-Tool zur Aufnahme aktueller Parameter durch den Fahrer

Diese Angaben enthielten dann genauere Informationen zum Straßenzustand (z.B. trocken, feucht, nass, etc.), Niederschlag (Regen, Schnee, etc.), zur Niederschlagsintensität (leicht, mittel, stark, etc.) und dem eingeschätzten maximalen Reibwert (hoch, mittel und niedrig). Diese erhobenen Daten bekamen bei der Eingabe einen Zeitstempel, so dass im Nachhinein die Daten mit den Kameraaufzeichnungen und Informationen von Glättemeldeanlagen und Wetterstationen abgeglichen werden konnten. Ebenso dienten diese Daten der Validierung des entwickelten Schätzalgorithmus'. Die aufgenommenen Messungen umfassten im Wesentlichen das gesamte Spektrum von trockenen, regnerischen und verschneiten Wetterbedingungen. Die folgende Abbildung 54 zeigt die Verteilung der aufgenommenen Messungen in Abhängigkeit des Niederschlages und der Niederschlagsintensität.

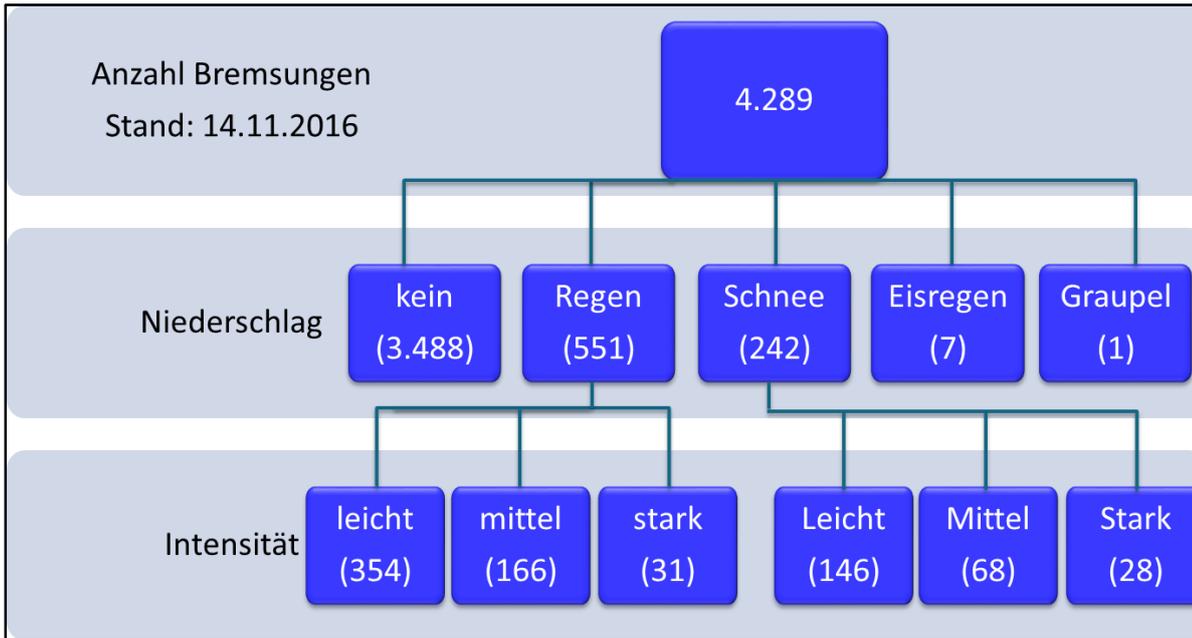


Abbildung 54: Verteilung der Bremsungen nach Niederschlag und Niederschlagsintensität

Je nach Wetterbedingung konnten sich daraus unterschiedliche Zwischenschichten zwischen Reifen und Fahrbahn ergeben. Hierbei wurden die Zustände in die sechs Bereiche trocken, feucht, nass, Schneedecke, Schneematsch und „Wasser steht“ unterteilt. Die Abbildung 55 zeigt, wie sich die Messdaten auf die unterschiedlichen Zwischenschicht-Zustände verteilen.

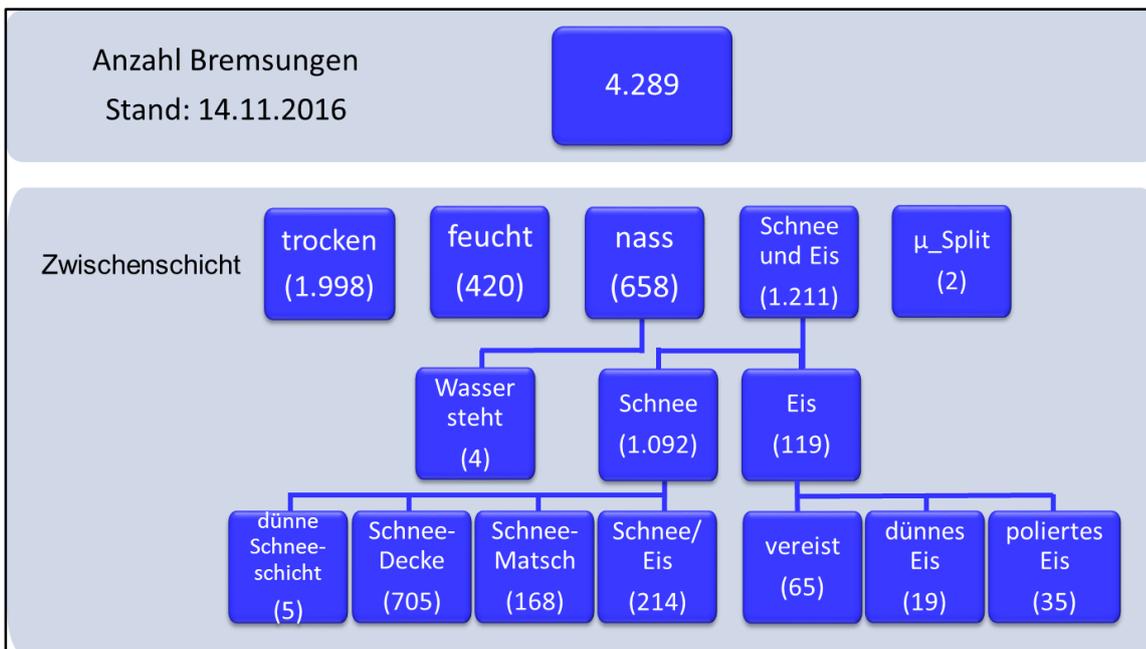


Abbildung 55: Verteilung der Messdaten auf die unterschiedlichen Zustände der Zwischenschicht

Da unter realen Bedingungen getestet wurde und das Wetter nicht beeinflussbar ist, ist hauptsächlich bei trockenen, feuchten und regnerischen Bedingungen eine halbwegs akzeptable Datenbasis entstanden. Besonders für die Zwischenschichtzustände Schnee, Eis und stehendes Wasser liegen für eine statistische Auswertung zu wenige Daten vor. Daher wurde eine zusätzliche Testkampagne in Schweden gestartet, bei der eine Vielzahl von Bremsungen bei Schnee und Eis durchgeführt werden konnten (s. Kapitel 5.2.4).

Die aufgenommene Datenbasis ist ebenfalls unter verschiedenen Straßentypen entstanden. Hierbei wurden entlang der Messroute auf Stadt-, Landstraßen und Autobahnen Bremsungen auf Asphalt-, Beton- und Kopfsteinpflasteroberflächen durchgeführt. Abbildung 56 veranschaulicht die Verteilung der Messdaten in Abhängigkeit der Straßenoberfläche und des Ortes.

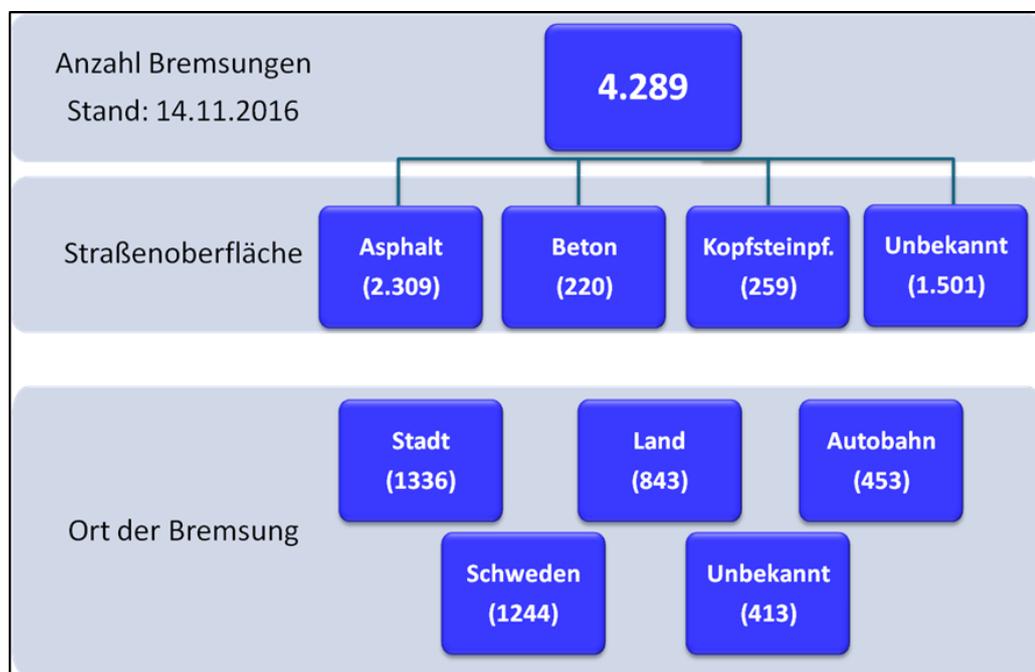


Abbildung 56: Verteilung der Messdaten in Abhängigkeit der Straßenoberfläche und des Ortes

Die Messungen auf Beton sind hierbei nur auf Autobahnen und die Kopfsteinpflaster nur in Stadt-Bereichen entstanden, so dass für diese beiden Oberflächen nur Messungen bei entsprechenden Geschwindigkeitsbereichen vorliegen. Bremsungen auf Asphalt-Oberflächen sind sowohl auf Stadt-, Landstraßen und Autobahnen durchgeführt worden.

Das Aufnehmen möglichst vieler zusätzlicher Parameter bei jeder Messfahrt sollte helfen, relevante Parameter zu identifizieren, die in einem Schätzverfahren entscheidende Aussagen zur Reibwertschätzung liefern können. Die Analyse der gesamten aufgenommenen Messdaten hat hierbei Aufschluss und wichtige Hinweise auf einzelnen Einflussfaktoren (Fahrzeug, Wetter, Zwischenschicht,

Straße) ergeben. Diese Erkenntnisse werden im Folgenden in Grafiken dargestellt, erläutert und diskutiert.

Abbildung 57 zeigt alle aufgenommenen maximalen Reibwerte aus den 4.289 Bremsungen.

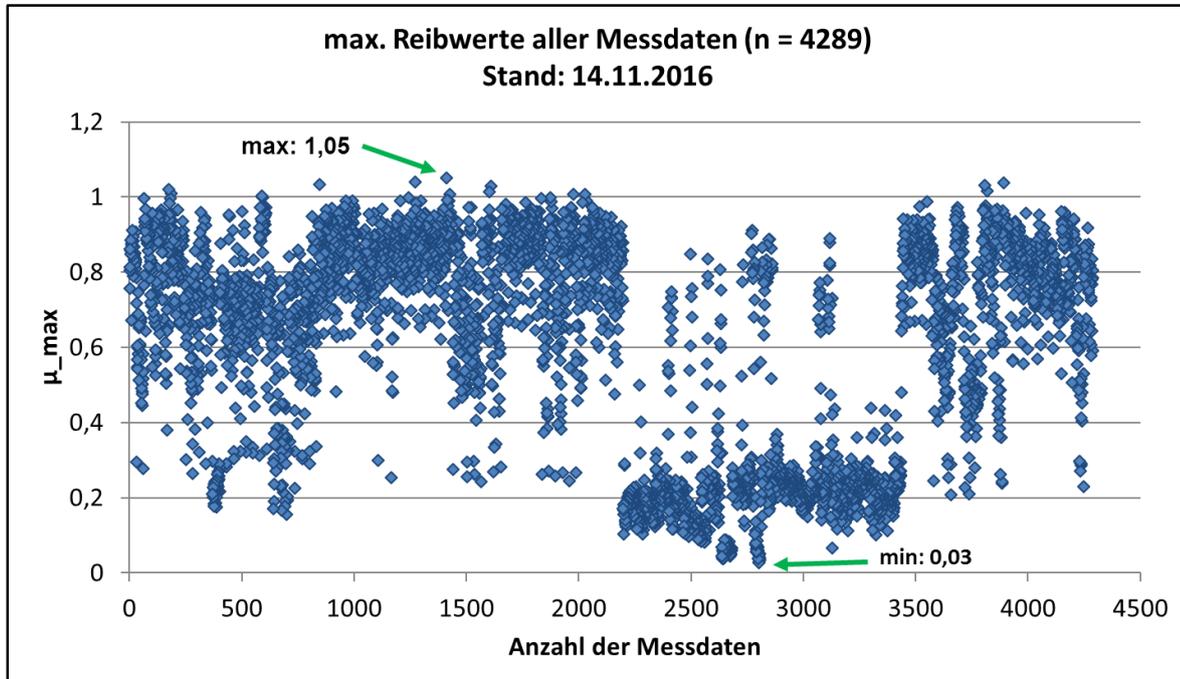


Abbildung 57: Übersicht der maximalen Reibwerte aller Messdaten

Hierbei bewegen sich alle Reibwerte in einer Spanne von mindestens 0,16 bis maximal 1,05.

### 5.2.1 Auswertung der Reibwertmessungen für verschiedene Zwischenschichten und Fahrbahnoberflächen

Anhand der erhobenen Datenmenge konnten die unterschiedlichen Bedingungen und verschiedene Einflussparameter getrennt oder auch in Kombination betrachtet und untersucht werden. Abbildung 58 veranschaulicht die maximalen Reibwerte bei trockener Fahrbahn in Abhängigkeit von der Ausgangsgeschwindigkeit. Hierbei wurden die Messwerte nach den einzelnen Straßentypen aufgliedert.

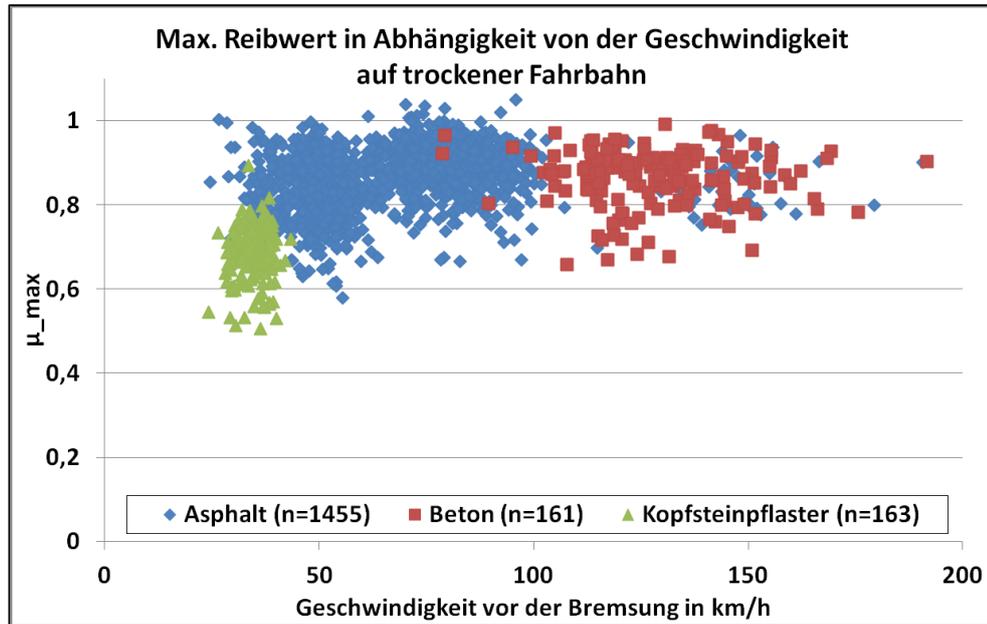


Abbildung 58: Übersicht der maximalen Reibwerte bei trockener Fahrbahn in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit

Die Bremsungen auf Kopfsteinpflaster wurden nur bei niedrigen Geschwindigkeiten durchgeführt. Dabei lag die Reibwertspanne auf Kopfsteinpflaster bei trockener Fahrbahn zwischen einem Minimum von 0,53 und einem Maximum von 0,89. Die Bremsungen auf Asphalt erstrecken sich über einen weiten Geschwindigkeitsbereich von 26,6 km/h bis zu 179,4 km/h. Der minimale Reibwert betrug hierbei 0,66 und der maximale Reibwert 1,05. Wie erwähnt, wurden die Betonmessungen ausschließlich auf der Autobahn, d.h. bei eher hohen Geschwindigkeitsbereichen (>80 km/h), durchgeführt. Hierbei lag der maximale Reibwert zwischen 0,66 und 0,97. Die folgende Abbildung 59 zeigt die maximalen Reibwerte bei feuchter Fahrbahn.

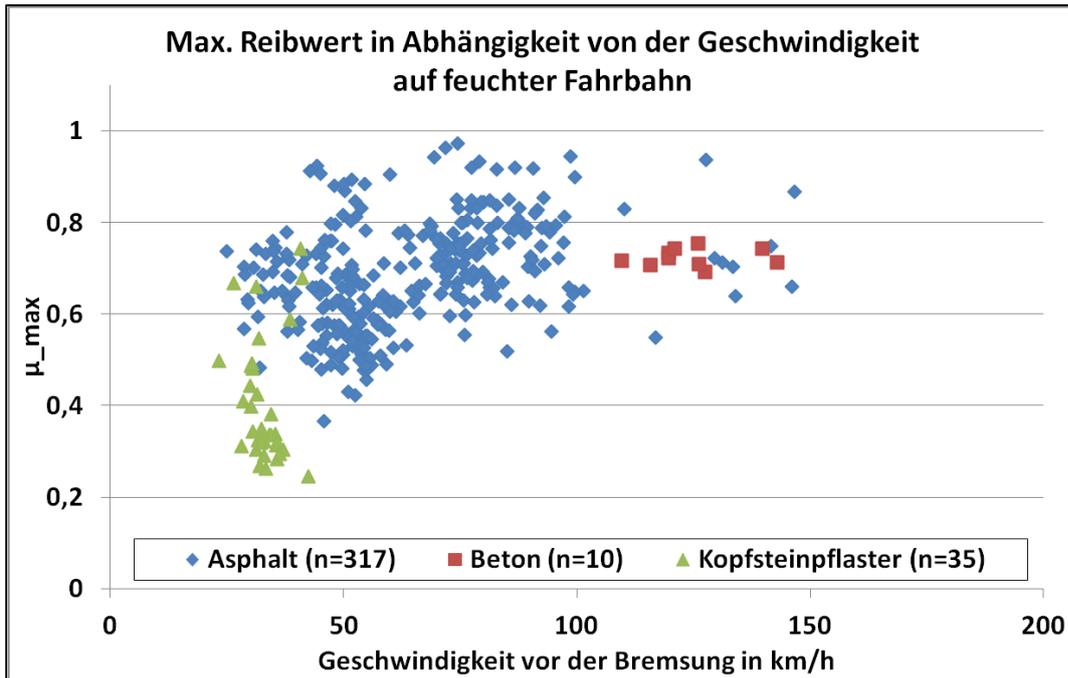


Abbildung 59: Übersicht der maximalen Reibwerte bei feuchter Fahrbahn in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit

Die Abbildung veranschaulicht, wie sich das allgemeine Niveau der maximalen Reibwerte verschlechtert, sobald auf feuchter Fahrbahn gebremst wird. Bei dem Untergrund Kopfsteinpflaster wurden bei den Vollbremsungen  $\mu_{\max}$ -Werte von 0,26 bis 0,74 erreicht. Bei den Asphalt-Bremsungen lagen die  $\mu_{\max}$ -Werte zwischen 0,47 und 0,97. Die geringe Anzahl der Messwerte bei feuchter Beton-Fahrbahn sind an dieser Stelle nicht repräsentativ. Hier befinden sich die Messwerte aktuell noch in einer sehr engen Spanne von 0,69 und 0,75. Abbildung 60 stellt die Messwerte auf nasser Fahrbahn dar.

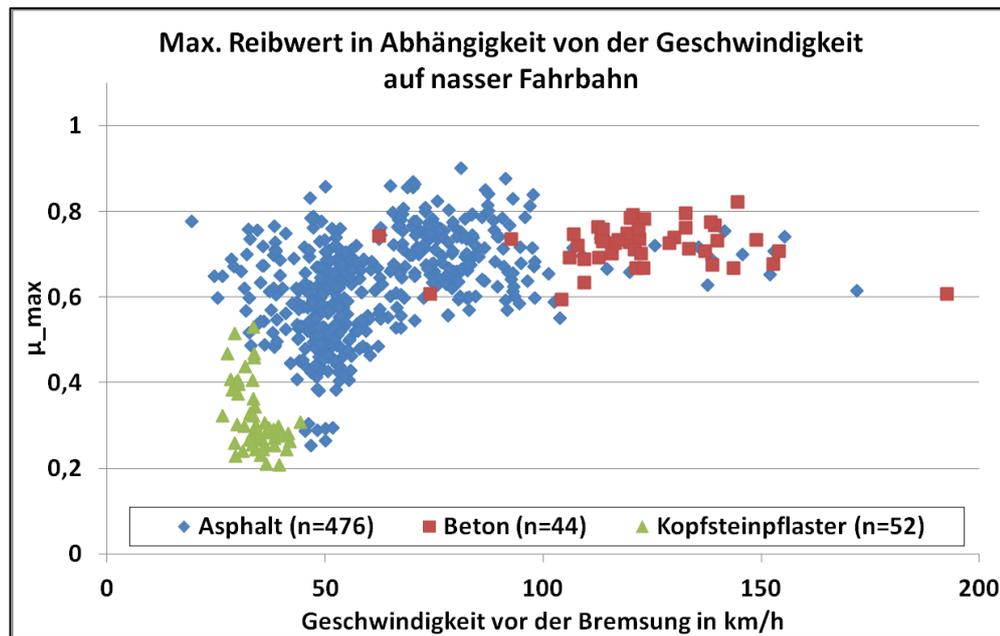


Abbildung 60: Übersicht der maximalen Reibwerte bei nasser Fahrbahn in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit

Bei nasser Fahrbahn sinken die maximalen Reibwerte weiter. Auf dem Untergrund Kopfsteinpflaster sind nur noch maximale Reibwerte zwischen 0,24 und 0,52 erreicht worden. Beim Asphalt-Untergrund liegen die  $\mu_{\max}$ -Werte zwischen 0,38 und 0,90. Anhand Abbildung 60 könnte die Annahme abgeleitet werden, dass sich für Asphalt, ähnlich wie auch bei feuchter Fahrbahn, der maximale Reibwert mit steigender Ausgangsgeschwindigkeit verbessert. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass bei den Messpunkten mit höheren Geschwindigkeiten (>60 km/h) hauptsächlich auf Landstraße gefahren wurde. Hierbei könnten neben der Geschwindigkeit u.a. mögliche Straßenverunreinigungen in der Stadt und unterschiedliche Oberflächenqualitäten Einflussfaktoren darstellen.

### 5.2.2 Auswertung der Reibwertmessungen für verschiedene Reifentypen

Der Fragestellung, welchen Einfluss der Reifen auf den maximalen Reibwert hat, ist ebenfalls nachgegangen worden. Hierfür waren die beiden Reifentypen (Sommer- und Winterreifen) zu jeder Jahreszeit im Einsatz. Abbildung 61 veranschaulicht die Ergebnisse aus dem Vergleich der beiden Reifentypen. Es wird deutlich, dass die Performance der beiden Reifentypen über alle Messdaten nicht stark voneinander abweicht. Daher werden im Folgenden die maximalen Reibwerte bei den verschiedenen Reifentypen in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur betrachtet. Da diese Messdaten nicht für alle 1.243 Sommerreifen- bzw. 1.669 Winterreifenmessungen verfügbar waren, wird im Folgendem auf Messdaten von zwei Messsensoren eingegangen. Hierfür werden zum einen

die Oberflächentemperaturdaten vom Vaisala-Sensor am Auto und zum anderen die erhobenen Daten von der Glättemeldeanlage in Fahlhorst verwendet. In Kapitel 5.1 wurde die Korrelation der beiden Messtechniken untersucht. Der Korrelationskoeffizient lag hier bei 0,909.

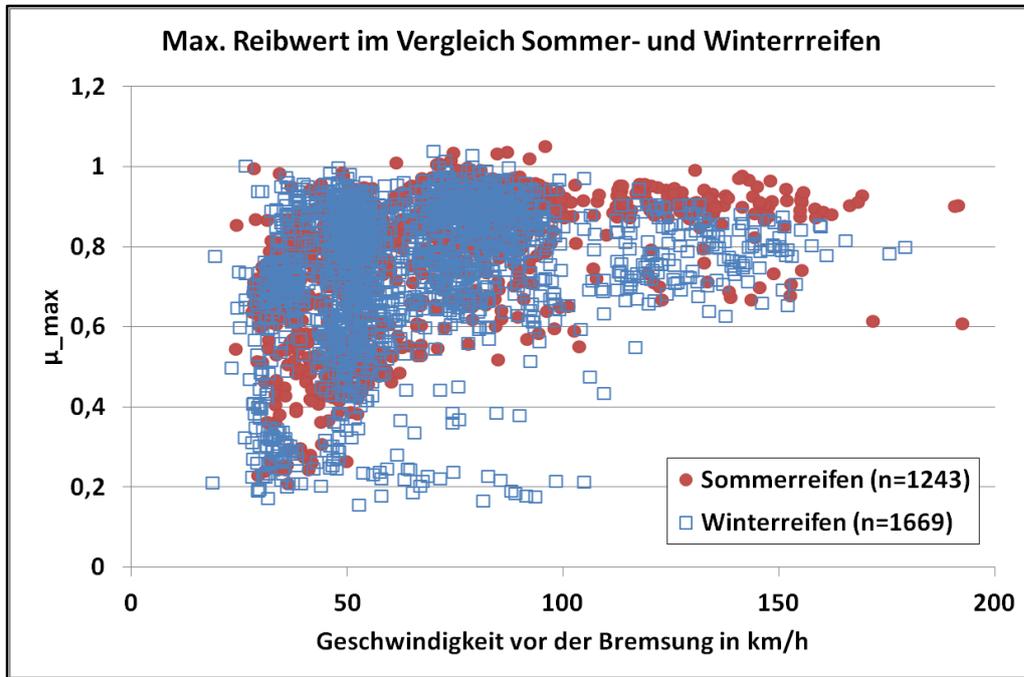


Abbildung 61: Vergleich der Sommer- und Winterreifenmessungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit (ohne Berücksichtigung der aufgenommenen Messdaten in Schweden)

Abbildung 62 veranschaulicht den Vergleich der Reifentypen auf trockener Fahrbahn in Abhängigkeit der Oberflächentemperaturen vom Vaisala-Sensor und Abbildung 63 die der Glättemeldeanlage. Die Glättemeldeanlage übermitteln aktuell hierbei nur alle 15 Minuten Messdaten, weshalb sich die gestaffelte Übersicht ergibt.

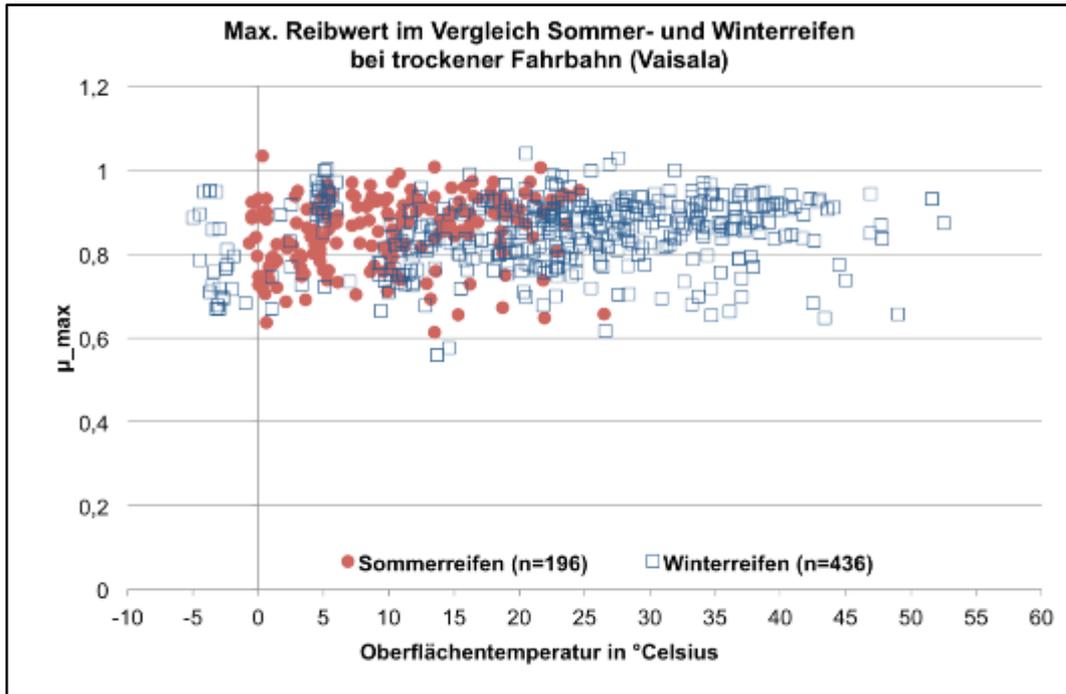


Abbildung 62: Vergleich der Sommer- und Winterreifenmessungen in Abhängigkeit Oberflächentemperatur vom Vaisala

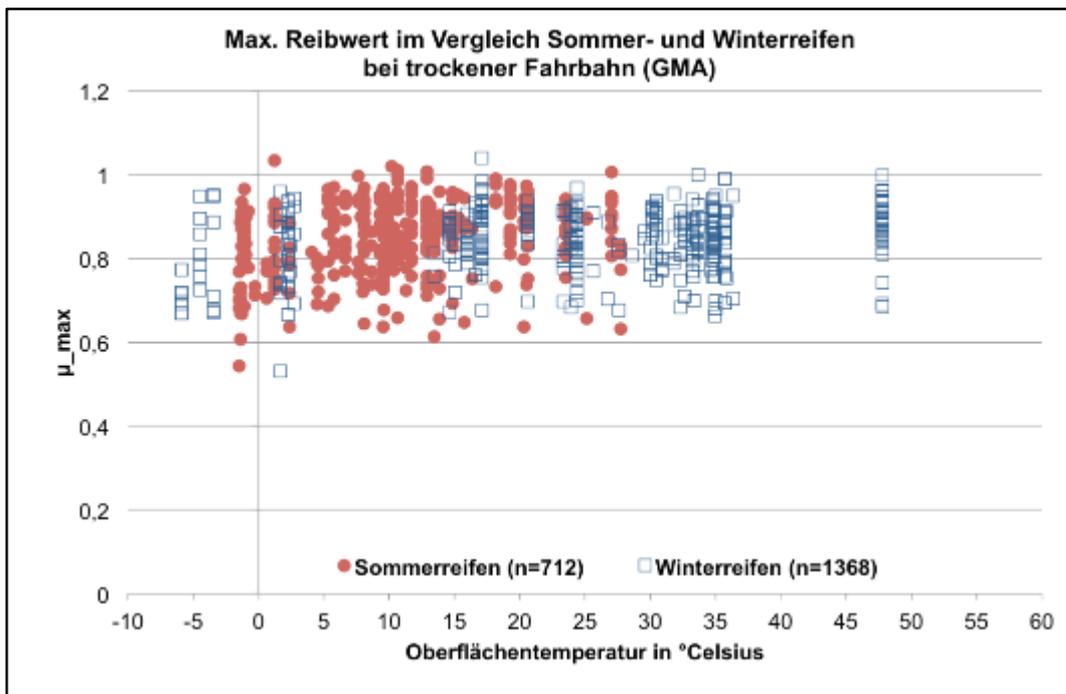


Abbildung 63: Vergleich der Sommer- und Winterreifenmessungen in Abhängigkeit Oberflächentemperatur von der Glättemeldeanlage

Auch hier sind keine größeren Unterschiede zwischen den Reifentypen zu erkennen. Sowohl der Winterreifen als auch der Sommerreifen erreichen ähnliche Reibwertspannen in den einzelnen Temperaturbereichen. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch bei feuchten und nassen Fahrbahnoberflächen (vgl. Abbildung 64).

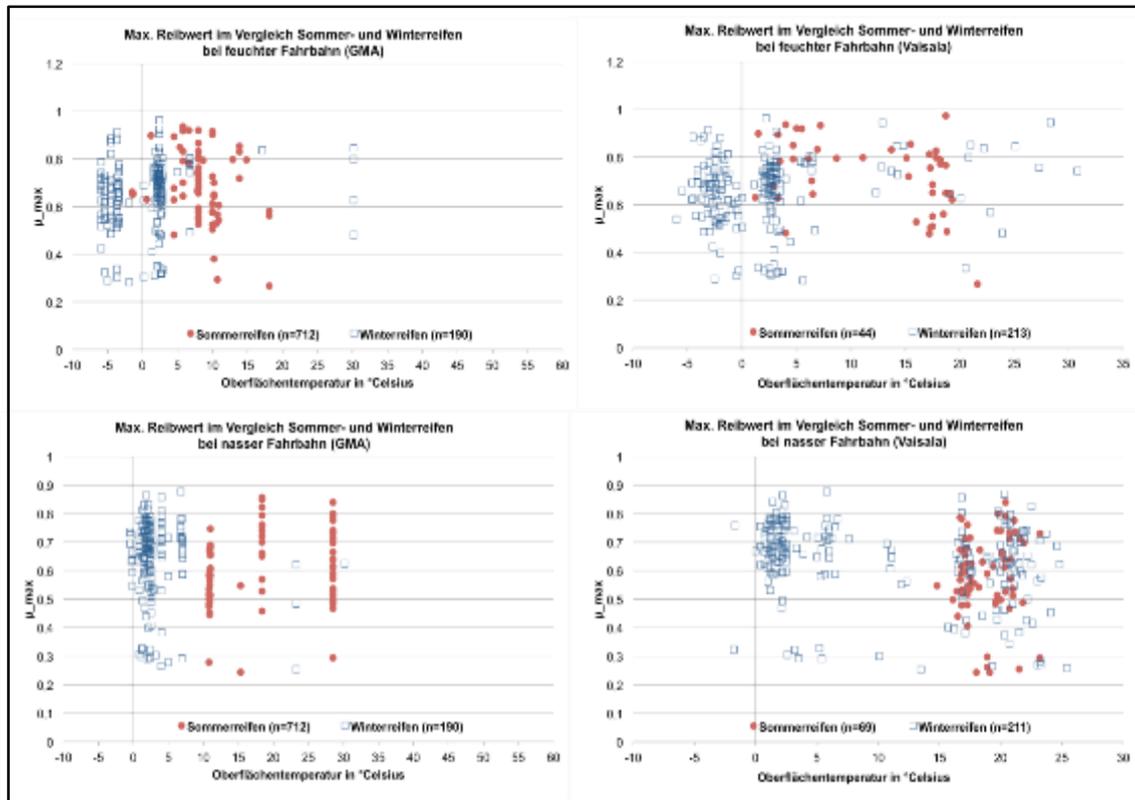


Abbildung 64: Vergleich der Sommer- und Winterreifenmessungen in Abhängigkeit Oberflächentemperatur von der Glättemeldeanlage (links) und Vaisala (rechts) für feuchte (oben) und nasse Fahrbahn (unten)

Die folgende Abbildung 65 veranschaulicht, dass Reifen eine Temperaturabhängigkeit besitzen. In dieser Abbildung sind die Messwerte der Winterreifen auf trockener Fahrbahn in Abhängigkeit zur vom Fahrzeug gemessenen Außentemperatur aufgetragen. Die Werte für die Beton-Messpunkte

steigen mit höheren Außentemperaturen an. Ähnliche Effekte sind auch auf Kopfsteinpflaster und Asphalt-Oberflächen zu erkennen.

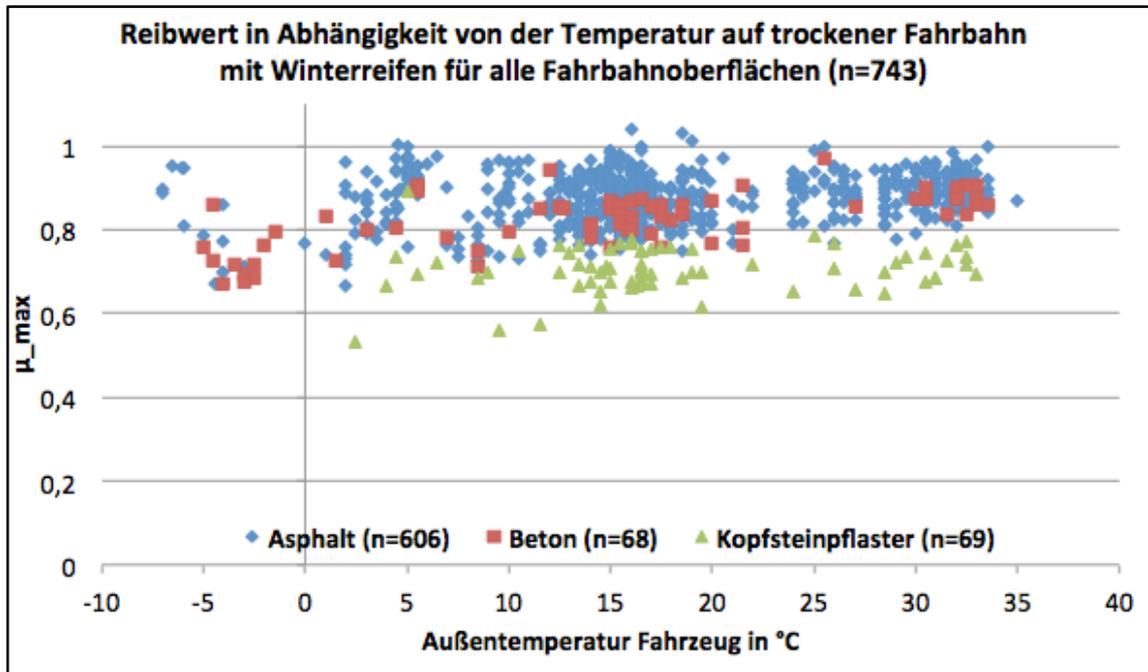


Abbildung 65: Reibwerte in Abhängigkeit der Außentemperatur bei Winterreifen

### 5.2.3 Auswertung der Reibwertmessungen für Brückenabschnitte

Die Bremspunkte auf der Messstrecke sind bewusst so ausgewählt worden, dass sich auch spezielle Fälle untersuchen lassen. Im nächsten Abschnitt wird darauf eingegangen, wie sich der Reibwert auf einer Brücke im Vergleich zu den Bereichen vor und nach der Brücke verändern kann. Die Abbildung 66 veranschaulicht an dieser Stelle die Ergebnisse eines Brückenbereiches in Fahlhorst bei feuchter Fahrbahn.

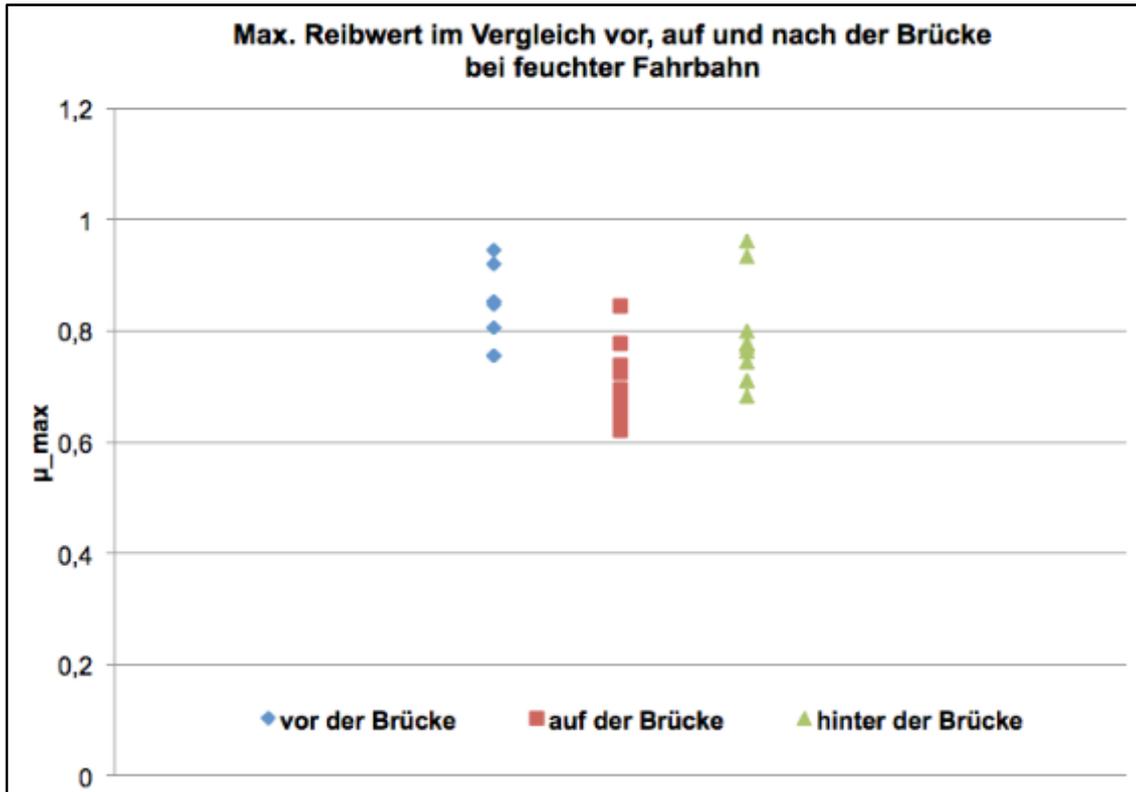


Abbildung 66: Vergleich des maximalen Reibwertes im Brückenbereich bei feuchter Fahrbahn

In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Reibwerte vor und nach der Brücke etwas höher liegen, als direkt auf der Brücke. Eine Auswertung der Oberflächentemperaturen ergab niedrigere Oberflächentemperaturen auf der Brücke.

#### 5.2.4 Durchführung von Wintermessfahrten in Schweden

Um die Zahl von Bremsungen auf Schnee Eis in einem erheblichen Maß zu steigern und somit die Datenbank derart zu erweitern, dass auch für die Zwischenschichtzustände valide Untersuchungen durchgeführt werden können, wurden Messfahrten in Schweden durchgeführt. Im Gebiet rund um die Stadt Arjeplog wurden rund 1.250 Bremsungen unter Winterbedingungen durchgeführt. Die meisten dieser Bremsungen wurden auf öffentlichen Straßen, einzelnen Bremstests wurden auch auf zugefrorenen Seen durchgeführt. Bremsversuche im öffentlichen Straßenland wurden ausschließlich mit Winterreifen durchgeführt.

Erwartungsgemäß ergaben sich für Oberflächen Eis und Schnee deutlich geringere gemessene Reibwerte als auf nassen, feuchten und trockenen Oberflächen. Jeweils eine Übersicht für Schnee- und Eisoberflächen ist in den Abbildung 67 und Abbildung 68 zu sehen.

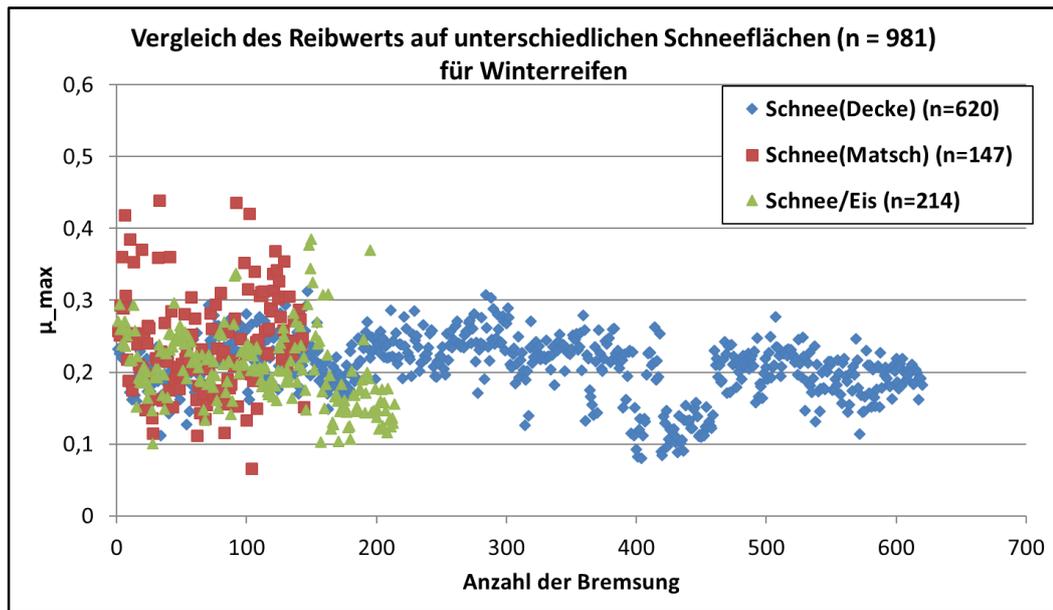


Abbildung 67: gemessene Reibwerte für verschiedene Schneeoberflächen

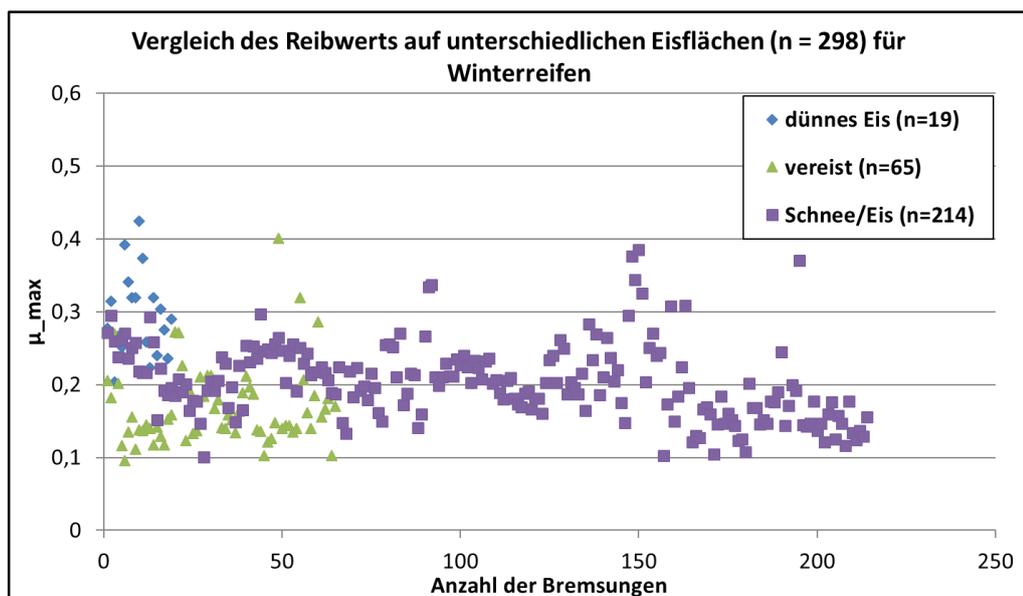


Abbildung 68: gemessene Reibwerte für verschiedene Eisoberflächen

Es zeigt sich, dass es zwischen der Umgebungstemperatur und dem Reibwert auf Schnee und Eis keinen Zusammenhang gibt (Abbildung 69).

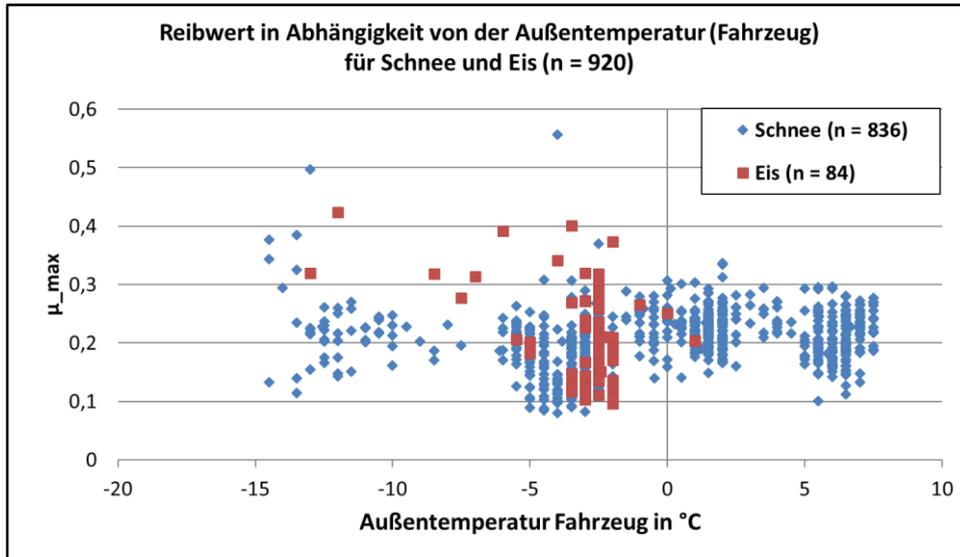


Abbildung 69: Reibwert auf Schnee und Eis in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur

Im Gegensatz dazu hängt Zwischenschichtzustand und damit der Reibwert in erheblichen Maß von der Oberflächentemperatur ab. Während trockene Bedingungen und damit hohe Reibwerte im gesamten Temperaturspektrum vorkommen können, trat oberhalb von einer Oberflächentemperatur von +3° C kein Schnee oder Eis auf. Umgekehrt ließ sich beobachten, dass unterhalb von -8 °C keine feuchten oder Zwischenschichten auftraten (Abbildung 70).

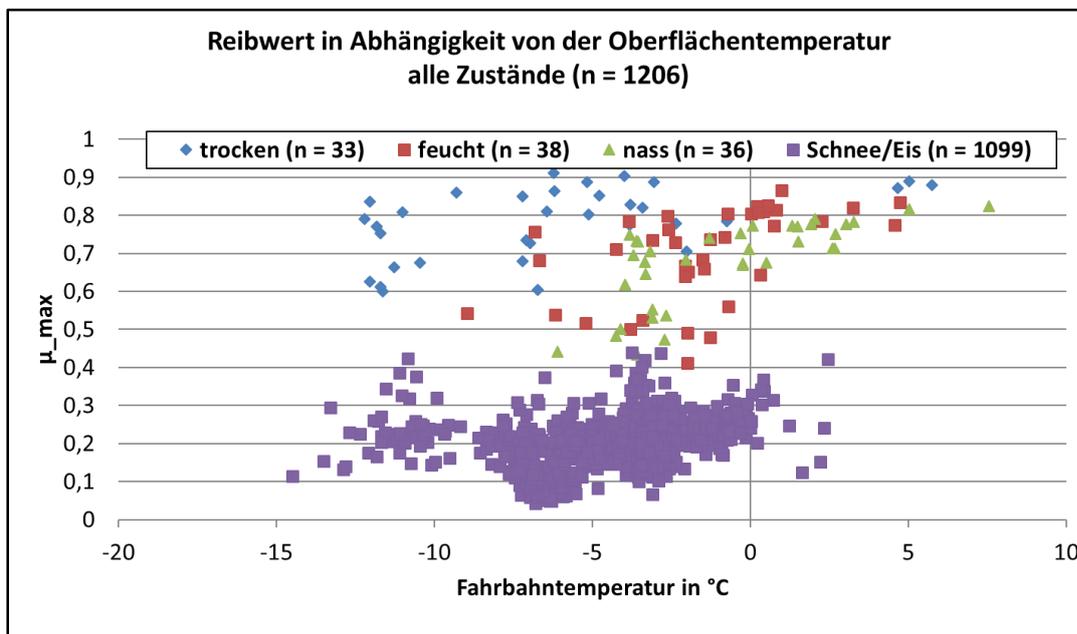


Abbildung 70: Reibwert in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur

Eine Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwerts lässt sich weder auf Eis noch auf Schnee erkennen (Abbildung 71). Die einzelnen Ausreißer in der Abbildung dadurch zu erklären, dass sich die Übergänge zwischen Schnee und nasser Fahrbahn bisweilen nicht ganz scharf voneinander trennen ließen.

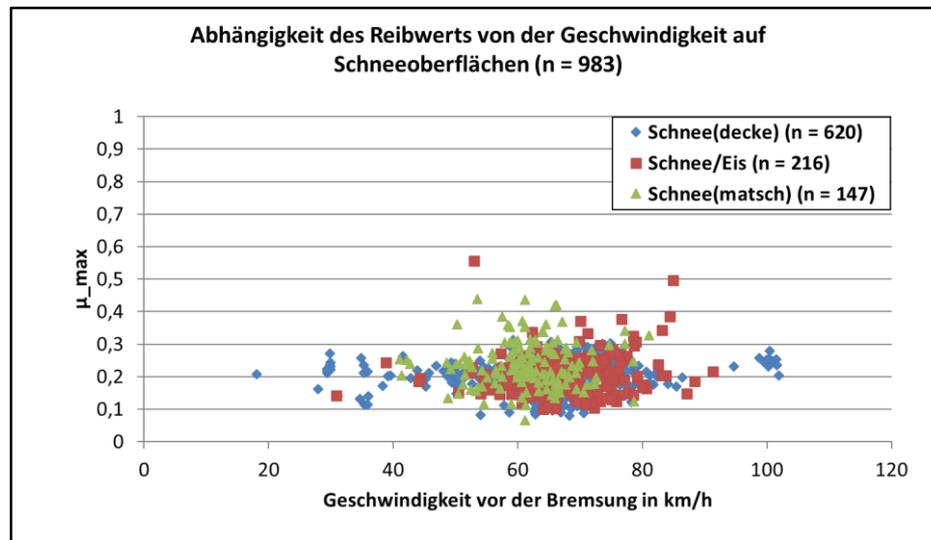


Abbildung 71: Gemessener Reibwert in Abhängigkeit von der Ausgangsgeschwindigkeit bei Schnee

Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, wurden auch in Schweden Vergleichsmessungen auf und unmittelbar vor und hinter Brücken durchgeführt (Abbildung 72). Es zeigt sich, dass für alle drei Arten von Schneezuständen der jeweilige Reibwert auf der Brücke (rote Punkte) niedriger ist als der mittlere Reibwert vor oder hinter der Brücke (schwarzer Punkt). Für trockene Fahrbahnen dreht sich dieser Effekt um.

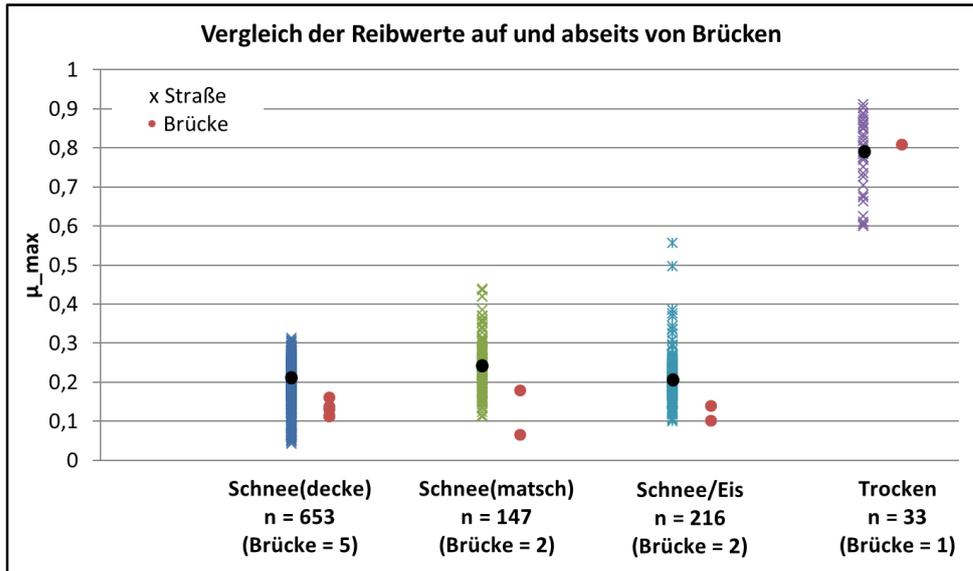


Abbildung 72: Reibwerte auf und neben Brücken

Auf einem Eissee wurden Vergleichsmessungen mit Sommer- und Winterreifen durchgeführt (Abbildung 73). Die Oberfläche war dabei weitestgehend mit Schnee bedeckt. Aus Ausgangsgeschwindigkeiten von 30 bis 100 km/h wurden zunächst jeweils Bremsungen mit Winterreifen durchgeführt (blaue Kurven). Einerseits zeigte sich dabei erneut, dass der Reibwert nicht von der Geschwindigkeit abhängt. Andererseits waren bei den insgesamt 40 Messungen nur geringe Schwankungen zu sehen, was für eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuche spricht. Anschließend die Versuche mit Sommerreifen wiederholt (grüne Kurven). Hier ergab sich jedoch die Schwierigkeit, dass Ausgangsgeschwindigkeiten oberhalb von 60 km/h nicht mehr zu erreichen waren. Aufgrund des geringen Reibwerts zwischen Sommerreifen und dem Schnee, konnten die Fahrwiderstände oberhalb dieser Geschwindigkeit nicht mehr überwunden werden. Entsprechend wurden die 10 Vergleichsmessungen nur für drei Ausgangsgeschwindigkeiten durchgeführt. Während sich auch hier eine hohe Reproduzierbarkeit ergab, zeigte sich vor allem, dass der maximale Reibwert auf Schnee mit Sommerreifen deutlich unterhalb von dem Reibwertpotential mit Winterreifen liegt. Im Mittel liegt das Reibwertpotential von Winterreifen um den Faktor drei über dem von Sommerreifen.

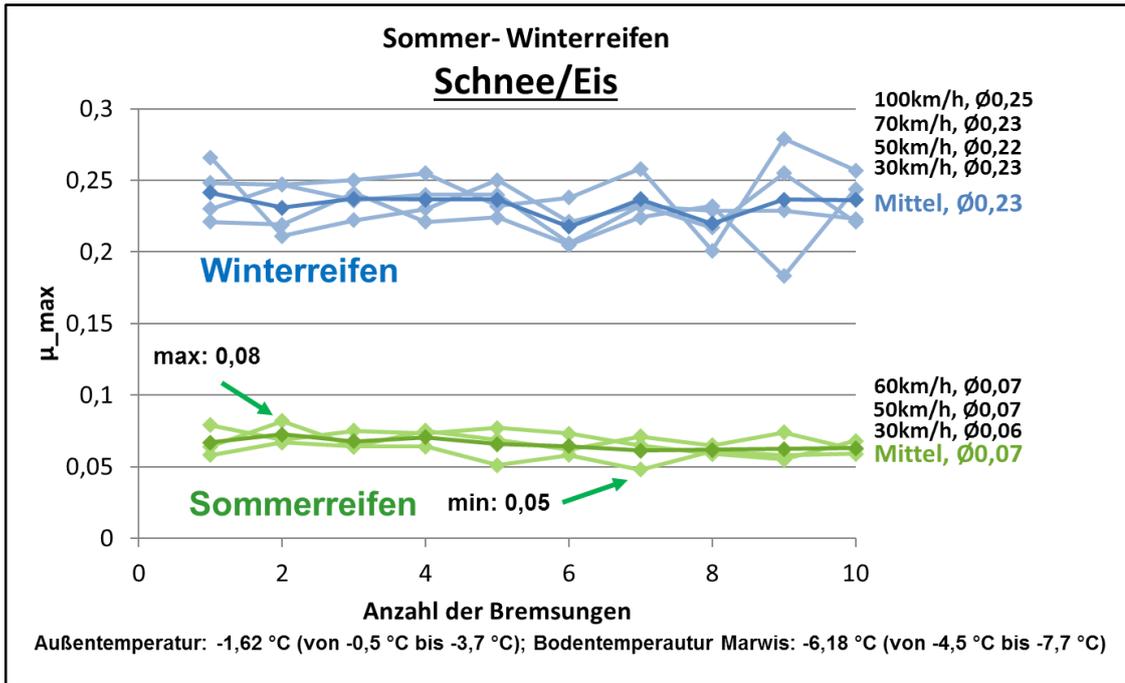


Abbildung 73: Reibwert auf Schnee für Sommer und Winterreifen

Dieser Effekt ließ sich auch für Bremsungen auf poliertem Eis beobachten. Während der Reibwert hier ohnehin schon sehr gering ist und für Winterreifen im Mittel bei  $\mu=0,08$  lag, wurde er mit Sommerreifen mit einem mittleren Reibwert von  $\mu=0,05$  kontinuierlich unterboten (Abbildung 74).

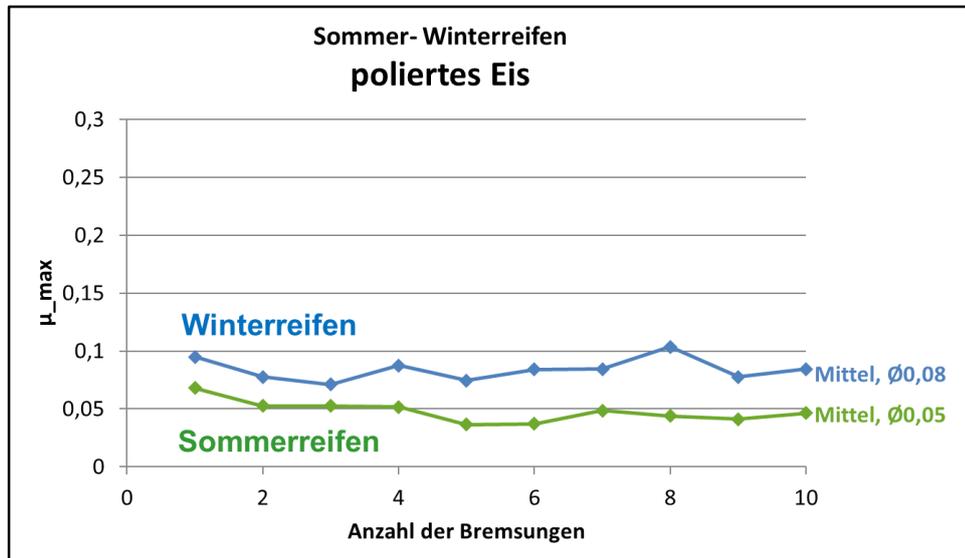


Abbildung 74: Vergleich von Sommer- und Winterreifen auf poliertem Eis

### **5.2.5 Parametervariation zur Bestimmung der Reibwertbeeinflussung**

Zur Untersuchung inwiefern die bisher erhobenen Messergebnisse nur unter bestimmten und genau definierten Randbedingungen gültig sind, wurden einige Parametervariationen durchgeführt. Dabei wurden einerseits Bremsungsversuche unternommen, bei denen das Messfahrzeug stark beladen wurden. Andererseits wurden Reifen mit unterschiedlicher Profiltiefe getestet. Dazu wurde von jeweils einem Satz Sommer- und Winterreifen die Gummioberfläche derart abgefräst, dass eine Profiltiefe knapp oberhalb der gesetzlichen Mindesttiefe von 1,6 mm übrigblieb.

Weiterhin wurden auf einem Messgelände Bremsungen bei starker Fahrbahnbewässerung durchgeführt. Hier wurde untersucht wie sich das Reibwertpotential in Abhängigkeit von der Ausgangsgeschwindigkeit und in Abhängigkeit von der Wassermenge verändert. Dabei wurde ebenfalls die Profiltiefe variiert.

#### **Variation des Beladungszustands**

Bei der Veränderung des Beladungszustands wurde das Messfahrzeug ausgehend von seinem Normalgewicht von 1.860 kg, welches aufgrund der verbauten Messtechnik schon deutlich über dem eigentlichen Fahrzeugleergewicht liegt, um 300 kg aufgelastet. Anschließend wurden entlang der eingangs beschriebenen Versuchsstrecke an den jeweiligen Bremspunkten sowohl mit Sommer- als auch mit Winterreifen Bremsungen durchgeführt.

Grundsätzlich zeigt sich für beide Reifenkonfigurationen, dass es beim Reibwertpotential kaum Unterschiede zwischen den Beladungszuständen gibt. Für Sommerreifen liegt die maximale Fahrzeugverzögerung des beladenen Fahrzeugs im Mittel 0,05 unterhalb der Werte vom unbeladenen Fahrzeug. Dabei sind allerdings einzelne Ausreißer mit berücksichtigt, die vermutlich nicht die Beladung zu erklären sind, was bedeutet, dass die tatsächliche Abweichung eher geringer ist (Abbildung 75).

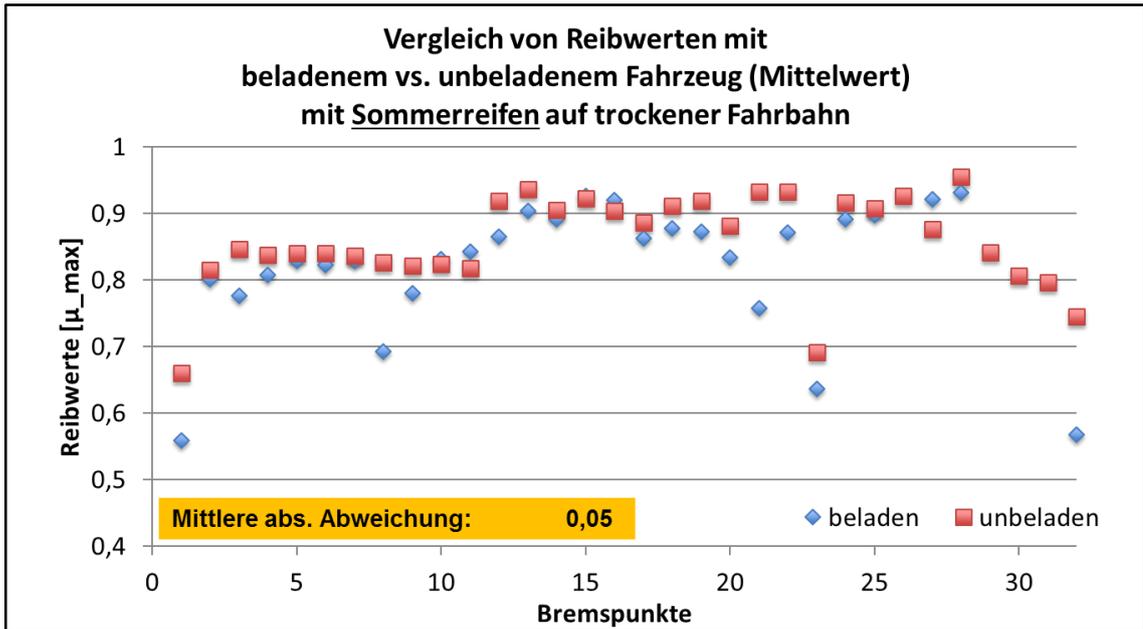


Abbildung 75: Vergleich des Reibwertpotentials für Sommerreifen für das beladene und unbeladene Messfahrzeug

Sehr ähnlich sieht der Vergleich auf Winterreifen aus (Abbildung 76). Auch hier ist die mittlere Abweichung von 0,07 als gering zu bezeichnen, einzelne Ausreißer beeinflussen auch hier das Ergebnis negativ.

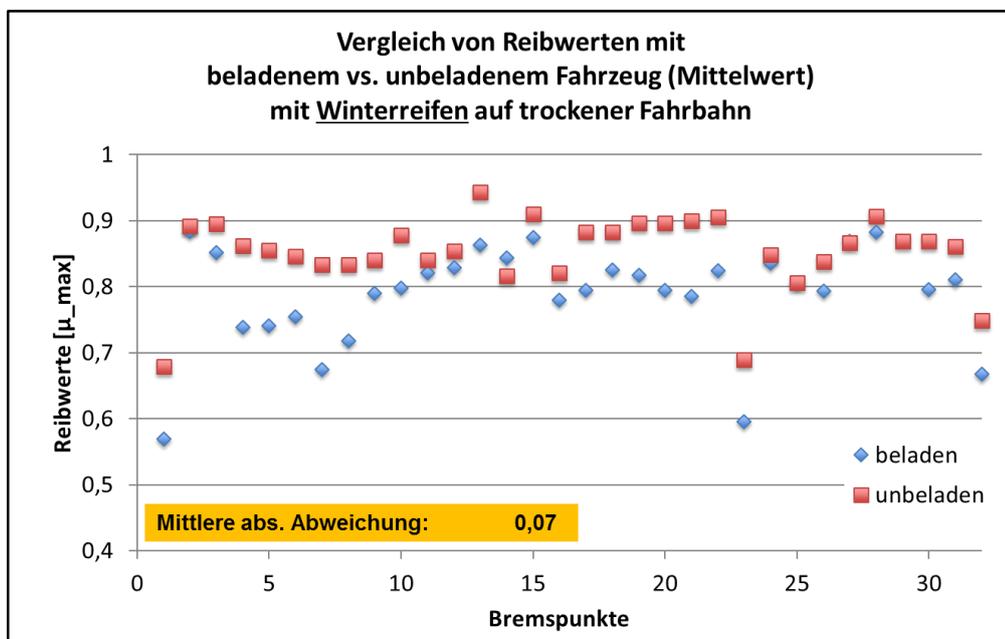


Abbildung 76: Vergleich des Reibwertpotentials für Sommerreifen für das beladene und unbeladene Messfahrzeug

Es muss insgesamt berücksichtigt werden, dass das beladene Fahrzeug mit einer Gesamtmasse von 2.160 kg etwas schwerer war, als es die zulässige Gesamtmasse des Fahrzeugs erlauben würde.

### Variation der Profiltiefe

Für die Variation der Profiltiefe wurde jeweils ein Reifensatz der Sommer- und Winterreifen abgefräst, sodass die verbleibende Profiltiefe knapp oberhalb der gesetzlichen Mindesttiefe von 1,6 mm lag. Mit diesen Reifen wurde auf den 32 Bremspunkten der Messstrecke gebremst. Diese Versuche wurden aus Sicherheitsgründen ausschließlich unter trockenen Bedingungen durchgeführt. Bremsungen mit wenig Profil bei Nässe werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

In Abbildung 77 ist der Vergleich zwischen den normal profilierten und den abgeschälten Sommerreifen an den 32 Bremspunkten dargestellt. Die Punktwolken sind dabei jeweils alle Bremsungen unter trockenen Bedingungen am entsprechenden Bremspunkt. Der rote Punkt stellt die Bremsung mit den abgeschälten Reifen dar. In allen Fällen lag der maximale Reibwert dabei innerhalb der Streuung der Normalreifen, dabei allerdings eher im unteren Bereich. Auch wenn aufgrund der geringen Versuchsanzahl insbesondere mit geschälten Reifen keine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann, so lässt sich dennoch für trockene Bedingungen sagen, dass eine Reduktion des Reifenprofils keine nennenswerte Einschränkung des Reibwertpotentials nach sich zieht.

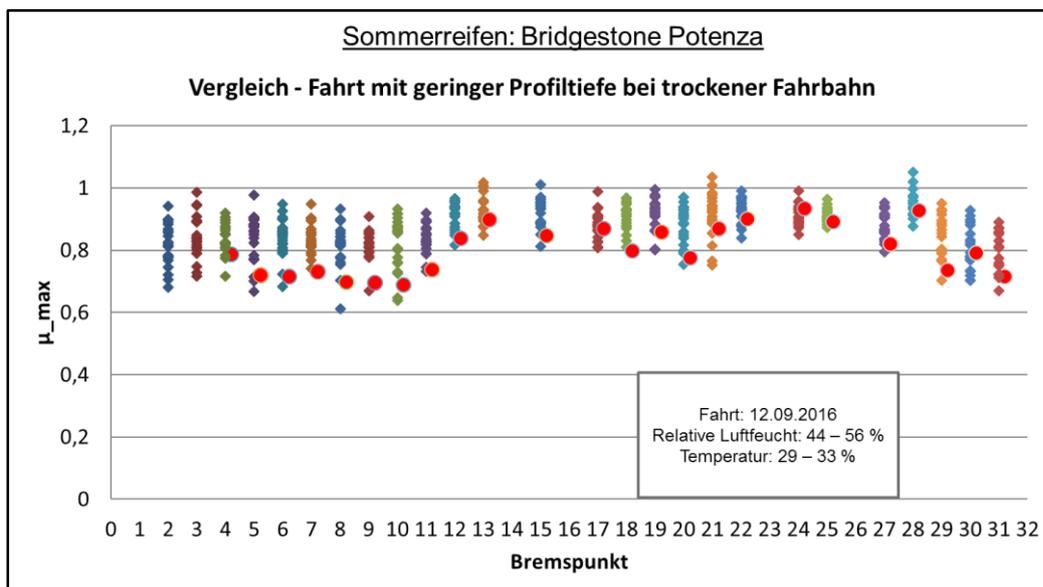


Abbildung 77: Vergleich des Reibwertpotentials für normalprofilerte und abgeschälte Sommerreifen

Der gleiche Vergleich für Winterreifen ergibt ein sehr ähnliches Bild (Abbildung 78). Auch hier liegt das Reibwertpotential der abgeschälten Reifen (roter Punkt) stets innerhalb der Streuungen der normalen Reifen.

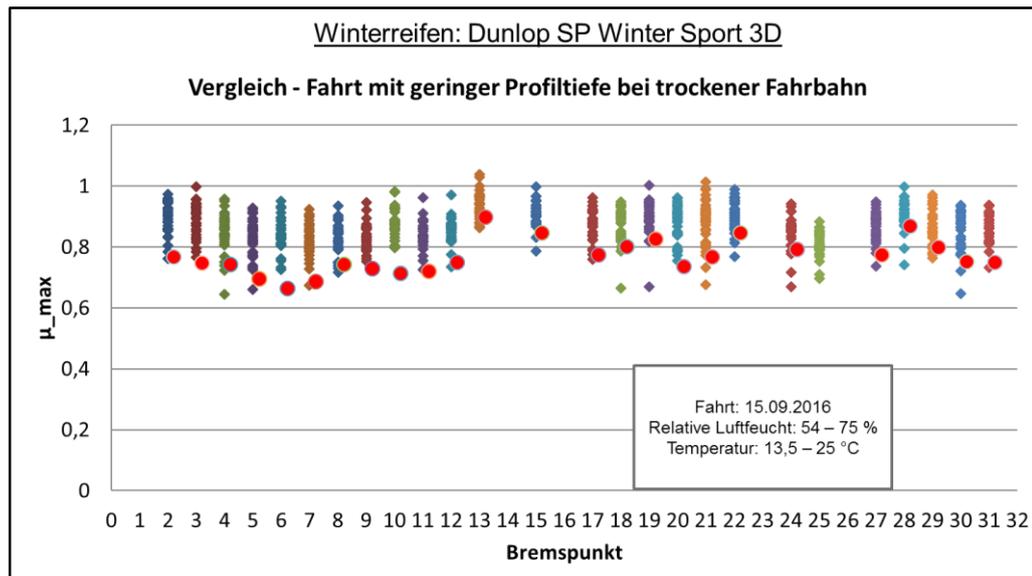


Abbildung 78: Vergleich des Reibwertpotentials für normalprofilerte und abgeschälte Sommerreifen

### Variation der Wasserfilmdicke

Aufgrund der Tatsache, dass es während der Versuchsfahrten während der Projektlaufzeit nur eine einzige Bremsung gegeben hat, bei der der Fahrer den Zwischenschichtzustand als „stehendes Wasser“ identifiziert hat, wurden zusätzliche Messfahrten auf einem Testgelände durchgeführt, bei dem die Versuchsfläche künstlich bewässert werden konnte. Diese Versuche eignen sich zwar nicht, um den Algorithmus für das Schätzverfahren zu verbessern, da die den Reibwert bestimmende Zwischenschicht nicht durch reale Wetterbedingungen entstanden ist, sondern künstlich erzeugt wurde. Dennoch liefern diese Versuche wichtige Erkenntnisse über das Reibwertpotential bei Zwischenschichtzuständen mit sehr viel Wasser auf der Fahrbahnoberfläche.

Im Gegensatz zur ursprünglichen Versuchsplanung konnte die Höhe der Wasserschicht auf der Fahrbahnoberfläche nicht reproduzierbar variiert werden. Aufgrund der Fahrbahnneigung und der Bewässerungstechnik war es nur möglich möglichst viel Wasser auf die Fahrbahn zu bringen und so wenigstens vergleichbare Bedingungen zu schaffen. Für die Bremstests standen als Oberfläche Asphalt und Beton zur Verfügung. Zu Vergleichszwecken konnten neben dem eigentlichen Testfeld, auf dem nur unter nassen Bedingungen gebremst werden darf, unter trockenen Bedingungen auf identischem Asphalt gebremst werden. Die Bremsungen wurden mit Sommer- und Winterreifen durchgeführt.

In Abbildung 79 sind die Bremsversuche für profilierte (blau) und geschälte (rot) Sommerreifen aus unterschiedlichen Ausgangsgeschwindigkeiten dargestellt. Vergleichend dazu ist das Reibwertpotential für trockene Bedingungen dargestellt. Dabei ist zunächst bemerkenswert, dass sich

im mittleren Geschwindigkeitsbereich das Reibwertpotential unter trockenen und nassen Bedingungen in ähnlichen Bereichen bewegt, während im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ein klarer Unterschied zu erkennen ist. Für die normal profilierten Reifen gilt, dass eine Geschwindigkeitsabhängigkeit nicht zu erkennen ist. Dabei sei aber einschränkend erwähnt, dass die Bremsungen bei diesen Versuchen aus maximal 90 km/h durchgeführt wurden, da für höhere Geschwindigkeiten nicht genügend Platz zur Verfügung stand. Für die geschälten Reifen zeigt sich, dass diese im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ähnliche Ergebnisse wie die profilierten Reifen bringen. Mit zunehmender Ausgangsgeschwindigkeit sinkt jedoch das Reibwertpotential deutlich. Es darf angenommen werden, dass hier Aquaplaningeffekte einsetzen und der Reifen aufgrund seiner geringen Profiltiefe nicht in der Lage ist das Wasser vollständig zu verdrängen und dadurch beginnt aufzuschwimmen. Möglicherweise ließe sich dieser Effekt für höhere Geschwindigkeiten auch für die profilierten Reifen beobachten.

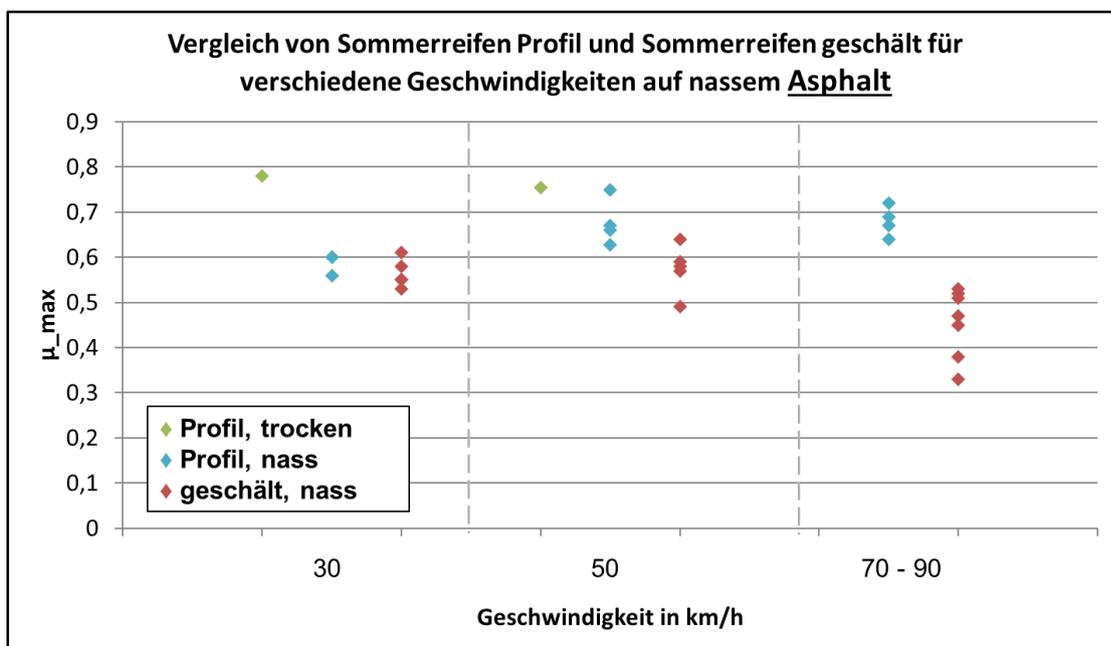


Abbildung 79: Reibwertpotential bei stehendem Wasser für Sommerreifen mit unterschiedlicher Profilstärke auf Asphalt

Für Winterreifen ergibt sich bei der sonst identischen Testkonfiguration ein ähnliches Ergebnis (Abbildung 80). Während das Reibwertpotential für die profilierten Reifen im gesamten Geschwindigkeitsbereich auf einem ähnlichen Niveau bleibt, ist auch hier bei den geschälten Reifen eine Abnahme des Reibwertpotentials mit zunehmender Geschwindigkeit zu beobachten. Mit Ergebnissen von  $\mu=0,32$  liegt es dabei im Bereich der Messungen bei Schnee und Eis (siehe Kapitel 5.2.4).

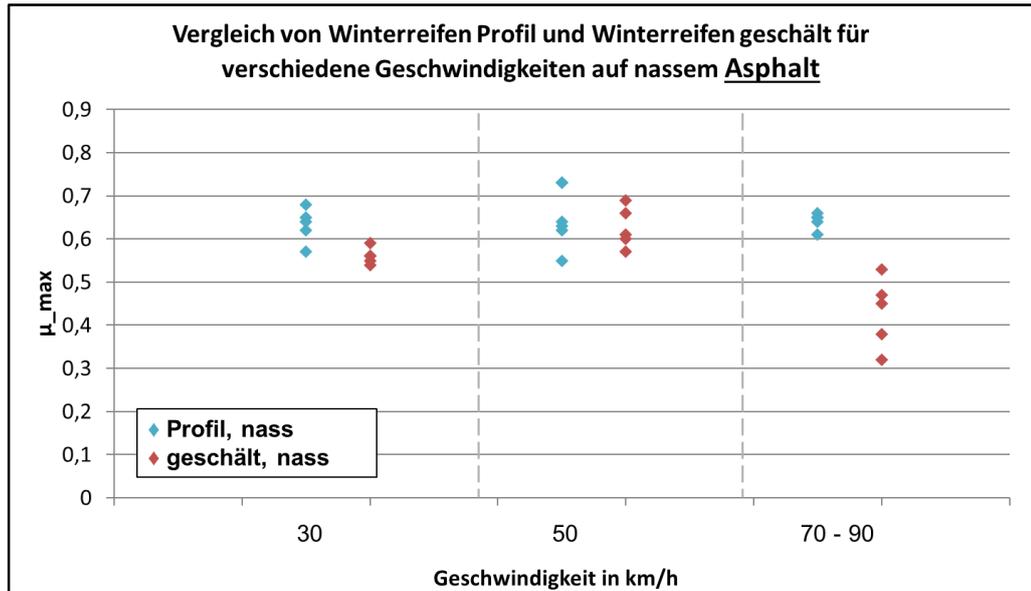


Abbildung 80: Reibwertpotential bei stehendem Wasser für Sommerreifen mit unterschiedlicher Profilstärke auf Asphalt

Für Beton ergibt sich für die gleichen Versuche ebenfalls ein ähnliches Bild. Auch hier ist sowohl für Sommer- als auch für Winterreifen zu erkennen, dass die profilierten Reifen keine Geschwindigkeitsabhängigkeit zeigen, während das Reibwertpotential für die geschälten Reifen mit steigender Geschwindigkeit tendenziell abnimmt (Abbildung 81 und Abbildung 82). Insgesamt wurden aber auf Beton deutlich weniger Versuche vorgenommen, sodass die abgeleiteten Aussagen nur bedingt verallgemeinerbar sind.

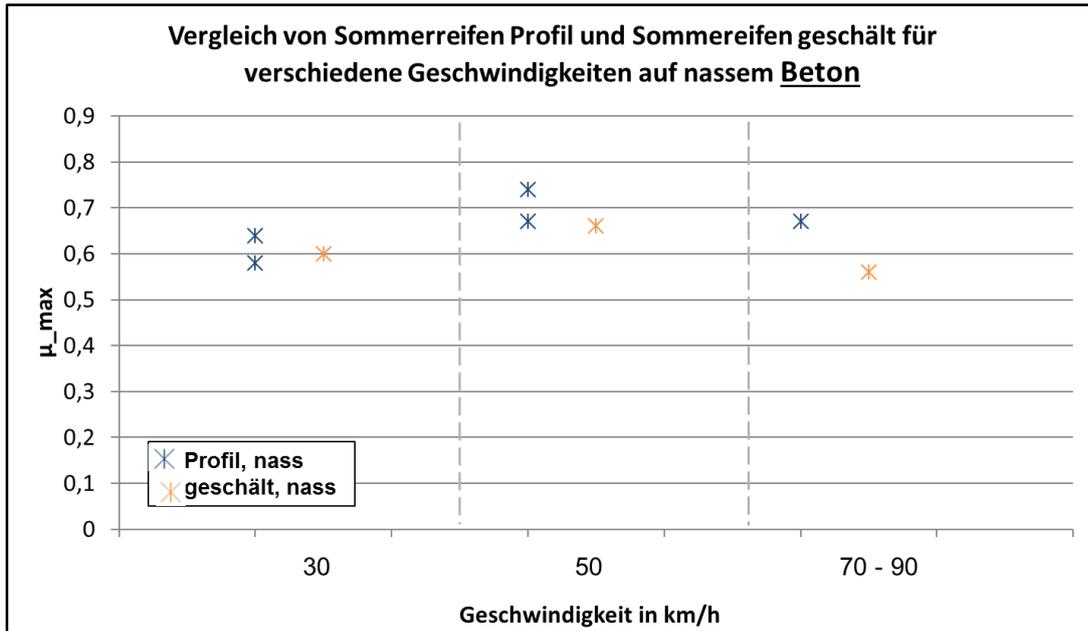


Abbildung 81: Reibwertpotential bei stehendem Wasser für Sommerreifen mit unterschiedlicher Profilstärke auf Beton

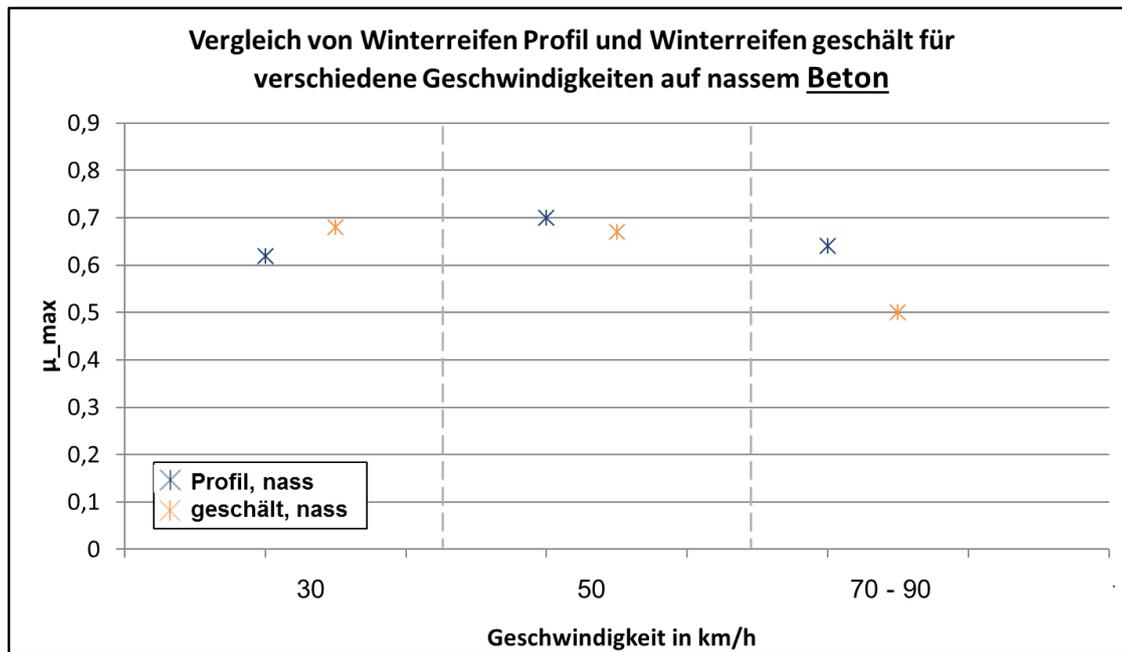


Abbildung 82: Reibwertpotential bei stehendem Wasser für Winterreifen mit unterschiedlicher Profilstärke auf Beton

### 5.2.6 Vergleich zwischen subjektiver und objektiver Reibwertbeobachtung

Im Projektverlauf wurde bei jeder Messung eine subjektive Fahrereinschätzung zum aktuell maximalen Reibwert abgegeben. Der Fahrer konnte hierbei den Reibwert in den Abstufungen hoch, mittel und niedrig einschätzen. Ein Vergleich dieser subjektiven Fahrereinschätzung mit dem realen Reibwert ist in der folgenden Abbildung 83 dargestellt. Hierfür wurden die Messdaten ebenfalls in 5 %- und 10 %-Quantile unterteilt und dargestellt, um die Ergebnisse besser zu veranschaulichen. Eine Betrachtung der aller Messdaten zeigt, dass es noch eine Reihe von Fahrereinschätzungen gab, die in die Kategorie hoch fielen, wobei der reale Reibwert aber beispielsweise unter 0,6 lag. Hierbei ist unerheblich wo die untere Grenze für einen hohen Reibwert gezogen wird. Die Situationen in denen der Fahrer die Griffigkeit als zu hoch einschätzt und damit das Risiko durch die aktuellen Wetterverhältnisse unterschätzt, können in der Realität zu kritischen Fahrsituationen und Unfällen führen. Das wird besonders bei der Kategorie „mittel“ noch einmal deutlich. Werden dort wiederum 100 % der Messwerte betrachtet, sind hierbei ebenfalls einige Einschätzungen bei einem realen Reibwert von 0,24 bis 0,4 zu finden.

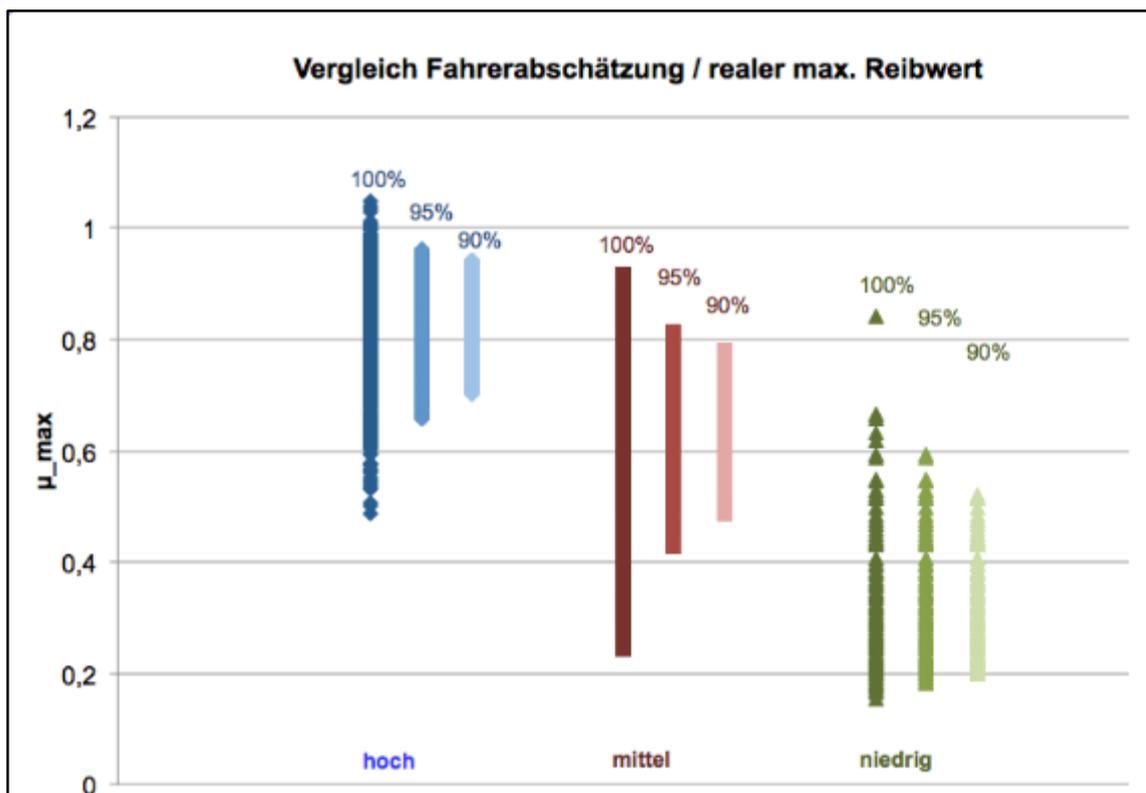


Abbildung 83: Vergleich zwischen Fahrerabschätzung und realem Reibwert

Anhand der 5 %- und 10 %-Quantile ist zu erkennen, dass ein Fahrer, der, wie bei diesen Versuchsfahrten, gut trainiert ist und über eine große Erfahrungsbasis verfügt, in rund 95 % der Fälle

mit seiner Abschätzung richtig lag. Die Fehlerquote für den durchschnittlichen Fahrer sollte daher sogar höher liegen. Für diese Fälle soll der Schätzalgorithmus in Zukunft wichtige Hinweise liefern.

### 5.3 Klassifizierung verschiedener Asphaltgüten

Asphalt gehört neben Beton weltweit zu den dominierenden Straßenbelägen. Auf der Messroute liegen rund 26 von 32 Bremspunkten auf dem Untergrund Asphalt. Die Zusammensetzung des Straßenasphalts kann hierbei deutlich voneinander abweichen und weist damit unterschiedliche Mikro- und Makrorauheitseigenschaften auf. Dadurch ergeben sich nicht nur andere maximale Reibwerte, sondern es ergibt sich eventuell auch die Möglichkeit Asphalt zu klassifizieren. Daher wurden die Asphaltbremspunkte der Messroute genauer untersucht. Die Abbildung 84 zeigt die Messergebnisse bei trockener Fahrbahn und Sommerreifen.

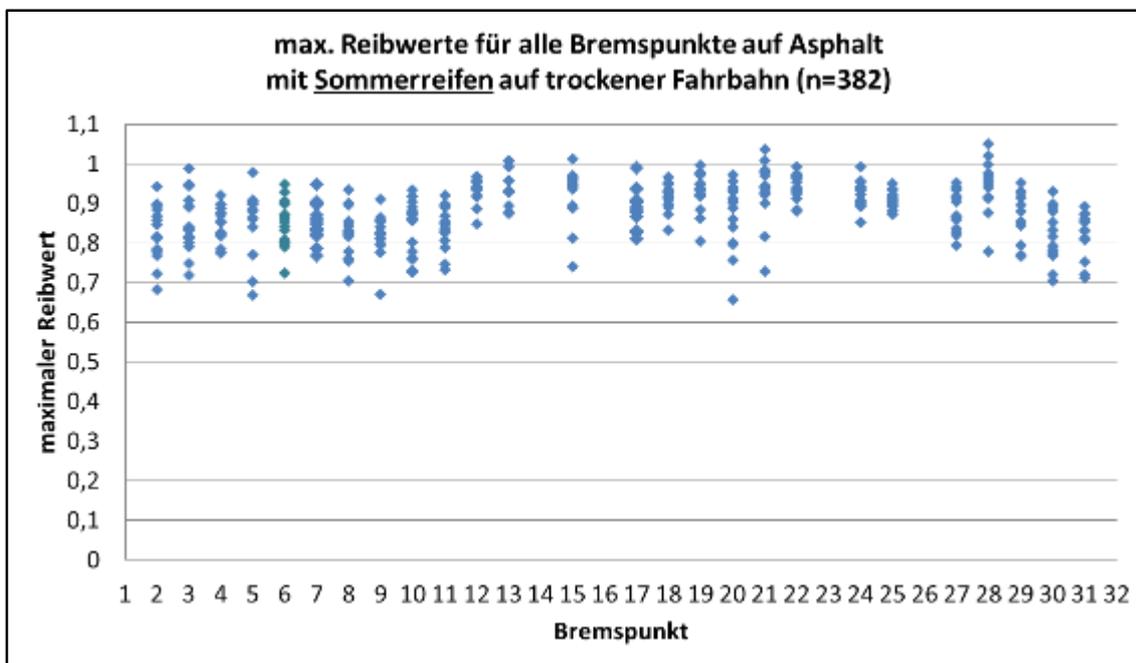


Abbildung 84: Asphaltanalyse für trockene Fahrbahn mit Sommerreifen

Die Darstellung veranschaulicht, dass eine klare Abgrenzung verschiedener Reibwertklassen für unterschiedliche Bremspunkte nicht möglich ist. Für Fahrten mit Winterreifen ergab sich eine sehr ähnliche Übersicht (Abbildung 85).

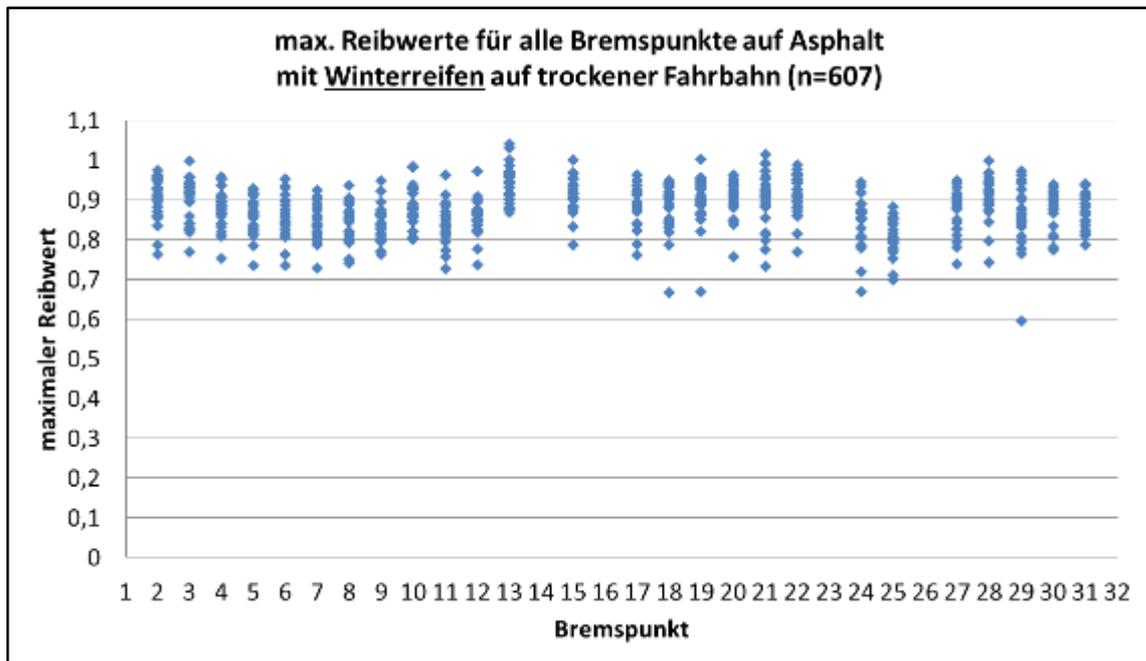


Abbildung 85: Asphaltanalyse für trockene Fahrbahn mit Winterreifen

### 5.3.1 Vergleich zweier Messfahrten unter ähnlichen Randbedingungen

Im Folgenden werden zwei Messfahrten miteinander verglichen, bei denen die Wetterbedingungen sehr ähnlich waren. Ziel dieses Vergleichs ist es eine Aussage über die Wiederholbarkeit der Versuche und damit über die Datenqualität zu erhalten. Abbildung 86 veranschaulicht die Ergebnisse zweier Messfahrten bei ähnlichen Wetterverhältnissen. Die beiden Messfahrten wurden am selben Tag, auf Winterreifen, bei einer Außentemperatur von rund 15-20 °C und einer Luftfeuchtigkeit kleiner als 60 % aufgezeichnet. In dieser Grafik sind sowohl Asphalt, als auch Betonpunkte dargestellt.

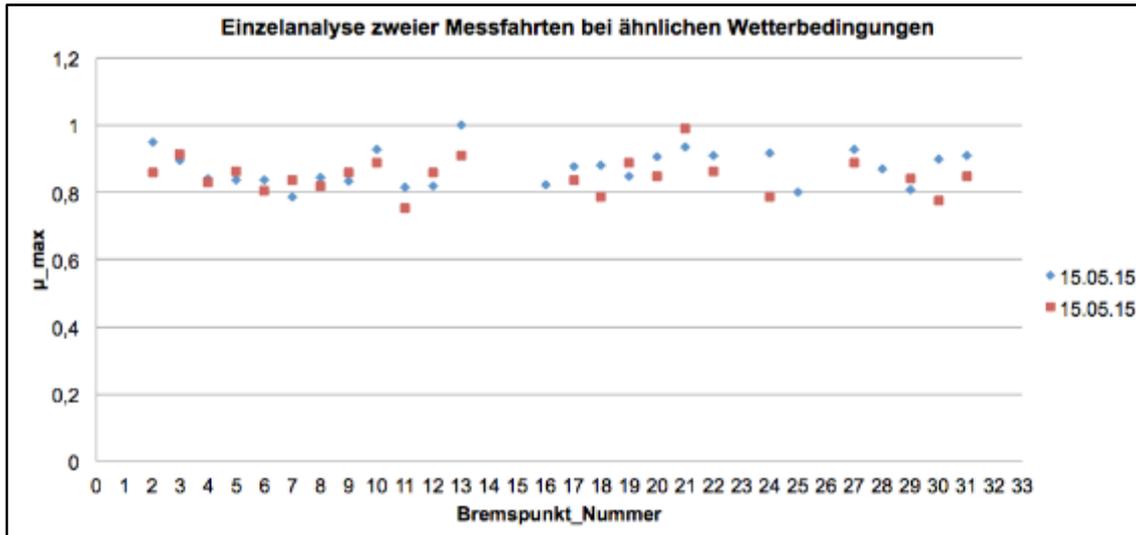
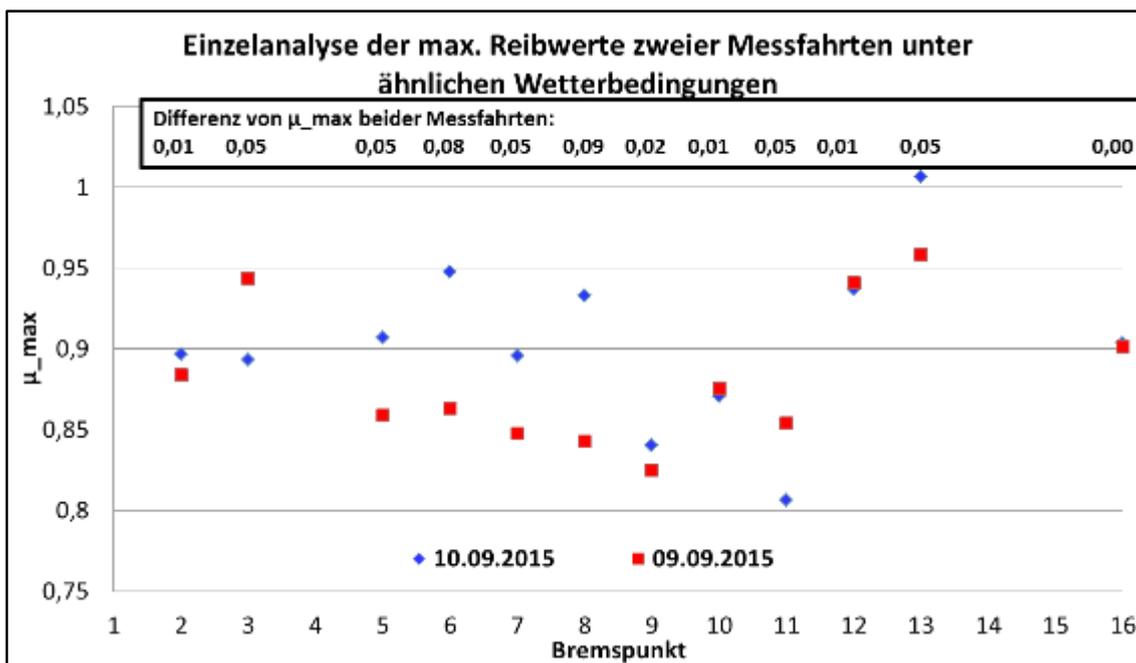


Abbildung 86: Einzelanalyse zur Streuung bei Asphalt und Beton



Die Grafik zeigt, dass die Streuung der Messwerte am Bremspunkt 13 am Größten ist. Hier liegt die Abweichung bei 0,13. Die kleinste Abweichung liegt bei Bremspunkt 3 mit einer Abweichung von 0,008. Die mittlere Streuabweichung über alle Bremspunkte lag bei diesen beiden Messfahrten bei 0,05, was einen guten Wert darstellt.

## 5.4 Untersuchung von den Reibwert beeinflussenden Kenngrößen

Zur Untersuchung der Ursachen, die die teilweise großen Streuungen bei Bremsungen auf gleicher Fahrbahnoberfläche verursachen, wurde der mögliche Einfluss zahlreicher Kenngrößen genauer untersucht. Die in Kapitel 4.5 dargestellte Datenbank bietet dafür eine geeignete Grundlage. Für zahlreiche Parameter wurde zu jeder Bremsung die jeweiligen Messgrößen erfasst.

### 5.4.1 Einfluss der Pollenbelastung auf den maximalen Reibwert



Abbildung 87: Burkard-Pollenfalle [IfM, 2016]

Pollen werden unter anderem durch den Wind stark verbreitet und stellen für die Klimaforschung eine relevante Messgröße dar. Die Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (PID) und der Deutsche Wetterdienst erstellen regelmäßig einen Pollenflug-Gefahrenindex. Der Pollenflug-Gefahrenindex stellt den Zusammenhang zwischen der in der Luft erwarteten Pollenkonzentration und der Stärke der Symptomatik bei Allergikern dar. Er beinhaltet die acht Hauptallergene: Hasel, Erle, Esche, Birke, Gräser, Roggen, Ambrosia und Beifuß; und wird in vier Belastungsintensitäten eingeteilt: keine Belastung, geringe Belastung, mittlere Belastung und hohe Belastung, welche sich in der Anzahl Pollen pro  $\text{m}^3$  Luft zwischen den Hauptallergenen unterscheiden [DWD\_P1, 2016; DWD\_P2, 2016]. Der PID betreibt ein Messnetz mit 45 Stationen in Deutschland, welche dem DWD zur Verfügung gestellt werden [DWD\_P3, 2016]. Der DWD stellt über die kostenfreie Grundversorgung eine Grafik und eine Tabelle zum Pollenflug-Gefahrenindex zur Verfügung, nicht die genauen Pollenkonzentrationen. Gemessen werden die Pollen mittels einer sogenannten Burkard-Pollenfalle (Abbildung 87). Im Inneren dieser Falle ist eine transparente Klebefolie angebracht, an welcher beispielsweise Pollen oder anderer Feinstaub haften bleibt. Zur Bestimmung der Pollenart und Pollenanzahl wird die Klebefolie unter einem Mikroskop ausgewertet und die Pollen ausgezählt. Die Auswertung erfolgt auf

Tagesbasis. Für die Auswertung von aufgenommenen Reibwerten und gemessenen Pollenkonzentrationen wurden die Daten durch die Freie Universität Berlin bereitgestellt. Dabei handelt es sich um Pollendaten in Berlin Dahlem mit Angabe der genauen Pollenkonzentration pro m<sup>3</sup> Luft als Tageswerte für die acht Hauptallergene.

Im Folgenden wird der Einfluss von Pollen auf den maximalen Reibwert untersucht.

Die generell geringen Reibwerte bei den Bremspunkten 1, 23 und 32 sind auf die Fahrbahnoberfläche, Kopfsteinpflaster, zurückzuführen.

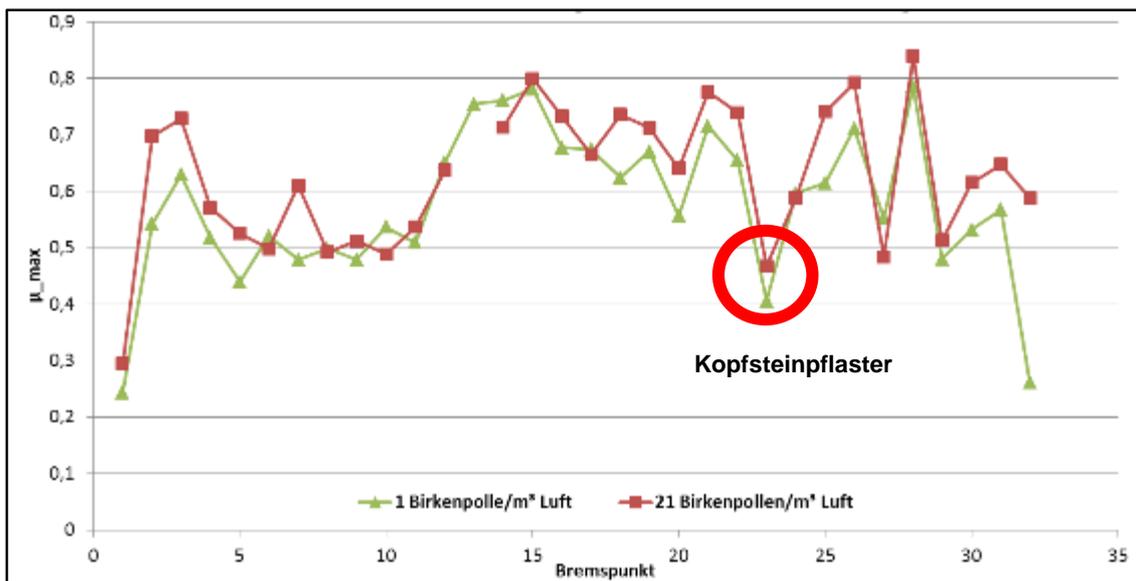


Abbildung 88: Vergleich von maximalen Reibwert und Birkenpollen pro m<sup>3</sup> Luft für zwei Messfahrten mit niedriger und mittlerer Belastung auf nasser Fahrbahn

In Abbildung 88 ist der Vergleich zweier Messfahrten unter nassen Bedingungen mit geringer Pollenbelastung und mittlerer Pollenbelastung durch Birkenpollen (nach dem Pollenflug-Gefahrenindex) dargestellt. Der Reibwert beider Messfahrten unterscheidet sich nur geringfügig. Es kann auf keine Abhängigkeit geschlossen werden. Es kann vermutet werden, dass die nasse Fahrbahn einen Einfluss auf die Wirkung der Pollen hat, beispielsweise durch Wegspülen der Birkenpollen von der Fahrbahn.

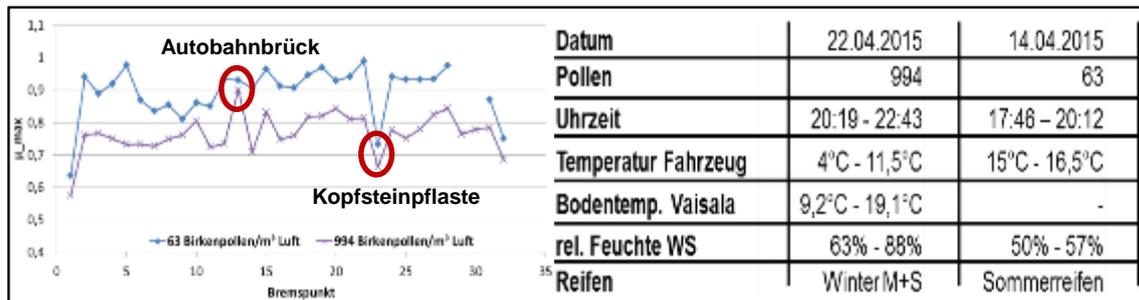


Abbildung 89: Vergleich von maximalen Reibwert und Birkenpollen pro m<sup>3</sup> Luft für zwei Messfahrten mit hoher und sehr hoher Birkenpollenbelastung auf trockener Fahrbahn

Beim Vergleich zweier Messfahrten unter trockenen Bedingungen mit hoher Pollenbelastung und sehr hoher Pollenbelastung durch Birkenpollen fällt auf, dass die Messfahrt bei hoher Pollenbelastung durchgängig höhere Reibwerte aufweist, als bei sehr hoher Pollenbelastung (vgl. Abbildung 89). Die Annahme, dass mit steigender Pollenkonzentration der maximale Reibwert abnimmt könnte hiermit belegt werden. Bremspunkt 13 weist bei hoher und sehr hoher Pollenbelastung einen hohen Reibwert auf. Da dieser Bremspunkt auf einer Autobahnbrücke liegt, kann vermutet werden, dass es dort zu einer starken Verwehung der Pollen kommt.

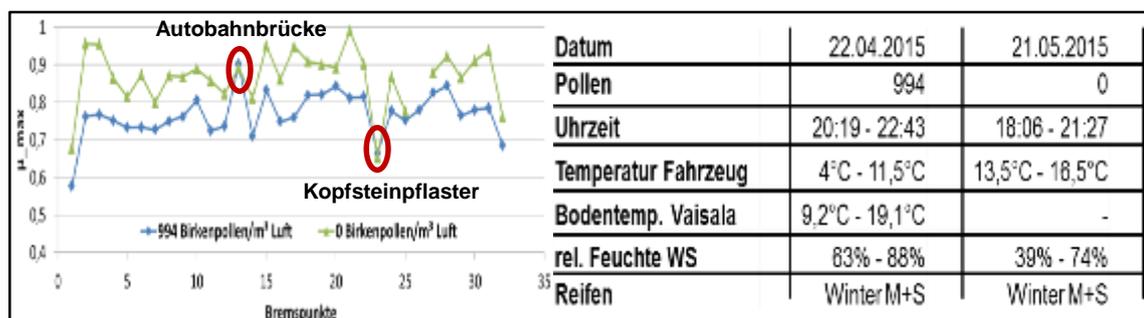


Abbildung 90: Vergleich zweier klimatisch ähnlicher Messfahrten mit unterschiedlichem Birkenpollengehalt in der Luft auf trockener Fahrbahn

Abbildung 90 zeigt den Vergleich zweier Messfahrten unter trockenen Bedingungen mit keiner Pollenbelastung und sehr hoher Pollenbelastung durch Birkenpollen. Die Messfahrt bei keiner Pollenbelastung weist durchgängig höhere Reibwerte auf, als bei sehr hoher Pollenbelastung. Ausgenommen sind Bremspunkt 13, bei welchen es sich um eine Autobahnbrücke handelt und starke Verwehung vermutet werden können, so dass trotz sehr hoher Pollenbelastung gute Reibwerte erzielt werden und Bremspunkt 23, bei welchen es sich um eine Bremsung auf Kopfsteinpflaster handelt wodurch unter hoher Pollenbelastungen und keiner Pollenbelastung ein geringer Reibwert auftritt.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass mit steigender Pollenkonzentration der maximale Reibwert abnimmt.

### 5.4.2 Einfluss der Feinstaubbelastung auf den Reibwert

Entlang der Messstrecke gibt es zahlreiche Messstationen, die die Luftverschmutzung kontinuierlich messen. Dabei wird die Feinstaubbelastung in unterschiedliche Körnungsgrößen unterschieden. Eine Auswertung dieser Daten über den gesamten Zeitraum der Testfahrten zeigt allerdings, dass es zwischen den einzelnen Arten der Feinstaubbelastungen und dem gemessenen Reibwert keine Korrelation gibt. Diese Beobachtung gilt für alle Zwischenschichtzustände und alle Fahrbahnoberflächen (Abbildung 91).

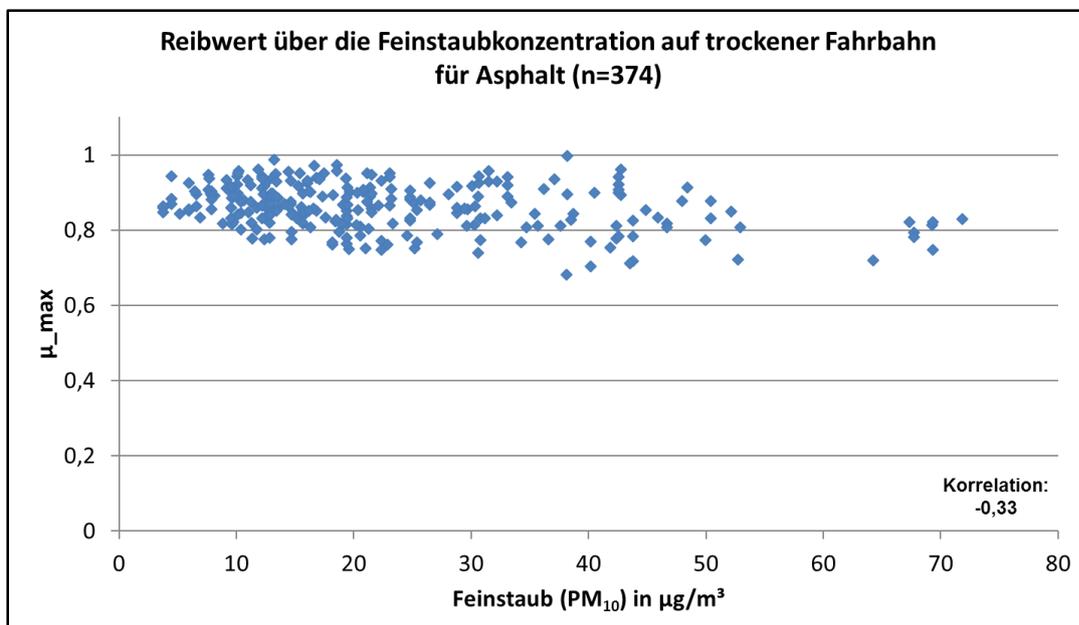


Abbildung 91: Reibwertpotential in Abhängigkeit von der Feinstaubbelastung

### 5.4.3 Einfluss des Winterdienstes auf den maximalen Reibwert

Winterdienst beschreibt die Tätigkeit die Befahrbarkeit der Straßen im Winter zu gewährleisten, beispielsweise Schnee und Eis vorzubeugen oder zu beseitigen. Es gibt deutschlandweit keinen flächendeckend einheitlichen Winterdienst, dieser unterscheidet sich von Region zu Region. Für die Auswertung der Messdaten musste auf zwei verschiedene Quellen zurückgegriffen werden.

#### Winterdienst in Berlin

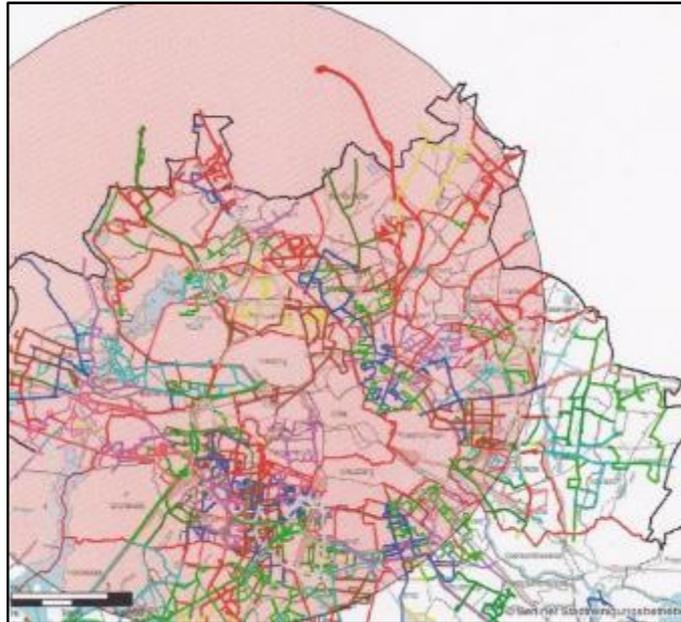


Abbildung 92: Routen mehrerer Winterdienstfahrzeuge in einem Gebiet in Berlin [BSR2, 2015]

In Berlin obliegt der Winterdienst der Berliner Stadtreinigungsbetriebe (BSR). Durch den differenzierten Winterdienst wird in Berlin nicht flächendeckend jede Straße gleich gegen Schnee und Eis behandelt, sondern es findet eine individuelle Anpassung an die Fahrbahnverhältnisse statt [BSR1, 2016]. Je nach Straße wird zwischen Einsatzstufe 1 und Einsatzstufe 2 unterschieden. Bei Einsatzstufe 1 wird gesalzen, dies sind alle wichtigen Straßen und Straßenabschnitte, sowie der gesamte Bereich des Öffentlichen Personennahverkehrs. Bei Einsatzstufe 2 wird lediglich geräumt, dies betrifft beispielsweise Wohn- und Anliegerstraßen. Im Raum Berlin wird lediglich Salz als Streugut eingesetzt, ist der Vorrat aufgebraucht, beispielsweise aufgrund eines zu schwach eingeschätzten Winters, wird Split eingesetzt. Die BSR Fahrzeuge nehmen sekundlich Parameter, wie GPS, Menge an genutztem Streugut, Solzugabe, Streubreite und Geschwindigkeit auf. Die sekundlich aufgenommenen Daten werden automatisch, mittels WLAN, an die Liegenschaften ins System der BSR übertragen. Diese Daten werden in einem speziellen Programm als Grafik angezeigt (Abbildung 92). Die Darstellung ergibt sich aus den Rohdaten einer hinterlegten Datenbank und enthält die Parameter der jeweiligen Einsätze. Diese hinterlegt punktgenaue Aussagen über Streuort, Streuart und Streumenge. Da das System nicht für Abfragen in großem Maße geeignet ist dauert die Abfrage und Aufzeichnung der relevanten Winterdienstdaten entsprechend lang. Bei den Messungen im Winter 2014/2015 handelte es sich jeweils um flächendeckende Straßenstreuungen, welche eingesetzt werden, wenn flächendeckend Schnee und Eis liegt und/oder der Wetterdienst flächendeckend Schnee und Eis angekündigt hat.

### Winterdienst in Brandenburg

„Zuständig für ca. 12.000 km Straßen und Radwege sind ca. 900 eigene bzw. befristete Winterdienstkräfte mit ca. 280 Fahrzeugen und ca. 100 Fahrzeuge einschließlich Personal über vertraglich gebundene Auftragnehmer. Von insgesamt 2.045 km Ortsdurchfahrten im Zuge von Bundes- und Landesstraßen betreut der Landesbetrieb Straßenwesen (LS) 1.768 km im Winterdienst gemäß vertraglicher Vereinbarung.“ [LS1, 2014]. Auf den Bundesautobahnen findet der Winterdienst kontinuierlich statt, auf Bundes- und Landstraßen zwischen 03:00 und 22:00 Uhr und auf anderen Straßen wird der Winterdienst zwischen 06:00 und 22:00 Uhr eingesetzt [LS2, 2014]. Im Land Brandenburg wird auf allen Bundesfern- und Landesstraßen Salz als Streugut eingesetzt. Über E-Mail-Kontakt mit LS Brandenburg konnten Informationen über den Winterdienst in unseren Messzeiträumen eingeholt werden.

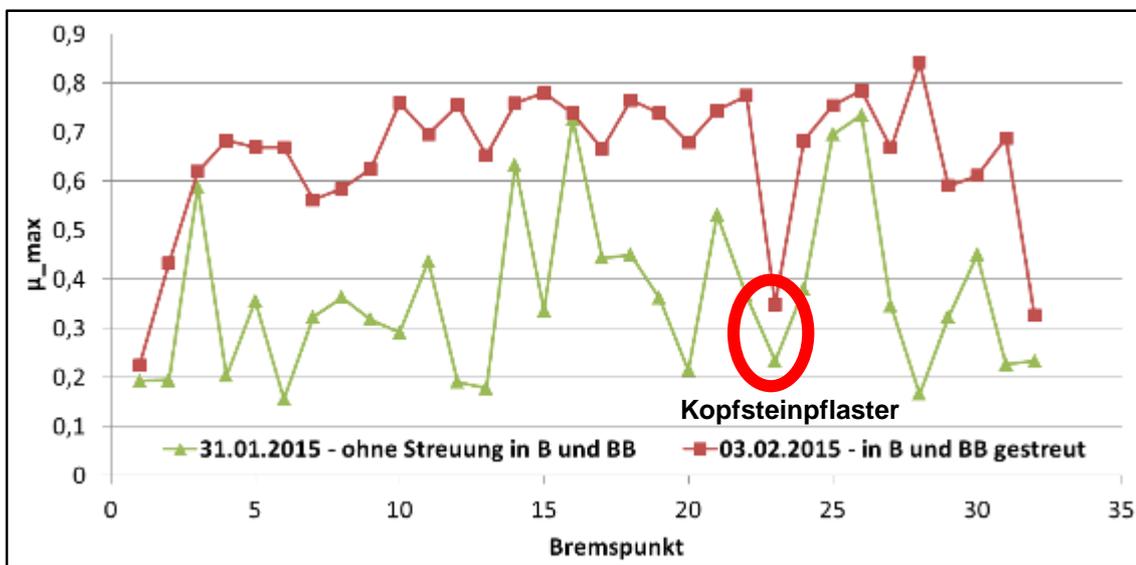


Abbildung 93: Vergleich zweier Wintermessfahrten mit und ohne Winterdiensteinsatz in Berlin und Brandenburg

Beim Vergleich zweier Messfahrten im Winter in Berlin und Brandenburg kann festgestellt werden, dass die maximalen Reibwerte bei der Messfahrt ohne Streuung sehr stark schwanken und gering sind. Die Reibwerte auf gestreuter Fahrbahn sind tendenziell durchgängig höher. Bremspunkte 1, 23 und 32 liegen auf Kopfsteinpflaster und haben generell einen geringen Reibwert (Abbildung 93).

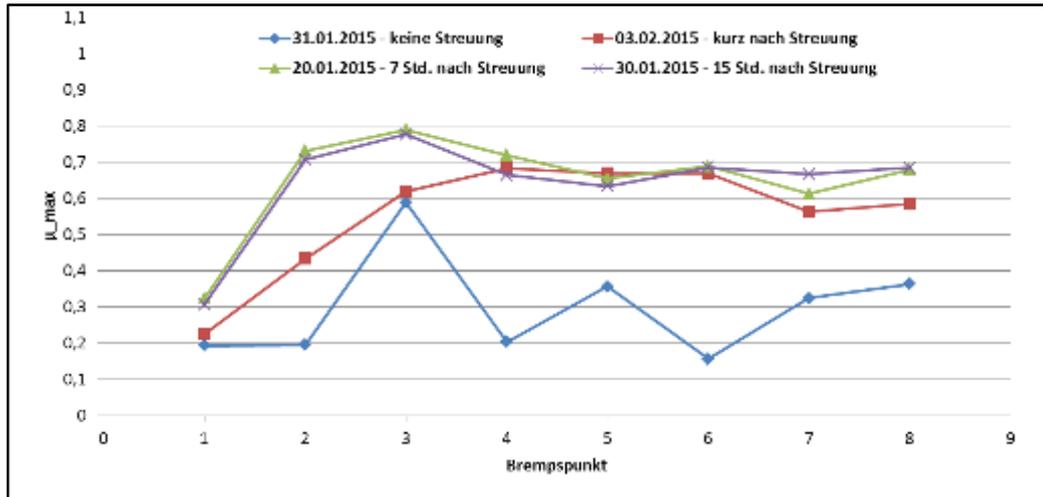


Abbildung 94: Auswirkung der Streuung in Berlin auf vier verschiedene Messfahrten – ohne, kurz nach, lange nach und sehr lange nach der letzten Streuung

Abbildung 94 zeigt vier verschiedene Messfahrten in Berlin. Die blaue Datenreihe zeigt eine Messfahrt zwischen 00:00 und 03:00 Uhr, bei welcher nicht gestreut wurde. Diese Messfahrt weist starke Schwankungen auf und generell sehr geringe Reibwerte. Es kann vermutet werden, dass Bremspunkt 3 einen besseren Reibwert aufweist, weil dieser auf einer vielbefahrenen Straße liegt. Bei der roten Datenreihe, welche eine Messfahrt kurz nach der Streuung zeigt, sind die Reibwerte generell höher, als bei der Messfahrt ohne Streuung. Der Fahrer hat zu Beginn der Messfahrt unmittelbar nach dem Winterdienstfahrzeug gemessen. Es ist zu erkennen, dass der Reibwert anfangs noch gering ist, mit zunehmender Zeit aber besser wird, je länger die Streuung des Fahrzeuges her ist. Die Messfahrten 7 und 15 Stunden nach der Streuung weisen die höchsten Reibwerte auf, unterscheiden sich aber kaum untereinander.

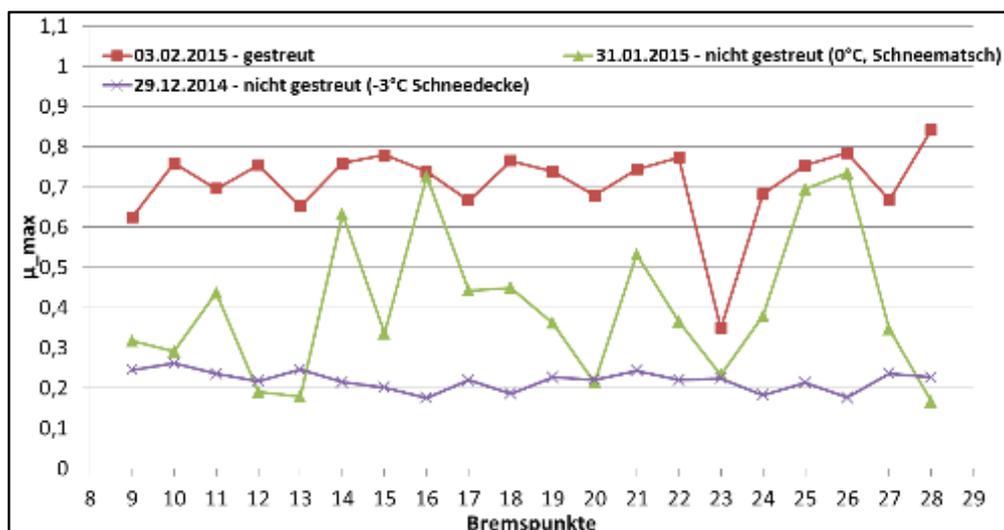


Abbildung 95: Auswirkung der Streuung in Brandenburg für drei verschiedene Messfahrten

Abbildung 95 zeigt drei verschiedene Messfahrten in Brandenburg. Es gibt auffällige Unterschiede zwischen nicht gestreut auf Schneedecke und Schneematsch. Die Reibwerte auf Schneedecke sind gleichbleibend gering, bei Schneematsch hingegen schwanken die Reibwerte sehr stark. Die höchsten gemessenen Reibwerte auf Schneematsch liegen auf Beton. Nach einer Streuung gibt es gleichbleibend hohe Reibwerte.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass Winterdienststeinsätze den Reibwert deutlich erhöhen. Auf Fahrbahnen, die gerade gestreut wurden, ist mit einem noch nicht sehr hohen Reibwert zu rechnen, dieser stellt sich jedoch schon nach kürzester Zeit ein.

#### **5.4.4 Einfluss der Umgebungstemperatur auf das Reibwertpotential**

Eine Untersuchung des Reibwertpotentials in Abhängigkeit von der Jahreszeit hat zunächst gezeigt, dass der maximale Reibwert im Sommer höher ist als im Winter. Da allerdings eine scharfe Abgrenzung der Jahreszeiten nicht ohne weiteres möglich ist und somit am Ende nur zu nicht-signifikanten Ergebnissen führte, wurde im nächsten Schritt die Abhängigkeit zur Umgebungstemperatur untersucht. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass es zwischen der Jahreszeit und der mittleren Umgebungstemperatur einen unmittelbaren Zusammenhang gibt und dass die veränderte Temperatur möglicherweise ein Parameter ist, der den Reibwert mitbestimmt.

Eine genauere Untersuchung dieses Zusammenhangs zeigt jedoch, dass auch hier nur eine äußerst geringe Korrelation besteht (Abbildung 96). Ein Anstieg des Reibwertpotentials ist mit steigender Umgebungstemperatur kaum festzustellen.

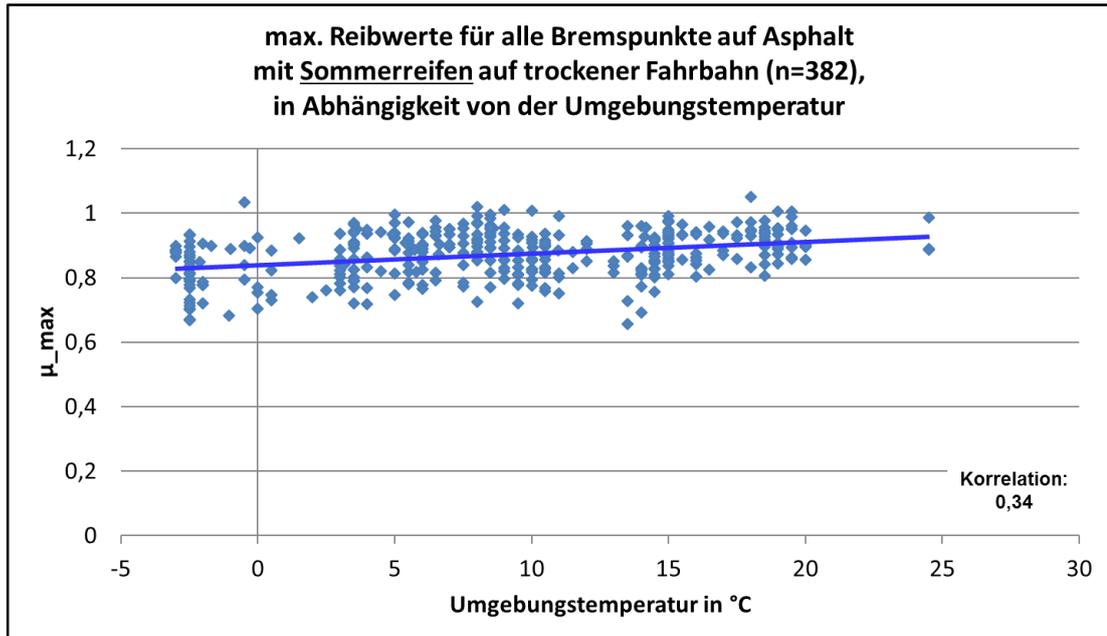


Abbildung 96: Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Reibwert

#### 5.4.5 Untersuchung weiterer möglicher Einflussgrößen auf das Reibwertpotential

Im Verlauf des Forschungsprojekts wurden zahlreiche weitere Parameter hinsichtlich ihres Einfluss' auf das Reibwertpotential untersucht. Dazu zählen der Reifenfülldruck, die Bodentemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Ortslage und die Tageszeit. Abgesehen von der Ortslage konnte für keine der genannten Größen ein Zusammenhang zum maximalen Reibwert hergestellt werden.

Bei der Auswertung der Abhängigkeit zwischen Ortslage (innerorts, außerorts) und dem maximalen Reibwert war die verlässliche Tendenz zu erkennen, dass das Reibwertpotential außerorts oberhalb vom Potential innerorts liegt. Dieses gilt für alle Reifenarten, konnte jedoch nur für die Fahrbahnoberfläche Asphalt untersucht werden. Aus dieser Erkenntnis folgt, dass die Berücksichtigung der Ortslage bei der Schätzung des Reibwertpotentials zu genaueren Ergebnissen führen kann. In Abbildung 97 ist die Verbesserung der Schätzung durch die Berücksichtigung der Ortslage dargestellt.

Grenzen ohne Ortslage	Grenzen mit Ortslage
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asphalt, Sommerreifen, trocken <u>0,62 – 1,05 (delta = ,43)</u></li> <li>• Asphalt, Winterreifen, trocken <u>0,65 – 1,03 (delta = ,38)</u></li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>innerorts</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Asphalt, Sommerreifen, trocken <u>0,62 – 0,99 (delta = ,37)</u></li> <li>• Asphalt, Winterreifen, trocken <u>0,65 – 1,00 (delta = ,35)</u></li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>außerorts</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Asphalt, Sommerreifen, trocken <u>0,75 – 1,05 (delta = ,30)</u></li> <li>• Asphalt, Winterreifen, trocken <u>0,67 – 1,03 (delta = ,36)</u></li> </ul>

Abbildung 97: Grenzen des Reibwertpotentials ohne und mit Berücksichtigung der Ortslage

## 5.5 Vergleich der Messergebnisse mit anderen Messmethoden

Zur Bewertung der Oberflächenrauheit von Fahrbahnen gibt es zahlreiche genormte und anerkannte Verfahren. Die wichtigsten davon wurden in Kapitel 3.6 vorgestellt. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden zwei dieser Verfahren an zahlreichen Bremspunkten auf der Messstrecke angewendet und mit den Messdaten aus den Versuchsfahrten verglichen.

### 5.5.1 Vergleich von SRT-Messungen mit Messungen unter Realbedingungen

An 22 Bremspunkten auf Asphaltoberflächen entlang der Teststrecke wurde der Reibwert mit Hilfe des Skid-Resistance-Tester (SRT) vermessen. Entsprechend der Normung wurden drei in unmittelbarer Nähe liegende Punkte jeweils fünfmal mit dem Pendel auf feuchter Oberfläche vermessen. Der Wertebereich der SRT-Messungen liegt zwischen 20 und 60. Ein quantitativer Vergleich der Messwerte mit denen der Versuchsfahrten ist damit nicht möglich, allerdings sollten die Versuchsdaten eine grundsätzliche Korrelation zeigen. Die Messwerte des SRT sollten dann steigen, wenn sich auch für die Realmessungen höhere Werte einstellen. Der Vergleich der Daten beider Messverfahren zeigt jedoch, dass die Korrelation sehr gering ist (s. Abbildung 98). Das gilt für alle drei Zwischenschichtzustände (trocken, feucht, nass). Die SRT-Messungen werden immer bei feuchter Oberfläche durchgeführt.

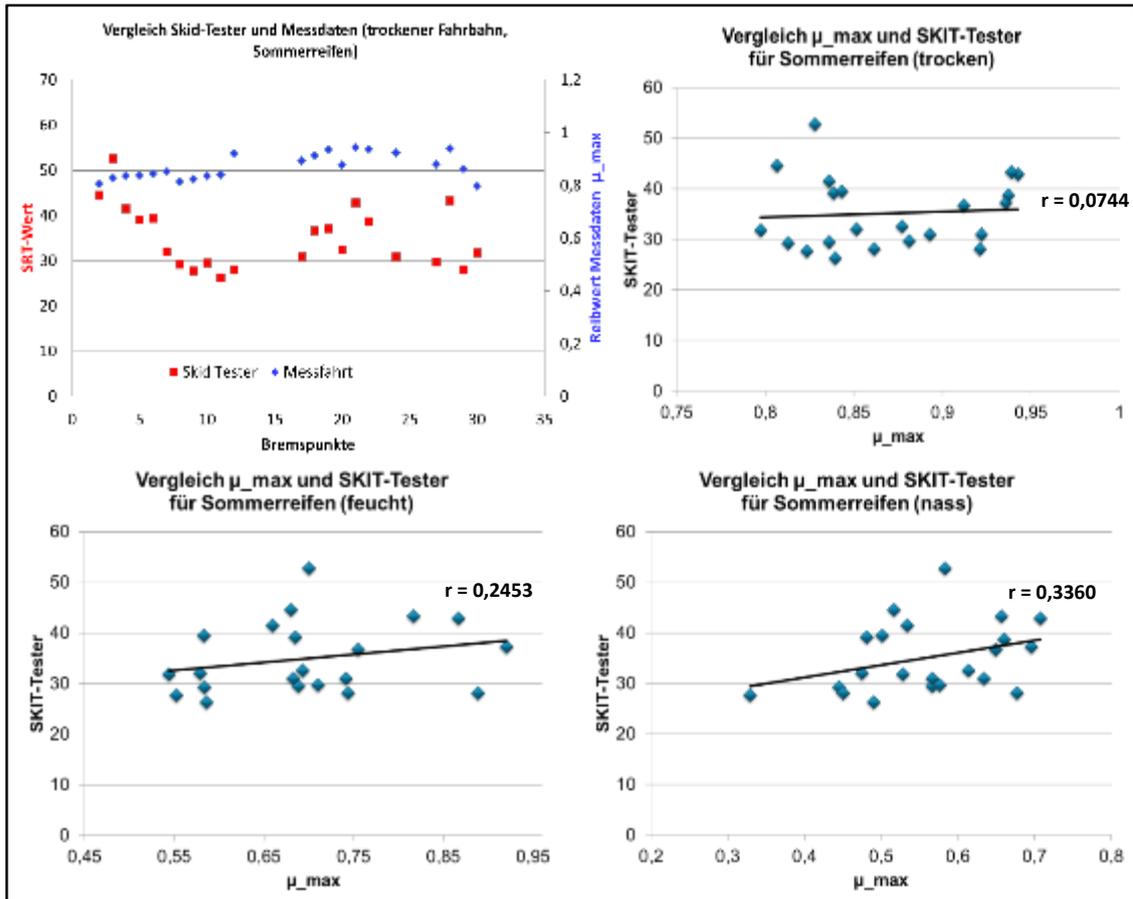


Abbildung 98: Vergleich des maximalen Reibwertes der Messwerte und des Skid-Testers auf trockener Fahrbahn, Korrelation des maximalen Reibwertes der Messwerte und des Skid-Testers auf trockener, feuchter und nasser Fahrbahn

Vor dem Hintergrund, dass das SRT-Verfahren auch zur Abnahme von neu gebauten Straßen verwendet wird, sollte dieses Verfahren hinsichtlich seiner Aussagekraft zum Reibwertpotential der Fahrbahn hinterfragt werden.

### 5.5.2 Vergleich von SKM-Messungen mit Messungen unter Realbedingungen

Das Seitenkraftmessverfahren (SKM) ist ein kontinuierliches Messverfahren, bei dem ein Messrad mit einer konstanten Normalkraft auf die Fahrbahn gepresst wird. Das Rad läuft dabei auf einer befeuchteten Fahrbahn unter einem Schräglaufwinkel von  $20^\circ$ , wodurch eine Seitenreibungskraft  $F_y$  erzeugt wird. Diese wird messtechnisch erfasst (Abbildung 99). Durch den Zusammenhang  $\mu_y = F_y / F_z$  ergibt sich daraus der SKM-Beiwert  $\mu_y$ . Dieser Wert wird als Kenngröße zur Beschreibung des Reibwertpotentials von Straßenoberflächen genutzt, umso den Zustand der Straßenoberflächen zu

beschreiben. SKM-Messungen werden im regelmäßigen Rhythmus, beauftragt durch die BAST, auf allen Autobahnen und wichtigen Bundesstraßen durchgeführt.

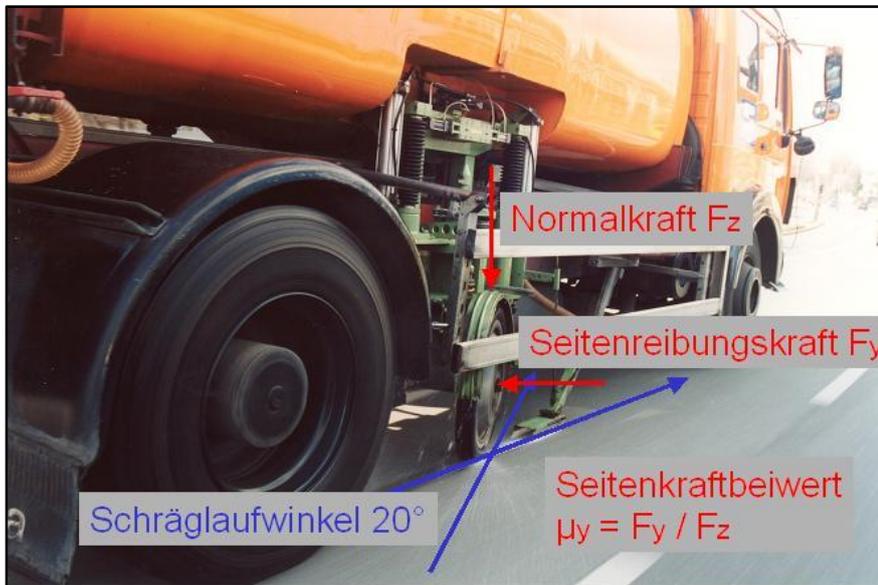


Abbildung 99: Prinzip des Seitenkraftmessverfahrens

Zur Vergleich des SKM mit den in diesem Projekt gewonnenen Ergebnissen wurden Vergleichsmessungen zwischen beiden Messverfahren durchgeführt. Dazu wurde die Teststrecke mit einem SKM-Messfahrzeug abgefahren und an in den Bereichen der definierten Bremspunkte wurden Messungen durchgeführt. Unmittelbar davor hat das Messfahrzeug ebenfalls auf den einzelnen Bremspunkten Testbremsungen in bekannter Weise durchgeführt, sodass eine unmittelbare Vergleichbarkeit beider Verfahren möglich ist.

Der Wertebereich für das SKM lag bei den hier durchgeführten Messungen für  $\mu_y$  liegt zwischen 0,2 und 0,9 sodass sich ein quantitativer Vergleich beider Verfahren ohne weiteres nicht möglich. Dennoch sollte aber ein qualitativer Vergleich beider Messfahren eine hohe Korrelation zeigen.

In Abbildung 100 ist der Vergleich zwischen den Reibwertpotentialmessungen mit dem Messfahrzeug ( $\mu_{\text{max}}$ , grün) und den Messergebnissen des SKM ( $\mu_{\text{SKM}}$ , blau) dargestellt. Die Korrelation zwischen beiden Messkurven liegt bei 0,606 und damit deutlich oberhalb von den Ergebnissen, die sich beim Vergleich mit dem SRT gezeigt haben. Dennoch stellt sich auch hier die Frage, inwiefern das SKM geeignet ist, um das tatsächliche Reibwertpotential zwischen Reifen und Fahrbahn in hinreichender Güte zu messen.

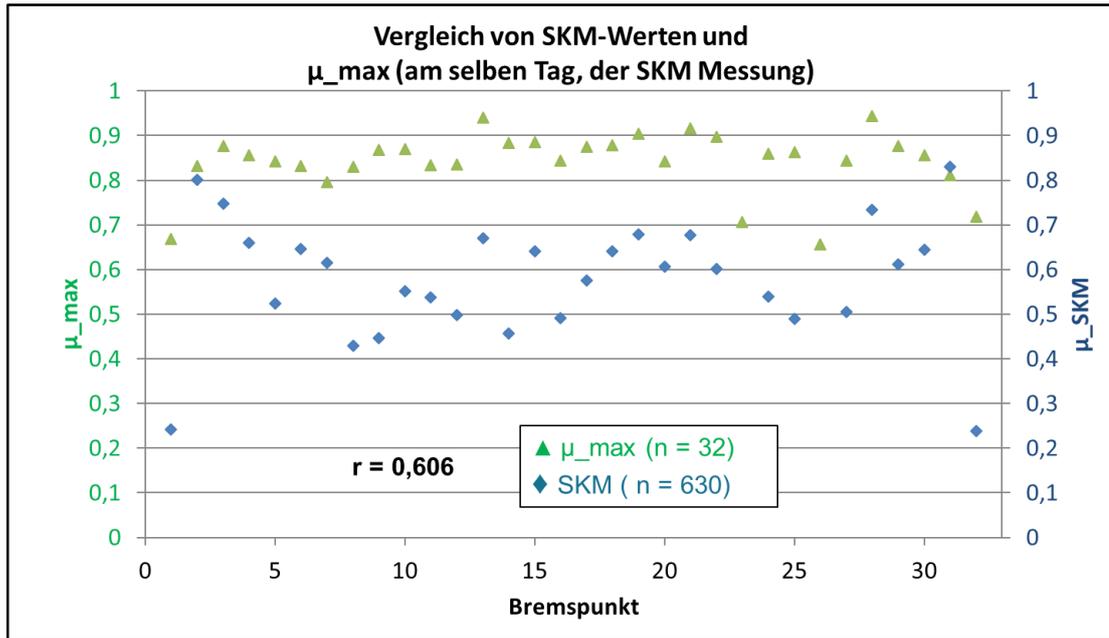


Abbildung 100: Vergleich von Bremstests und SKM

Zur weiteren Vergleich beider Testverfahren wurden, basierend auf den in den Versuchsfahrten insgesamt erhobenen Messdaten, weitere Vergleiche für unterschiedliche Reifenarten und Zwischenschichtzustände durchgeführt. So wurden für jeden Bremspunkt jeweils die gemessenen Reibwertpotentiale für die untersuchte Kombination aus Reifen und Oberflächenzustand gemittelt und mit den Ergebnissen des SKM dargestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt:

<u>Sommerreifen</u>			<u>Winterreifen</u>	
Zwischenschicht	Korrelation		Zwischenschicht	Korrelation
Trocken	r=0,456		Trocken	r=0,814
Feucht	r=0,422		Feucht	r=0,661
Nass	r=0,586		Nass	r=0,731

Tabelle 1: Vergleich Testbremsungen und SKM für verschiedene Reifen- und Zwischenschichtkombinationen

Es zeigt sich, dass die Korrelationen zwischen beiden Messverfahren für Winterreifen deutlich besser sind, als für Sommerreifen. Insbesondere für trockene Bedingungen ist bei r=0,814 eine recht gute Vergleichbarkeit beider Verfahren gegeben. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse ist bei [Mueller, 2016] zu finden.

Im Vergleich zum SRT zeigt das Seitenkraftmessverfahren eher eine Korrelation zu den Ergebnissen der Bremsversuche. Insgesamt muss aber auch hier zur Kenntnis genommen werden, dass die Aussagekraft des SKM bezüglich des Reibpotentials der Straßenoberfläche begrenzt ist.

## 6 Detaillierte Simulation des Wetters

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit der Evaluierung des WRF/Urban Modells für die atmosphärische Stadtmodellierung Berlins. Für das Projekt „Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen“ der TU Berlin wurden zeitlich und räumlich hochaufgelöste Wetterparameter im Raum Berlin benötigt, die durch statische Wetterstationen allein nicht gegeben sind. In einer Vorsondierung wurden mehrere verfügbare Quellen für die Lufttemperatur in nächster Nähe mit der gemessenen Lufttemperatur an den Bremspunkten verglichen (s. Abbildung 102). Das für den deutschen Raum oft verwendete Modell COSMO-DE (*DWD\_simuliert*), womit einzig eine großflächige Abdeckung erreichbar wäre, führte zu unbefriedigenden Ergebnissen. Dieses Modell, mit einer Auflösung von 2,8 km, überschätzte in vielen Fällen die 2 m Temperatur für den Raum Berlin [Szénási, 2013].

Daher wurde in diesem Fall auf das amerikanische Modell WRF mit dem Stadtparametrisierungsansatz zurückgegriffen. Die simulierten Daten werden für die Evaluierung mit Realdaten von Messstationen und Satellitendaten verglichen, um eine Abschätzung der Modellgüte zu erhalten.

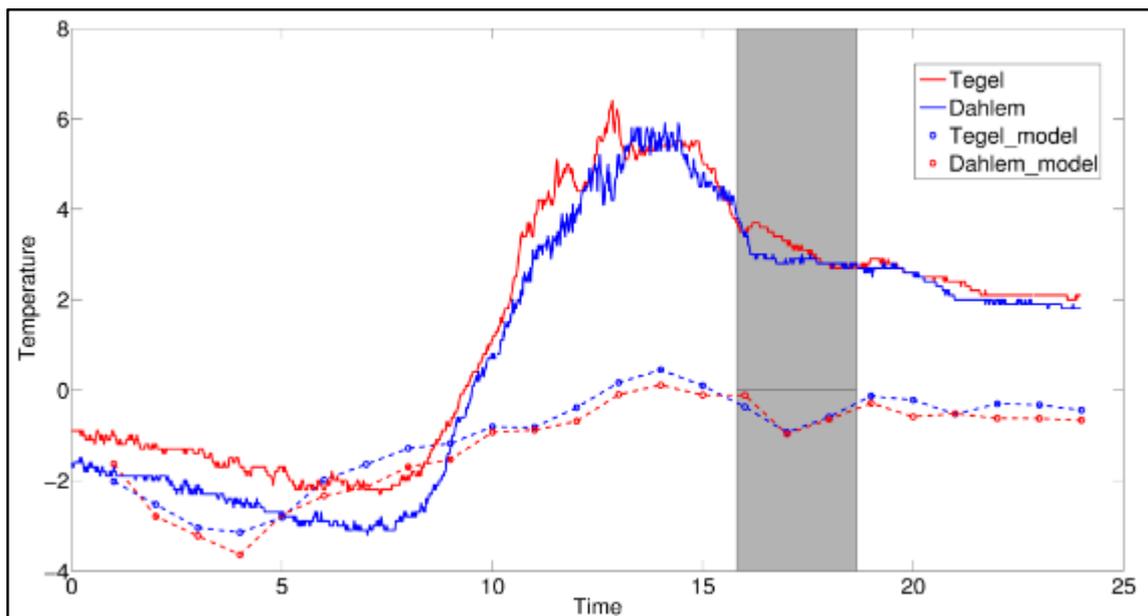


Abbildung 101: Modellergebnis (COSMO-DE) gegen Messstation, grau: Messfahrt (vgl. Abbildung 102), 17.02.2015

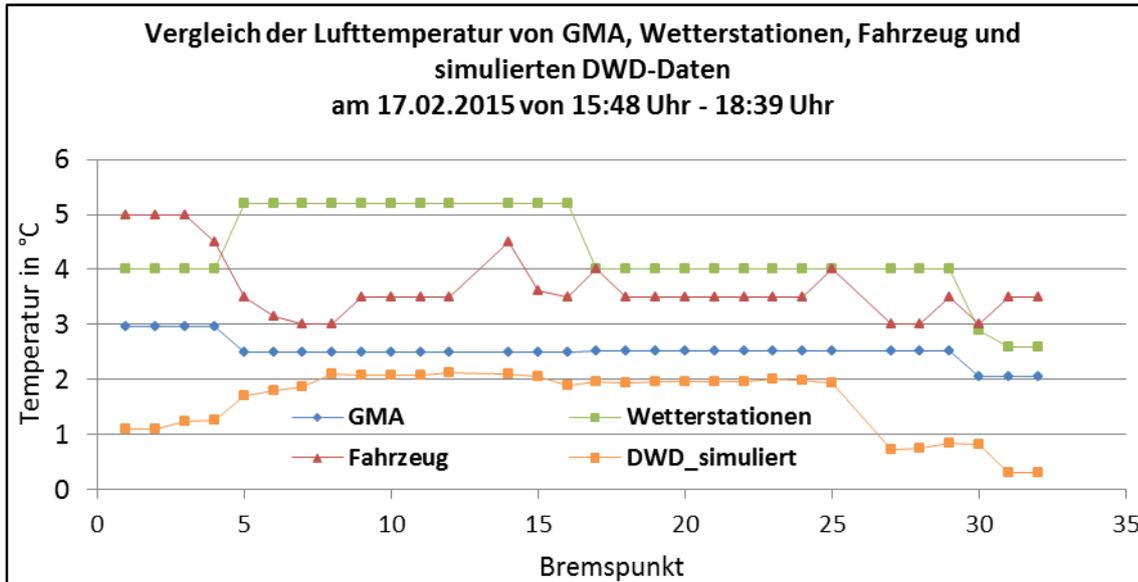


Abbildung 102: Vergleich der Messfahrt mit dem Modellergebnis (COSMO-DE) und der Stationen

### 6.1 Urban Heat Island Effekt

Eine Großstadt besitzt gegenüber dem Umland in Bodennähe ein verändertes Temperaturbild. Diesem Umstand muss in Wettermodellen mit zum Teil aufwändigen Parametrisierungsansätzen Rechnung getragen werden.

Der Urban Heat Island (UHI) Effekt beschreibt das Verhalten des Mesoklimas einer Stadt, welches im Vergleich zum Umland oftmals wärmere Temperaturen zeigt. Angetrieben wird dieser Effekt hauptsächlich durch anthropogene Veränderungen des Landschaftsbildes.

Städte weisen im Vergleich zu ihrem Umland eine meist niedrigere Albedo<sup>2</sup> und eine höhere Wärmekapazität auf. Asphalt und Betonflächen absorbieren die solare Einstrahlung gut und geben ihre gespeicherte Energie kontinuierlich als langwellige Strahlung an die Umgebung ab. Zusätzlich wirken Häuserschluchten wie Strahlungsfallen, einfallendes Licht kann an Hauswänden mehrmals reflektiert und dennoch irgendwann absorbiert werden, anstatt direkt zurückgestreut zu werden.

Faktoren, die einen kühlenden Einfluss besitzen, sind in der Stadt schwächer ausgeprägt. Verdunstungskühlung ist durch den schnellen Wasserabfluss von versiegelten Flächen und die damit verbundene geringe Wasserkapazität des Bodens wenig gegeben. Durch vermindertes

<sup>2</sup> Albedo (lateinisch: weiß): Rückstrahlvermögen einer nicht selbstleuchtenden Oberfläche von 0 bis 1 bzw. 0 % bis 100 %. Je heller ein Körper ist und damit stärker reflektiert, desto höher ist sein Albedo.

Pflanzenwachstum in der Stadt kann auch deren Evaporation<sup>3</sup> nur gering zu einer Abkühlung beitragen. Wind, der für einen Gradientabbau der Temperatur von Stadt und Umland sorgt, wird durch die höhere Rauheitslänge der Stadt vermindert und teilweise umgelenkt.

## 6.2 WRF Urban

Das Weather Research and Forecast Model (WRF) ist ein nichthydrostatisches, kompressibles Modell mit einem eulerschen Koordinatensystem. Entwickelt wurde es als Partnerprojekt von NCAR (National Center for Atmospheric Research), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, hier NCEP und FSL), AFWA (Air Force Weather Agency), NRL (Naval Research Laboratory), durch die University of Oklahoma und der FAA (Federal Aviation Administration). Im Jahre 2000 gestartet, ist das Modell nun bei der aktuellen Modellversion V3.6.1 angelangt.

Es ermöglicht neben one-way und two-way Nesting auch ein two-way moving Nesting, mit dessen Hilfe sich bewegende Sturmzentren analysieren lassen [WRF, 2015]. Durch unterschiedliche städtische Parametrisierungsschemata ist das WRF neben seiner Hauptfunktion als numerisches Wettervorhersagemodell auch mesoskalig als Regionalmodell einsetzbar (WRF\_Urban). Hierfür existieren bis zum heutigen Stand 4 Parametrisierungsansätze mit steigender Komplexität.

- (1) Das Bulk-Scheme,
- (2) das SLUCM-Scheme
- (3) das BEP-Scheme
- (4) BEP+BEM-Scheme

Die genannten Ansätze werden im Folgenden vorgestellt [Chen et al., 2011].

Die Bulk-Parametrisierung stellt die einfachste und von der Rechenzeit gesehen ressourcenschonendste Methode einer Stadtparametrisierung dar. Die Stadtfläche wird durch eine erhöhte Rauheitslänge, eine bestimmte Albedo, Wärmekapazität und –leitfähigkeit sowie eine verringerte Evaporation ausgezeichnet. Bereits diese einfachen Annahmen führen zu einer besseren Betrachtung von Einflüssen der Stadt auf die Atmosphäre wie beispielsweise auf die Mischungsschichthöhe [Liu et al., 2006].

Das single layer urban canopy modell (SLUCM) fügt diesem Ansatz ein in einer horizontalen Schicht aufgelöstes 2d Stadtmodell hinzu. Straßenschluchten werden als unendlich tief angenommen, um

---

<sup>3</sup> Evaporation: Verdunstung von Wasser von einer vegetationsfreien Erdoberfläche oder einer freien Wasseroberfläche.

Effekte wie Strahlungsfallen durch Häuserwände zu berücksichtigen. Windabschattungen durch die Stadt werden in einem exponentiellen Windprofil beschrieben. Wärmeflüsse finden auf definierten Boden-, Wand- und Dachuntergründen statt und werden anschließend an das WRF-Modell weitergegeben. Trotz des zweidimensionalen Stadtmodells beeinflusst die Ausrichtung der Stadt den täglichen Strahlungshaushalt des UCM im dreidimensionalen Sinne, da außerdem die Orientierung der Sonne zur Straßenschlucht berechnet wird. Die Stadt wird hierbei in 3 Kategorien (kommerziell, stark und dünn bebautes Gebiet) unterteilt, die jeweils über verschiedene Parameter wie mittlere Gebäudehöhe, Gebäude- und Straßenbreite, anthropogene Wärmeerzeugung oder den meridonalen und zonalen Straßenanteil definiert sind [Chen et al., 2011].

Die building effect parametrization, kurz BEP, ist die im WRF-Modell am fortschrittlichsten entwickelte Stadtparametrisierung. Sie erweitert das SLUCM dahingehend, dass die Stadt nun in mehrere horizontale Modellebenen reicht. Entwickelt wurde es von [Martilli et al., 2002]. Auch hier wird kein vollständiges 3d Stadtmodell als Input verwendet, sondern die drei, aus dem SLUCM bekannten, Klassen erweitert. Die Gebäudehöhe je Klasse ist nun beispielsweise als Häufigkeitsverteilung gegeben, der mittlere Glas- bzw. Fensteranteil je Stadtklasse und die Rauheitslänge über Grund und Dach werden definiert. Damit können Effekte wie Strahlungsfallen in Gebäudeschluchten und Abschattungseffekte besser kalkuliert werden. Der Windwiderstand durch die Gebäude und die Temperatur- und Feuchteverteilung, die durch die Dreidimensionalität der Stadt im Modell Berücksichtigung finden, können direkt berechnet werden, ebenso die turbulente kinetische Energie. Mithilfe dieser Parametrisierung lassen sich Stadteffekte wie der nächtliche Wärmeinseleffekt modellieren. Wie schon für das SLUCM ist auch die BEP im WRF-Modell nur für eine sehr hohe Auflösung sinnvoll nutzbar. Sie erhöht den Rechenaufwand enorm und ist daher eher für Forschungszwecke geeignet [Chen et al., 2011].

Mit der BEP kann zusätzlich ein einfaches Gebäudeenergieemodell (BEM, building energie model) gekoppelt werden. Anders als in der BEP, wo eine konstante Temperaturverteilung innerhalb eines Gebäudes angenommen wird, werden in dem BEM sowohl anthropogene Wärmeerzeugung und –verbrauch, als auch Strahlungstransporte durch Fenster und Wände innerhalb des Gebäudes simuliert. Ein großer Wert wird hier auf die Wärmeumverteilung durch Klimaanlage gelegt. Abhängig von der Stadtkategorie und den damit verbundenen Personenaufkommen und Komfortanforderungen im Gebäude wird so der Wärmeumsatz der Gebäude im WRF-Modell besser berücksichtigt [Chen et al., 2011; Salamanca et al., 2010].

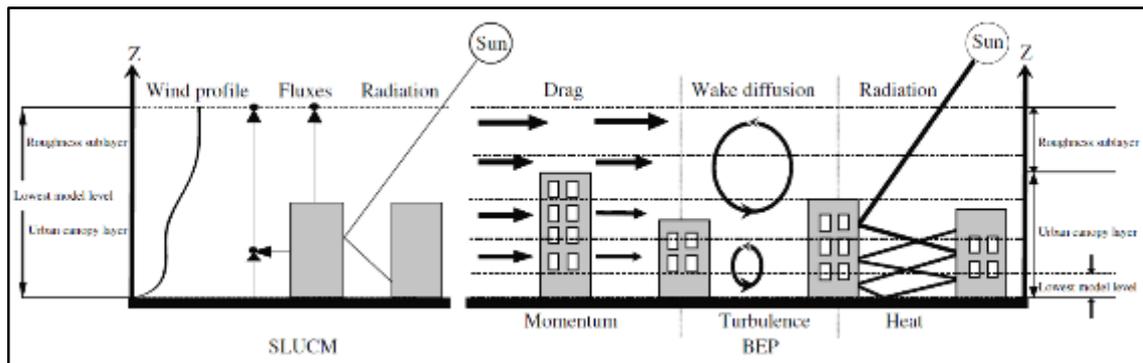


Abbildung 103: Parametrisierungsschema SLUCM und BEP [Chen et al., 2011]

### 6.3 Stand der Forschung

Das WRF Modell existiert seit dem Jahre 2000 und ist, wie dessen Name schon sagt, sowohl für die operationelle Vorhersage als auch für Forschungszwecke unter idealen atmosphärischen Bedingungen geeignet. Der Anwendungsbereich reicht dabei von globalen Analysen bis hin zu Simulationen im untersten mesoskaligen Bereich. Somit ist es nicht verwunderlich, dass zu diesem Modell eine geradezu unüberschaubare Vielzahl an Studien existiert, die sich jeweils mit ausgewählten Modulen, Anwendungsgebieten und Modellparametern beschäftigen und diese validieren und verifizieren. Durch die kontinuierliche Entwicklung des Modells sind solche Studien daher auch in Zukunft von großer Bedeutung.

Im Folgenden wird der Nutzen der URBAN Parametrisierungen für die Stadt Berlin untersucht. Zu den Stadtparametrisierungsansätzen zählen der SLUCM, BEP und BEP+BEM Ansatz [Chen et al., 2011], die in dieser Reihenfolge entwickelt und eingeführt wurden, weshalb für ersteren auch die meisten Studien zu finden sind.

Einige der wichtigsten Studien für die SLUCM Parametrisierung werden im Folgenden aufgeführt:

- [Yang et al., 2012] untersuchten 10 Sommer in Nanjing mit einer Auflösung von 1 km und fanden eine gute Übereinstimmung von Temperatur, Feuchte und Niederschlagsfrequenz, wobei der totale Niederschlagsgehalt unterschätzt wird.
- [Wang et al., 2011] analysierten die Modellunsicherheit von Oberflächenparametern. Demzufolge ist das Modell hoch sensitiv gegenüber Veränderungen der Stadtgeometrie, für Variationen der Innentemperatur und der Emissivität jedoch eher unsensitiv.
- [Loridan et al., 2010] führten ebenfalls einen Sensitivitätstest für Stadtparameter durch. Das Modell zeigte hierbei eine höhere Empfindlichkeit für Dachparameter als für solche, die die Straßenbeschaffenheit charakterisieren.

- [Lee et al., 2011] modellierten den August 2006 für die Metropole Houston mit modifizierten Landnutzungsdaten und konnten eine Fehlerreduktion von 1-2 °C und einen verbesserten Wärmefluss feststellen.

Für den BEP+BEM Ansatz lassen sich folgende Studien finden:

- [Chen et al., 2014] untersuchten den UHI für Hangzhou (China) unter Verwendung von Satellitendaten für die Wohnverteilung und den Vegetationsindex
- [Salamanca et al., 2011] verglichen die unterschiedlichen Stadtparametrisierungen (auch Bulk und SLUCM) für 2 Tage im August 2000 in Houston (Texas) bei einer Auflösung von 1 km<sup>2</sup> anhand von Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit.
- [Liao et al., 2014] stellten ebenfalls alle 4 Parametrisierungsansätze für das Yangtze River Delta gegenüber und fanden die beste Übereinstimmung der 2 m Temperatur für BEP+BEM sowie die beste Windmodellierung für BEP und BEP+BEM wobei alle Parametrisierungen die 10 m Windgeschwindigkeit unterschätzen haben.

Nahezu alle Studien belegen eine Verbesserung der Modellgüte durch die Verwendung der komplexeren Multilayerparametrisierungen BEP und BEM, wobei meist darauf hingewiesen wird, dass hierbei stets der Rechenaufwand von komplexeren Parametrisierungen gegenüber dem daraus resultierenden Nutzen abzuwägen sei.

WRF wurde in Kooperation vieler amerikanischer Institutionen entwickelt und damit auch für diese Lokation ausgiebig getestet. Zudem gewinnt es durch seine Funktionalität und Umfang auch für nichtamerikanische Studien immer mehr an Bedeutung. Hierbei stellt sich in erster Linie die Frage, wie gut es sich in der jeweiligen Klimazone und den entsprechenden geografischen Gegebenheiten verhält. Auch für die Region die hier von Interesse ist, nämlich Europa und im speziellen Deutschland, existieren einige Studien. Im Hinblick auf hochaufgelöste Modellstudien unter Verwendung von URBAN Parametrisierungen wird diese Zahl jedoch weitaus geringer, für die Region Berlin sind keinerlei Quellen bekannt. Im Nachfolgenden werden einige der wichtigsten europäischen Studien aufgelistet:

- [Fallmann et al., 2013] erarbeiteten eine Szenarienmodellierung für Stuttgart (Deutschland) und variierten die Dachalbedo und die Größe der Parkanlagen (SLUCM und BEP, 1 km Auflösung).
- [Papangelis et al., 2012] nutzten das Modell ebenfalls um den Abkühlungseffekt von unterschiedlichen Parkgrößen in Athen (Griechenland) zu simulieren (SLUCM, 0,5 km Auflösung).
- [Ryu et al., 2011] erforschten die SLUCM Parametrisierung für Marseille (Frankreich) und Basel (Schweiz) und fanden unter den Oberflächenparametern die Dachalbedo als sensitivsten Parameter.
- [Daniels et al., 2015] führten einen Sensitivitätstest für die Niederlande durch (SLUCM).
- [San Jose et al., 2013] untersuchten das Modell für gleich mehrere europäische Städte (London, Athen, Gliwice, Helsinki und Florenz) bei einer Auflösung von 200m (SLUCM).

- Ohne Urban Parametrisierung, jedoch mit für Europa interessanten Simulationen sind zudem in [Garcia-Diez et al., 2013] für Europa und in [Warrach-Sagi et al., 2013] für Deutschland zu finden.

## 6.4 Modellaufbau

Hochaufgelöste Klimamodelle lassen sich aufgrund der benötigten Rechenzeit nicht sinnvoll als Globalmodell betreiben. Ziel des Regionalmodells ist es, gegebene, grobe meteorologische Parameter (aus einem Globalmodell) auf eine feine Auflösung herunter zu brechen und innerhalb eines definierten Bereichs (der Domain) mithilfe dieser Informationen eigene mesoskalige Simulationen zu erstellen. Da die Differenz der Auflösung von einem Global- zu einem Regionalmodell in der Regel sehr groß ist, werden zur Vermeidung von Randwertproblemen meist Zwischenschritte in der Form von Regionalmodellen mit Auflösungen im Bereich zwischen dem Globalmodell und der gewünschten Auflösung betrieben (nesting). Hier wurden 3 Domains genestet (two way-nesting), die Verteilung dieser ist in der unteren Abbildung 104 zu erkennen. Das Verhältnis der Auflösung zur jeweiligen Elternzelle beträgt 1:5:3. In der Horizontalen wird mit 27 druckbasierten ETA-Level in einer nichtlinearen Verteilung bis in eine Höhe von etwa 300 hPa gearbeitet.

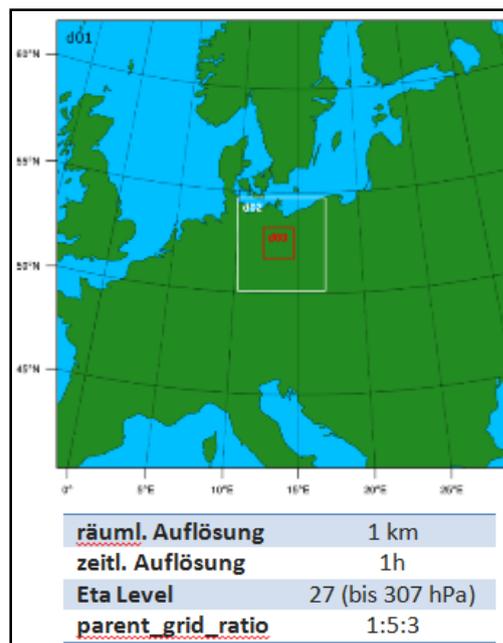


Abbildung 104: Verteilung der Modelldomain

## 6.5 Modellinput

Das Modell benötigt für einen erfolgreichen Lauf sowohl statische Informationen über den geografischen und morphologischen Aufbau der Modelldomain sowie zeitlich veränderliche Informationen über den Zustand der Atmosphäre am Rand der Domain. Die verwendeten Datensätze und die aus diesen abgeleiteten Informationen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

### 6.5.1 Corine Land Cover

Jede Gitterzelle des Modells simuliert ihren eigenen Strahlungshaushalt. Hierfür braucht es unter anderem die Angabe des jeweiligen Untergrundes. Die CORINE Land Cover Daten enthalten aus Satelliten abgeleitete Landnutzungsklassen für Europa. Der Name CORINE steht für *Coordination of Information on the Environment* und ist seit 1985 ein Programm der Europäischen Union mit dem Ziel, eine einheitliche Landnutzungskartierung für Europa zu erstellen. Bisher wurden Landnutzungskarten für die Referenzzeiträume 1990, 2000 und 2006 (Abgekürzt: CLC1990, CLC2000 und CLC2006) erstellt. Hiermit konnten nun Landnutzungsänderungen für die jeweiligen Zeiträume objektiv erfasst werden. Der Kartenmaßstab beträgt 1:100.000 und es wird zwischen 44 Landnutzungsklassen unterschieden, wovon 37 für Deutschland relevant sind. Die ursprünglichen Daten stammen von den Landsat-Satelliten, für den neuesten Zeitraum 2006 wurden außerdem Daten der SPOT-4 und -5 Satelliten sowie des IRS-P6 genutzt. Die Daten selbst sind frei verfügbar und werden durch die EEA in 250 m und 100 m Auflösung bereitgestellt ("CORINE"). Die 44 Landnutzungsklassen wurden in 33 für das Modell verständliche Klassen umgewandelt und implementiert. Jeweils die Klasse, die am dominantesten in einer Gitterzelle auftritt, ist repräsentativ für die gesamte Gitterzelle.

### 6.5.2 Mosaikansatz

Mit der WRF Version 3.6 wurde eine neue Option für die Landnutzungsdaten eingeführt, der Mosaikansatz. Hiermit wird nun nicht mehr der Ansatz mit der dominantesten Landnutzungsklasse für die jeweilige Gitterzelle verfolgt, sondern es werden mehrere Klassen berücksichtigt. Dafür gibt der Nutzer eine Anzahl an zu berücksichtigten Klassen ein. Diese Zahl liegt zwischen 1 und der maximalen Anzahl vorkommender Klassen in einer Gitterzelle. Die dominantesten Klassen dieser Gitterzelle werden jeweils unabhängig von den anderen innerhalb des NOAH LSM gerechnet. Alle Ergebnisse gehen schließlich, anteilig an das Vorkommen der jeweiligen Landnutzungsklasse in der Zelle, als gewichtetes Mittel in die Gitterzelle ein (siehe Abbildung 105) und werden vom LSM an das WRF Modell übergeben. Es wird also der Abdeckungsgrad der Klassen innerhalb der Zelle beachtet, nicht jedoch deren genaue Lokation. Auch die Stadtparametrisierung geht nur zu ihrem relevanten Anteil in die Berechnung mit ein (Li et al., 2013).

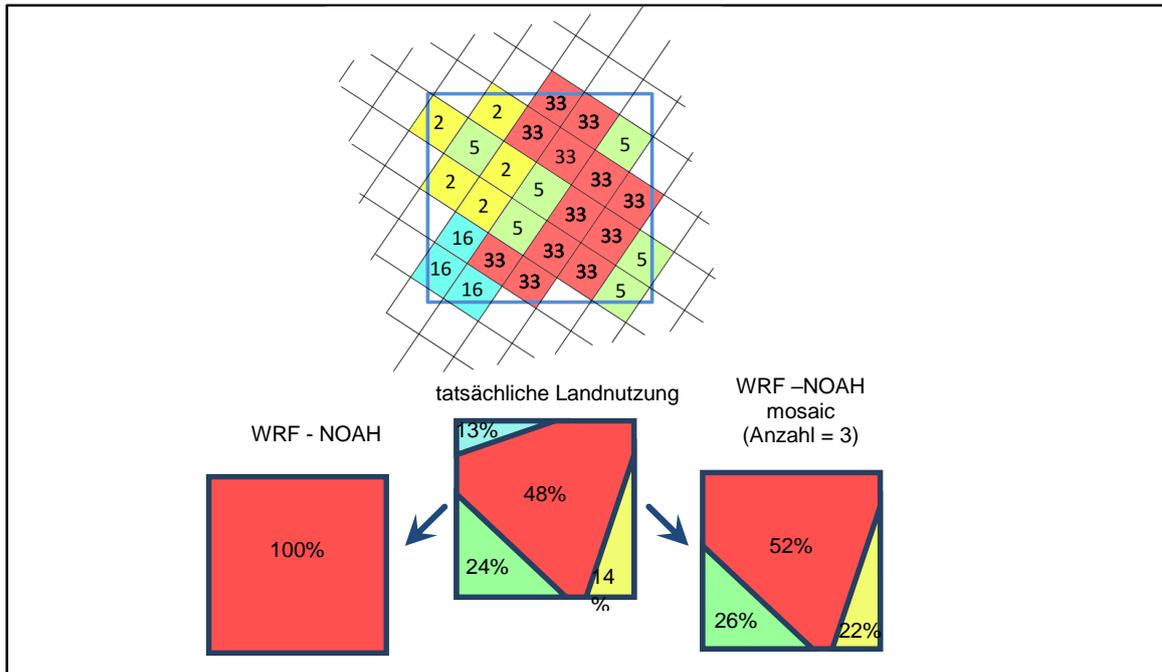


Abbildung 105: Schematische Interpolation der Landnutzungsdaten mit (rechts) und ohne (links) den Mosaikansatz

### 6.5.3 GFS-Daten

Die größte der drei Modelldomains deckt in etwa Europa ab und modelliert diesen Bereich. Innerhalb des Laufs benötigt das Modell Informationen über den zeitlich variierenden Zustand der Atmosphäre am Rande der Domain, um Transport- und Austauschprozesse berechnen zu können. Diese Randbedingungen werden in diesem Bericht durch GFS-Daten (Global Forecast System) von NCEP (National Centers for Environmental Prediction) bereitgestellt. Das GFS Modell besteht aus 4 gekoppelten Modulen (Atmosphären-, Ozean-, Land/Boden- und Seeisemodul), die ein globales Abbild der Atmosphäre simulieren. Es werden die GFS Grid 4 Reanalysedaten mit einer räumlichen Auflösung von  $0.5^\circ$  und einer zeitlichen von 6h verwendet. Die Daten sind annähernd tagesaktuell frei aus dem NOMADS (NOAA National Operational Model Archive and Distribution System) zu beziehen.

### 6.5.4 Statistische Parameter

WRF wird im mesoskaligen Bereich betrieben, womit einzelne Gebäude selbst nicht aufgelöst werden können. Um trotzdem eine Stadtmodellierung vornehmen zu können wird nun kein separat hochaufgelöstes Stadtmodell integriert, sondern spezielle Parameter aus diesem extrahiert und der Stadtparametrisierung hinzugefügt. Je nach Parametrisierungsansatz variiert die Menge der anzupassenden Werte. Für die komplexe Parametrisierung BEP werden statistische Informationen

unter anderem über die Verteilung der Gebäudehöhe und –fläche, der Straßenbreite sowie der Anteil bebauter gegenüber unbebauter Fläche je Landnutzungskategorie gefordert. Für die Ableitung dieser Parameter wurden neben dem Corine Datensatz die beiden Vektordatensätze *Urban Atlas* der EEA (Landnutzungsdaten Berlins) und die Berliner Gebäudeverteilung, bereitgestellt durch den Berliner Senat, verwendet. Beide Datensätze liegen in einer Kartenaufösung von 1:10.000 (etwa 5 m Auflösung) vor. Aus dem Urban Atlas ließ sich die Verteilung der Straßenbreite ableiten, für die Informationsgewinnung der gebäudespezifischen Parameter wurde der Datensatz des Berliner Senats genutzt.

Zu vielen weiteren Parameter (z.B. Wärmekapazität und -leitfähigkeit von Straßen, Mauern und Dächern sowie deren Rauheit) können keine genauen Quellen gefunden werden, hier werden die Ursprungswerte des Modells verwendet und diese systematisch den Ergebnissen angepasst. Aufgrund der Vielfalt an ‚Stellschrauben‘ ist eine abschließende Anpassung des Modells weiterhin in Arbeit, die nachfolgenden Ergebnisse spiegeln den aktuellen Stand des Modells wieder.

## 6.6 Ergebnis der Modellvalidierung

Für den Zeitraum 01.06.2014 – 09.06.2014 wurden Modellrechnungen mit unterschiedlichen Stadtparametrisierungen (Bulk, SLUCM, BEP) durchgeführt. Dieser Zeitraum zeichnet sich durch milde bis heiße fröhsommerliche Temperaturen und unterschiedliche Wettersituationen aus. Zur

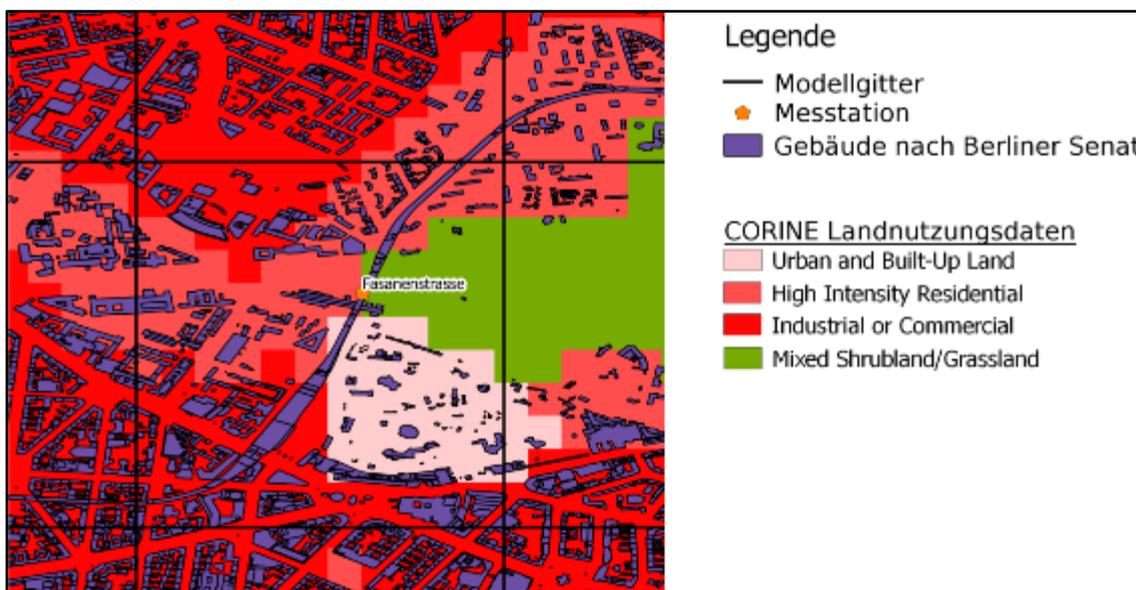


Abbildung 106: Beispielhafte Darstellung des Modellgitters für die Fasanenstrasse (schwarz), Landnutzungsklasse für das Gitter wird nach maximaler Anzahl ausgewählt (hier: Ind. or Commercial)

Mitte hin kommt es zu einem Durchzug eines Tiefs, das mit leicht erhöhten Windgeschwindigkeiten und einem Regeneignis am 05.06. einhergeht. Sonst dominiert Hochdruckeinfluss und Strahlungswetter.

### Lufttemperatur

Als Referenz wurde die Wetterstation der FU an der Fasanenstraße (Charlottenburg, an der TU) im Zentrum Berlins gewählt. Diese gewährleistet als eine der wenigen Stationen in Berlin eine Messung innerhalb dicht bebauten und –besiedeltem Gebiets und kann damit typische Stadtklimaeffekte wiedergeben.

Die Modelldaten liegen in einer stündlichen Auflösung mit einer Gitterweite von 1 km vor. Zum Vergleich wurde der nächstliegende Modellgitterpunkt ausgewählt (Abbildung 107).

Zu beachten gilt, dass hier ein Gitter- mit einem Punktdatensatz verglichen wird. Ersterer steht stellvertretend für ein Feld von 1x1 km Auflösung, während zweiter ein Messpunkt mit mikroklimatischen Einflüssen ist. Jeder Untergrund kann Wärme unterschiedlich gut aufnehmen und speichern. Eine Punktmessung wird dadurch immer von dem ihm zugrundeliegenden Umfeld beeinflusst, sei es zu hohen Temperaturen durch schwarzen Asphalt als Bodenoberfläche oder zu niedrigen durch Schattenwurf von nahen Bäumen. Das Modell mittelt all diese in ihm auftretenden lokalen Effekte auf das jeweilige Feld, auch bei einem idealen Modell ist damit keine hundertprozentige Übereinstimmung zu erwarten.

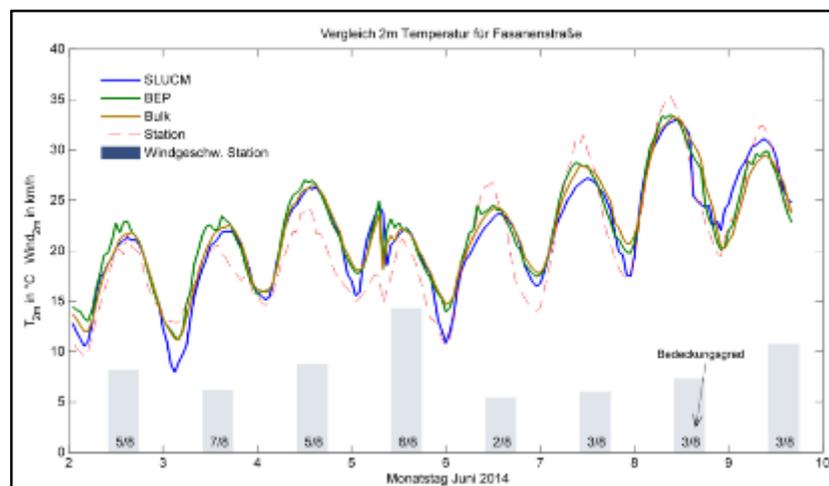


Abbildung 107: 2 m Lufttemperatur vom 02.06.2014 - 09.06.2014

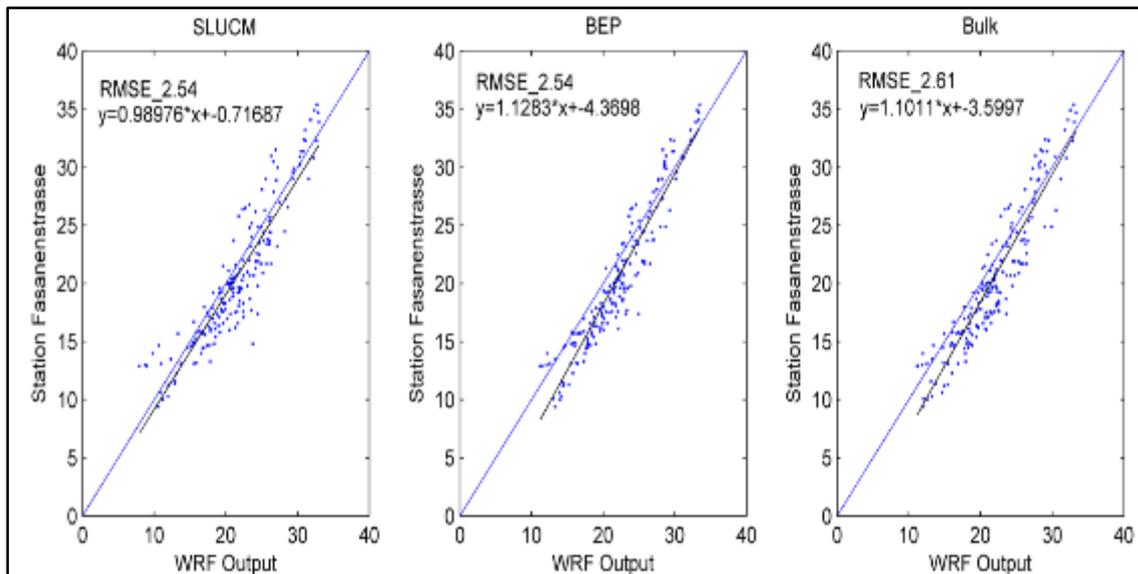


Abbildung 108: Scatterplot für 2 m Lufttemperatur [°C] vom 02.06.2014 - 09.06.2014, blaue Linie: Diagonale; schwarze Linie: Ausgleichsgerade

Der Vergleich zeigt (Abbildung 107 und Abbildung 108), dass die Verwendung von detaillierteren Stadtparametrisierungen zu einer Modellverbesserung führt. Nach der Statistik wurden die besten Ergebnisse in dieser Simulation durch die *Single Layer* (SLUCM) Parametrisierung erreicht. Besonders in den Nachtstunden wurden in vielen Fällen sehr gute Minimaltemperaturen simuliert. Je nach Wettersituation konnte die *Multi Layer* (BEP) Parametrisierung Tagesmaximaltemperaturen teils besser wiedergeben. Vom mittleren Fehler unterscheiden sich beide Ansätze nicht, SLUCM zeigt über die gesamte Simulation hinweg jedoch die bessere Übereinstimmung mit den Stationswerten.

### 6.6.1 Bodentemperatur – MODIS

Modelldaten lassen sich qualitativ nur mit Beobachtungsdaten validieren. Das können *in situ* Messungen wie Messstationen sein, oder Fernerkundungsmessungen beispielsweise durch Satelliten. Großflächige Abdeckungen lassen sich nur mit letzterem erreichen. Im Folgenden wird der Vergleich der Modellergebnisse für die Oberflächentemperatur mit Satellitendaten von MODIS beschrieben.

Das Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) befindet sich auf den amerikanischen NASA-Satelliten Terra und Aqua. Beide Satelliten befinden sich auf einem sonnensynchronen Orbit mit polumlaufer Bahn. Damit wird eine globale Abdeckung über 1 bis 2 Tage ermöglicht. MODIS misst die elektromagnetische Strahlung der Erde und Atmosphäre in einem Bereich von 0,4 bis 14,4  $\mu\text{m}$  über 36 Banden. Damit ist es in der Lage die Strahlungsbilanz der Erde und insbesondere die Oberflächentemperatur von Land, Ozean und Wolken zu erfassen.

In diesem Bericht wird als Vergleichswert für die Oberflächentemperatur (LST) der MODIS Datensatz „MODIS\_Terra/Aqua version-5 (V5) level-2 LST/E“, kurz „MOD11\_L2“ verwendet. Hier gehen die MODIS Spektralbanden 31 (10.780–11.280  $\mu\text{m}$ ) und 32 (11.770 – 12.270  $\mu\text{m}$ ) ein, die Auflösung beträgt wie auch die der WRF Ergebnisse 1 km. Level 2 Produkte sind bereits vorprozessiert und beinhalten eine Qualitätskontrolle, Atmosphärenkorrektur und Wolkenmaske, sodass nach Anpassung der unterschiedlichen Projektionen ein direkter Vergleich mit den Modelldaten möglich ist.

### 6.6.2 Vergleich MODIS – WRF Bodentemperatur

Polumlaufende Satellitendaten sind für feste Ortspunkt nur zu bestimmten Zeiten verfügbar. Die WRF Ergebnisse liegen in stündlicher Auflösung vor, daher wurden diese für den Vergleich auf den Zeitpunkt der MODIS-Daten interpoliert. Die Satellitendaten besitzen zwar eine Wolkenmaske, während des Zugangs zu diesen wird auf der Internetseite jedoch ausdrücklich auf Ungenauigkeiten am Randbereich der Maske hingewiesen, Emissionen von Wolkenpartikeln können somit fälschlicherweise als Oberflächentemperatur interpretiert werden. Um diesen Fehler zu umgehen werden alle MODIS-Daten, die die dreifache Standardabweichung überschreiten, ignoriert. Zudem misst MODIS die Emission der obersten Bodenbedeckung, was unter anderem Gras, Gebäudedächer oder auch Bäume mit beinhalten kann. Das Modell hingegen simuliert die oberste Bodenschicht, womit eine Inkonsistenz beider Datensätze zu erwarten ist. Um diese zu minimieren, werden aus den MODIS Daten alle Werte mit Baumbewuchs, basierend auf den CORINE Landnutzungsdaten, ebenfalls ignoriert.

Für den Vergleich wurden die WRF Simulationen vom 02.06.2014 bis 09.06.2014 (vgl. Abbildung 107) verwendet. Es wurden möglichst bewölkungsfreie Tage für eine gute Abdeckung mit MODIS benötigt, was an dem 02., 06. und 07. Juni 2014 der Fall war. Die genauen Zeitpunkte sind in der Abbildung 109 ersichtlich.

Der Vergleich zeigt einen Tagesgang im statistischen Verhalten beider Datensätze auf. In den Nachtstunden lassen sich moderate Übereinstimmungen der beiden finden, der RMSE (*Root Mean Squared Error*) liegt dabei in allen Fällen unter 2,7, der Korrelationskoeffizient steigt zur Mitte der Nacht auf bis zu 0,55. Anders sieht es für den Tag aus, hier sinkt der Korrelationskoeffizient auf bis zu 0,23 zur Mittagszeit und weist einen RMSE-Wert von 8,44 auf, was auf einen ungenügenden Zusammenhang beider Datensätze hindeutet. Es deutet sich an, dass eine moderate Übereinstimmung lediglich in der Nacht zu erreichen ist.

Zeitraum	Abdeckung in %	Korrelation	RMSE
02.06.14 02:30	44	0.55	2.42
02.06.14 12:05	22	0.23	8.44
06.06.14 00:30	50	0.51	2.57
06.06.14 02:05	45	0.47	2.08
06.06.14 09:55	45	0.27	6.45
06.06.14 11:40	53	0.27	7.71
06.06.14 21:05	63	0.25	2.66
07.06.14 01:10	60	0.38	2.47
07.06.14 12:25	61	0.28	4.16

Abbildung 109: Vergleich MODIS-WRF, Statistische Übersicht

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen stellvertretend für alle Vergleichszeiträume, dass sich abbildende Muster im Vergleich von MODIS und WRF während der Tages – (Abbildung 112) und Nachtzeit (Abbildung 110).

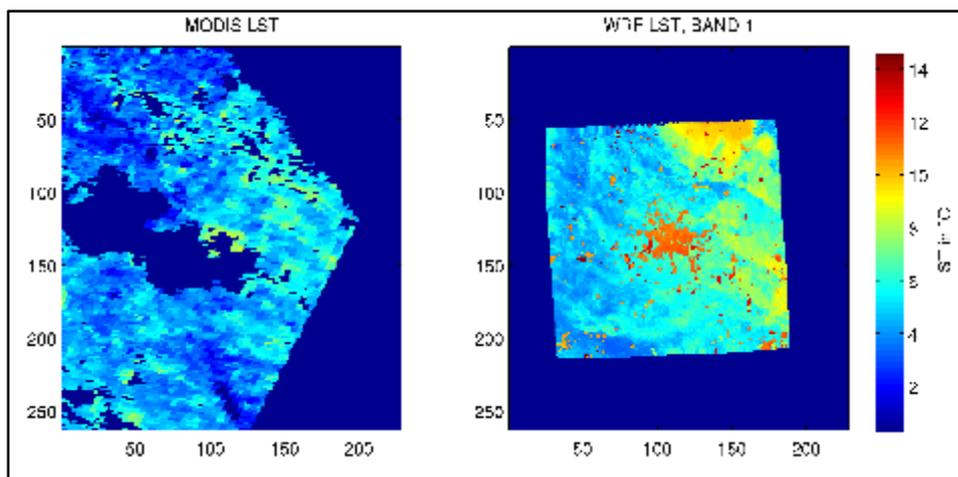


Abbildung 110: Oberflächentemperatur 02.06.2014 02:30, Dunkelblau: keine Werte

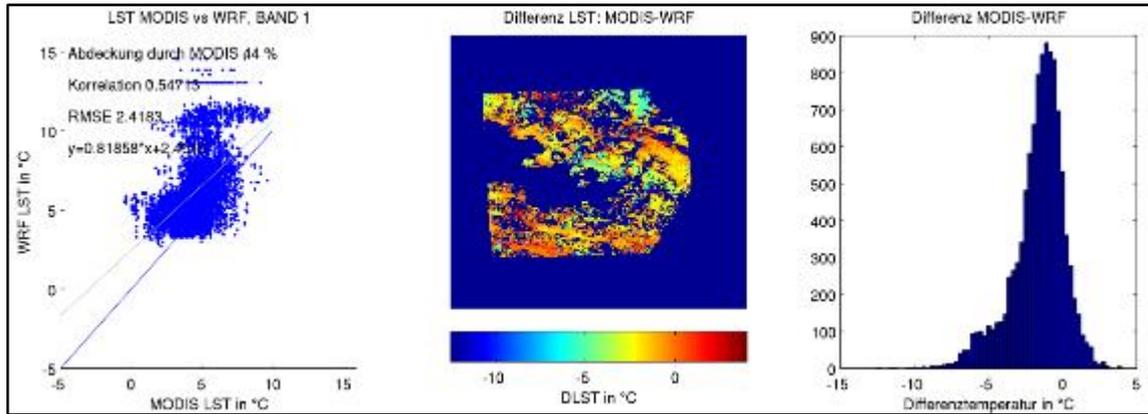


Abbildung 111: Statistik der Oberflächentemperatur 02.06.2014 02:30, links: Scatterplot, Mitte: Differenzplot (Dunkelblau: keine Werte), rechts: Histogramm der Differenzbildung

In *Abbildung 110* und *Abbildung 111* wird die Oberflächentemperatur in einer Nachtsituation dargestellt (02:05 Uhr). Es wird ein Randbereich des Satellitenbildes verwendet weshalb das MODIS-Temperaturfeld im östlichen Teil fehlende Daten aufweist. Die Abdeckung durch MODIS nach Abzug aller im Vorfeld erwähnten Bedingungen beträgt 44 %. Das Histogramm zeigt eine nach links verschobene Normalverteilung. WRF scheint somit in den meisten Fällen höhere Temperaturen zu simulieren als diese durch MODIS erfasst wurden. Der flache Anstieg der Ausgleichsgeraden ( $m=0,82$ ) weist auf ein, im Mittel, kleineres Temperaturspektrum in der WRF-Simulation hin, als es in den MODIS Daten der Fall ist.

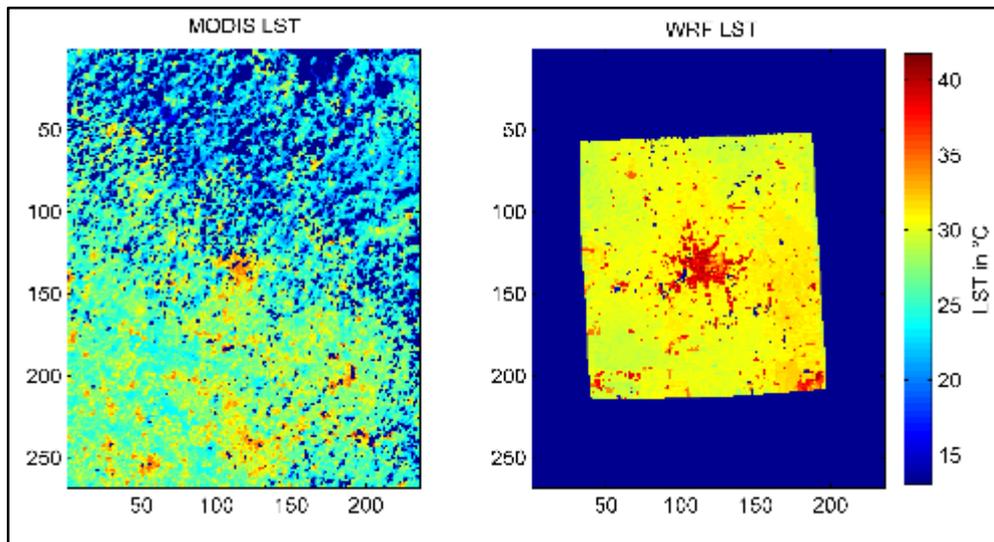


Abbildung 112: Oberflächentemperatur 06.06.2014 11:40, Dunkelblau: keine Werte

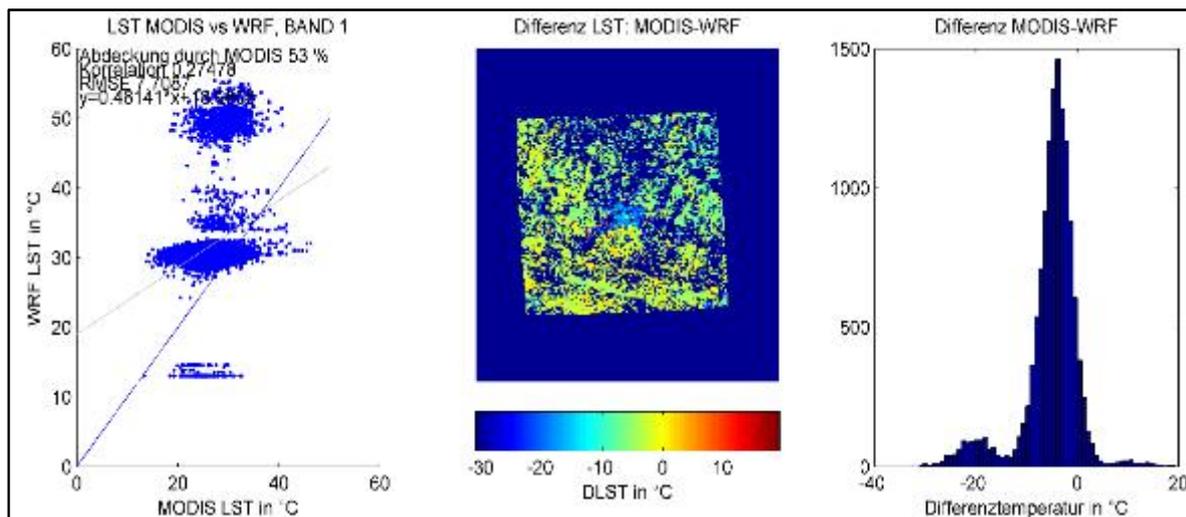


Abbildung 113: Statistik der Oberflächentemp. 06.06.2014 11:40, links: Scatterplot, Mitte: Differenzplot (Dunkelblau: keine Werte), rechts: Histogramm der Differenzbildung

Abbildung 111 und Abbildung 112 zeigen einen Vergleich der Tageswerte (11:40 Uhr). Die Abdeckung beträgt hier 53 %. Auch in diesem lässt sich ein nach links verschobenes Histogramm sowie eine flache Ausgleichsgrade ( $m=0,48$ ) finden. Der Scatterplot zeigt mehrere Punktwolken, was vermutlich auf die Landnutzungsdaten (33 Klassen) der WRF-Simulation zurückzuführen ist. Durch die Klasseneinteilung kann keine kontinuierliche Temperaturverteilung erzeugt werden, sondern jedes Gitter wird bei der Absorption von kurzwelliger Strahlung (der Sonne) nach dem Modell durch seine individuelle Landnutzungs-kategorie definiert und berechnet. Auch wenn Energieflüsse zwischen den einzelnen Gitterpunkten berechnet werden, dominiert zur Mittagszeit die solare Einstrahlung, womit in dieser Zeit räumlich gradientstarke Bodentemperaturen zustande kommen.

Insgesamt muss beachtet werden, dass keiner der beiden Datensätze tatsächliche *in situ* Messungen zeigt. Auch MODIS leitet die Bodentemperatur nur aus Fernerkundungsverfahren unter verschiedenen Annahmen ab. In der Literatur sind zur Datengüte der Oberflächentemperatur von MODIS unterschiedliche Aussagen zu finden. So wird in [Wan et al. 2008; 2004] die Güte für eine strahlungsbasierte Validierung auf ‚in den meisten Fällen besser als 1K‘ angegeben. [Sohrabinia et al. 2012] gibt dagegen lediglich eine Bestimmtheitsmaß (Quadrat des Korrelationskoeffizienten) gegenüber *in situ* Messungen von 0,35 an, das Bestimmtheitsmaß für WRF-Daten gegenüber diesen *in situ* Messungen liegt bei 0,77.

## 6.7 Mit WRF-simulierten Bodenoberflächen- und Lufttemperatur sowie Bodenoberflächenfeuchte als Prädiktor für das Reibwert-Schätzmodell

Die wichtigsten Wetter-Prädiktoren für das Reibwert-Schätzmodell sind bis zum letzten Quartal des Projektes nicht bestimmt worden. Daher wurde anhand von Publikationen und nach der Studie des UK und Finnland-Reibwertmodells (Gleichung 1) die Bodentemperatur ( $T_r$ ) als wichtigster Prädiktor angenommen. (Kangas et al., 2015)

$$\text{Snowy and/or icy roads: } CF_{si} = a_1 f(X_S) + b_1 f(X_I) + c_1 f(T_r) + d_1$$

$$\text{Wet road surface: } CF_w = a_2 f(X_W) + d_2$$

$$\text{Dry road surface: } CF_d = 0.82 \text{ (constant)}$$

[Reibwertgleichungen nach FMI *road weather model*; a, b, c und d entsprechen hier Reibwertkoeffizienten, X ist die Schichtdicke von Schnee (S), Eis (I) und Wasser (W),  $T_r$  ist die Fahrbahntemperatur (Bodentemperatur)].

als weitere wichtige Prädiktoren wurden Lufttemperatur und Luftfeuchte berücksichtigt. Es ist zu beachten, dass  $T_r$  der einzige Klimaparameter ist, der in der Gleichung 1 Einfluss auf den Reibwert hat. Die Simulation der Bodentemperatur ist sehr aufwendig. Der Grund dafür ist, dass die räumliche Variabilität der Bodentemperatur im Vergleich zu den anderen Parametern wie Lufttemperatur und Luftfeuchte sehr groß ist. Die Bodentemperatur wird von Schatten/Sonne sowie Oberflächenmaterial stark beeinflusst. Aus diesem Grund kann ein Modell mit der Auslösung von 1km keine richtigen Bodentemperaturwerte für ein heterogenes Gitter liefern.

Hier werden die WRF-Evaluierungsergebnisse für Lufttemperatur, Bodentemperatur und Luftfeuchte präsentiert und Maßnahmen zur Verbesserung der Genauigkeit des Modells vorgeschlagen.

Abbildung 114 zeigt, inwiefern das Modell in der Lage ist, mit dem Mosaik-Ansatz eine Verbesserung im Vergleich zu der nächstliegenden Station für die Simulation der Lufttemperatur zu bringen. Die OBS-Werte (Schwarze Punkte) zeigen die gemessenen Lufttemperaturen am 12.05.2015. Die Daten der nächstgelegenen Station sind mit blau, die WRF-Mosaik-Simulationen mit rot dargestellt. WRF-Simulationen sind in guter Übereinstimmung mit den Messdaten.

Nun wird die Bodentemperatur dargestellt, welche größere Abweichungen in heterogenem Gitter zeigt. Abbildung 115 stellt den Zusammenhang zwischen der simulierten Bodentemperatur aus dem WRF-Modell und Beobachtungsdaten (OBS) für 18 Messtermine dar. Insgesamt ist das Modell in der Lage, die Bodentemperaturdaten „gut“ zu simulieren, allerdings gibt es eine Unterschätzung für die gemessenen Temperaturdaten über 40 Grad, welche nur im Sommer gemessen werden kann.

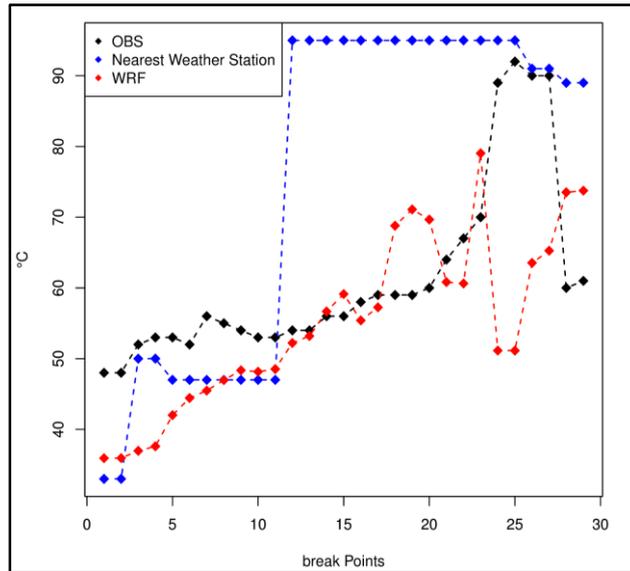


Abbildung 114: Lufttemperatur simuliert mit WRF (rot) im Vergleich zur nächstliegenden Wetterstation( blau) und Messwerten(schwarz) am 12.05.2015

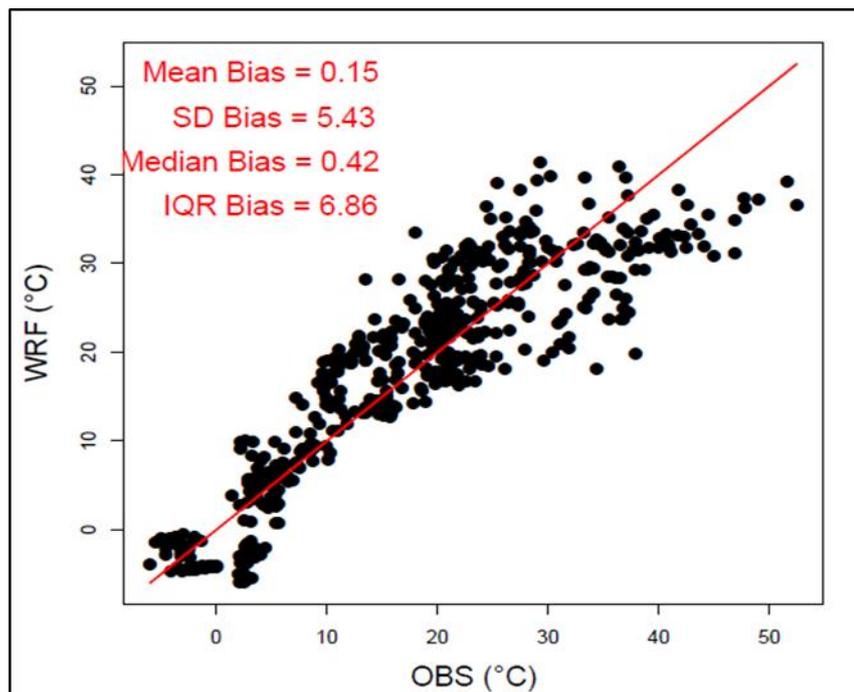


Abbildung 115: Bodentemperatur simuliert mit WRF (Y-Achse) im Vergleich zur Messung (x-Achse) für 18 Messtermine

Um dieses Problem zu lösen, wurden die Sommerwerte genauer untersucht. Die folgende Abbildung 116) zeigt einen Simulationstag im Juli. An diesem Tag hat das Modell die schlechteste Simulation für Bodentemperaturen geliefert.

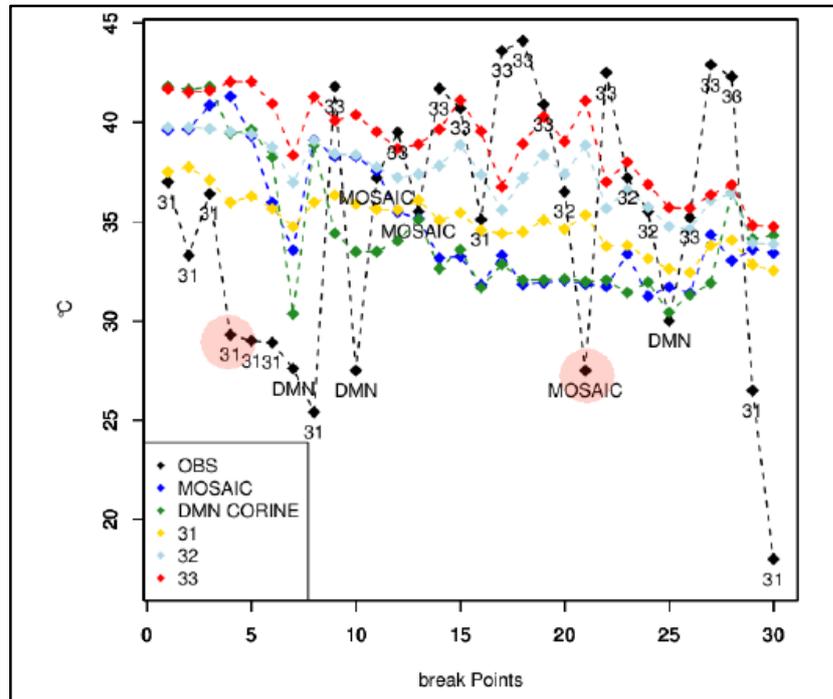


Abbildung 116: WRF-Simulation für Bodentemperatur an einem Sommertag im Juli mit Mosaik-Ansatz(blau), mit Corine dominante Landnutzung (grün), mit urban-Klasse 31(gelb), 32(hellblau) und 33(rot)

Weder die Amplitude, noch die Fluktuationen (sehr große Schwankung zwischen den Bremspunkten) wurden simuliert (schwarz: Messung, dunkelblau: WRF, grün: WRF-Mosaik). Der starke Abfall gilt für den Bremspunkt Nr. 21 (zweiter rosa hinterlegter Punkt). Wenn wir uns diesen Punkt genauer anschauen, sehen wir, dass der Messpunkt unter einem Baum positioniert ist und daher eine große Abnahme zeigt Abbildung 117).



Abbildung 117: Lage des Punkt 21 unter einem Baum

In der Abbildung 116 wurden auch 3 Kurven mit gelb, hellblau und rot gezeigt. Diese zeigen, wie sensibel die Bodentemperatur gegenüber den Landnutzungsklassen ist, obwohl alle 3 ausgewählten Landnutzen aus der Klasse „Urban“ ausgesucht wurden. Der Effekt von Schatten ist zu sehen. Diese Klassen zeigen stark bebaute und gering bebaute Wohngebiete sowie Industrie. Das Verhältnis der anderen Landnutzungsklassen ist nicht gezeigt. Aber diese Abbildung zeigt, dass, wenn Landnutzungsklassen richtig und entsprechend der lokalen Effekten ausgewählt werden, die starken Fluktuationen von einem zum anderen Punkt wiedergeben werden können. Wenn die Messstrecke einmal pro Jahreszeit mit Fish-eye Kamera fotografiert würde, ist eine große Verbesserung der Fluktuation der simulierten Werte zu erwarten.

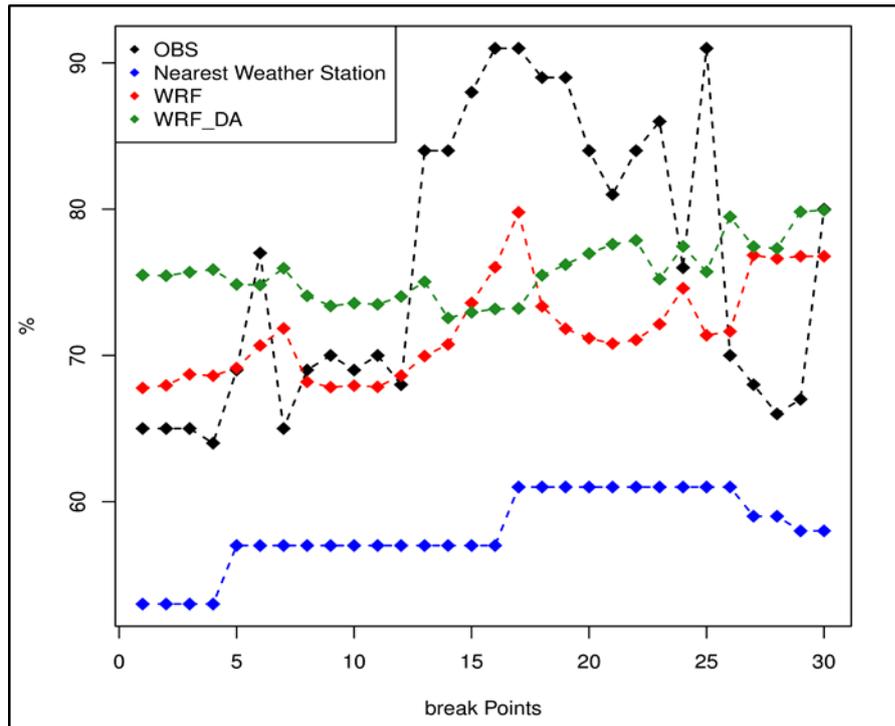


Abbildung 118: Luftfeuchte simuliert mit WRF (rot) im Vergleich zur nächstliegenden Wetterstation(blau) und Messwerten(schwarz) am 09.09.2015. Assimilation (grün) verbessert die Amplitude

Um die Amplitude der simulierten Daten zu verbessern, wurde Datenassimilation eingesetzt. Hier werden alle zur Verfügung gestellten Daten aus unterschiedlichen Quellen (Wetterstationen, Satelliten, Flugzeug...) dem Modell assimiliert. Wie die Abbildung 118 zeigt, kann diese Methode die Amplitude verbessern. Um die Punkt zu Punkt Schwankungen zu korrigieren, soll ein Austausch der Landnutzungsklassen erfolgen. Mit Datenassimilation für Luftfeuchte und Lufttemperatur ist eine große Verbesserung erreicht worden. Abbildung 118 zeigt ein Beispiel für die Luftfeuchte am 09.09.2015, wo das Modell WRF mit Datenassimilation eine verbesserte Amplitude aufweist.

In der letzten Phase des Projektes wurde von der TU-Berlin bestimmt, dass die Bodentemperatur kein Prädiktor des entwickelten Reibwert-Schätzmodells ist. Luftfeuchte wurde als wichtiger Prädiktor im Schätzmodell der TU Berlin genannt. Nachfolgend wird eine Auswahl an Messfahrten gegenüber Simulationen relativer Luftfeuchte Feucht, ohne Datenassimilation, gezeigt. In allen Fällen wird die relative Feuchte durch das Modell unterschätzt. Gitterpunkte mit dominanten urbanen Landnutzungsklassen werden in der Regel trockener simuliert als andere. Diese Beobachtung lässt sich dabei nicht auf die Messdaten übertragen. Während der Messfahrt wurden das Auftreten und die Intensität von Niederschlag protokolliert. Auffällig ist zu diesen Zeiten der häufige Anstieg des Fehlers durch das Modell, welches nicht akkurat in der Lage ist, einsetzenden und endenden Niederschlag minutiös vorherzusagen.

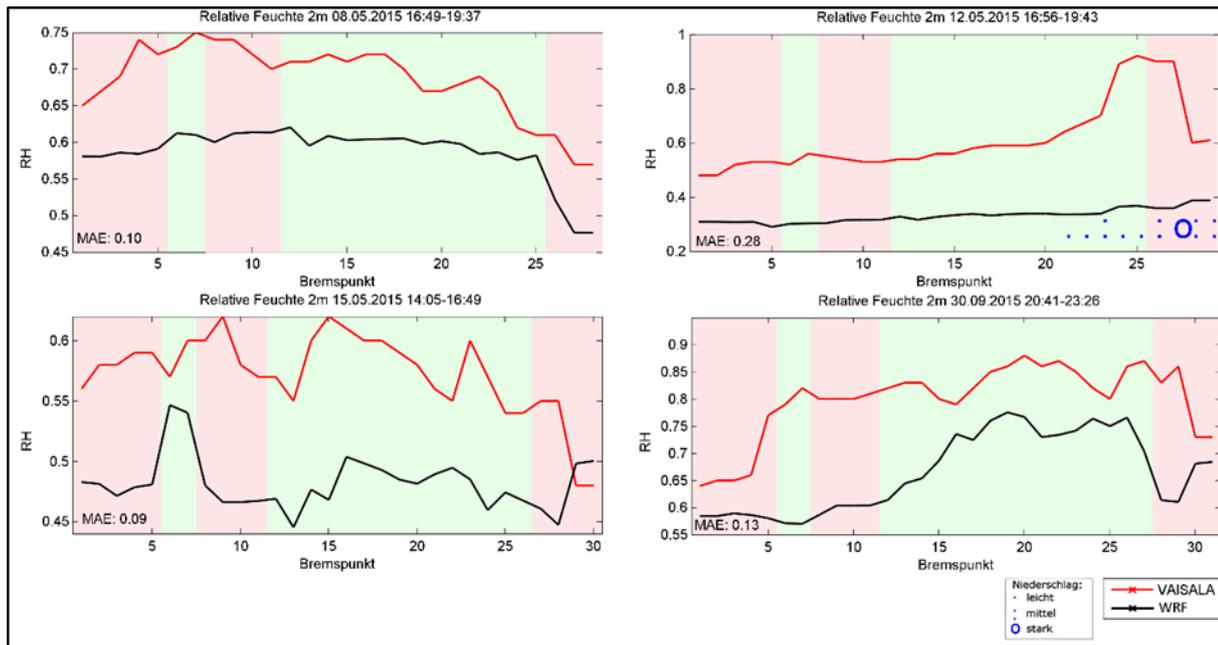


Abbildung 119: 2m relative Luftfeuchtigkeit des Modells gegenüber ca. 60cm Luftfeuchte durch Vaisala Messsensor je Bremspunkt für verschiedene Messfahrten; rot hinterlegt: Urbanklassen (31, 32, 33), alle weiteren grün hinterlegt

Während in Fällen ohne protokollierten Niederschlag der MAE stets im sehr guten Bereich unter 0,2 liegt, steigt dieser Wert auf mindestens über 0,3 an regnerischen Tagen. Gerade bei der Messfahrt am 12.05.2015 lässt sich gut ein Anstieg des Fehlers bei Einsetzen des Niederschlages erkennen. Diesem Problem konnte mit Datenassimilation entgegengewirkt werden.

Da nach dem Einsatz des Mosaikansatzes und der Datenassimilation die Luftfeuchte und Lufttemperatur sehr gut simuliert werden können, können die Simulationen des WRF-Modells als Prädiktor für das Reibwert-Schätzmodell angewendet werden.

## 6.8 Brücken

Während der Messkampagne wurden bewusst auch Punkte gewählt, die durch ihre Lage lokale Ausnahmefälle darstellen und sich damit bei einer Simulation kritisch auswirken könnten. Als eine dieser Gruppen können Brücken gezählt werden. Besonders im Winter sind sie ein möglicher Gefahrenbereich für Autofahrer, da diese viel mehr den glätteverursachenden Faktoren ausgeliefert sind. Gerade die Nähe zu Gewässern bringt eine große Menge an Feuchtigkeit mit sich, welche sich auf der Brücke niederlassen kann. Die freihängende Konstruktion der Brücke ermöglicht auch eine viel schnellere Abkühlung des Bodens, anders als Straßen, wo die darunterliegende Bodenschicht als

Temperaturdämpfer wirkt. Die Folgen sind, dass die Glätte Autofahrer auf Brücken schnell überraschen kann, ohne das im Vorfeld etwas davon zu spüren gewesen ist. Für das WRF-Modell ist die Problematik ähnlich. Aufgrund der groben Zieldomain mit einem Kilometer Maschenweite ist die Annahme unrealistisch, dass das Modell das mikroklimatische System einer Brücke im Detail wiedergeben kann. Gerade bei der Oberflächentemperatur der freihängenden Brückenfahrbahn sind die Strahlungsprozesse gegenüber einer konventionellen Straße grundlegend verschieden. Die Fragestellung lautet daher nicht, ob ein Fehler bei der Betrachtung von Brücken auftritt, sondern wie groß sich dieser niederschlägt.

Insgesamt stehen 14 Messpunkte zur Verfügung, die sich sowohl hinsichtlich ihrer Lage und Brückenart, Saison und Tageszeit sowie der vorherrschenden Wetterbedingung unterscheiden. In vier Fällen handelt es sich um Brücken über Wasser und in sechs Fällen wurde Niederschlag durch den Fahrer registriert. Die gemessenen Fahrbahntemperaturen liegen zwischen 8,6 und 26,1°C, die Lufttemperaturen bei 9 bis 17°C. Die meisten Brückenpunkte unterscheiden sich in ihrer Dimension, Höhe und ihrem Untergrund voneinander, in wenigen Fällen wurden Brücken an unterschiedlichen Tagen noch einmal bemessen.

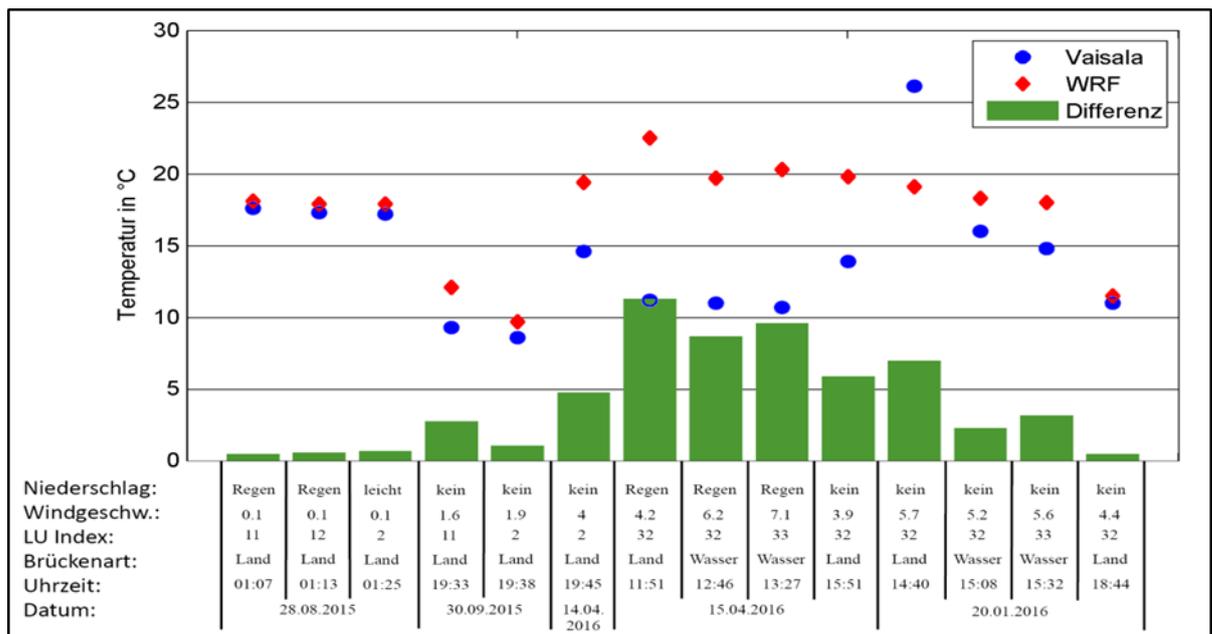


Abbildung 120: Bodentemperaturmessung durch Vaisala-Messgerät (blau) gegenüber Modellsimulation (rot). Niederschlag nach Augenbeobachtung des Fahrers, Windgeschwindigkeit als Tagesmittel der DWD  
Messstation Potsdam

Die Ergebnisse variieren deutlich voneinander und zeigen lediglich am jeweiligen Messtag eine gewisse Konsistenz. Die Differenz zwischen Messung und Simulation reicht von 0,5K bis 11,3K; der mittlere durchschnittliche Fehler (MAE) liegt bei 4,2K. Für alle bis auf einen Messpunkt überschätzt

das Modell die Messung, was durch den fehlenden Boden, der bei Straßen dämmend wirkt, und der damit einhergehenden schnellen Auskühlung erklärt werden kann. Neben der Abstrahlung der Wärmeenergie sowohl nach oben als auch nach unten kann auch der Wind verstärkt zur Abkühlung beitragen. Und so weisen vor allem windreiche Messpunkte eine hohe Differenz zwischen Messung und Simulation auf.

In einem Test wurden ausgewählte Brückenmesspunkte noch einmal mit höherer Auflösung simuliert. Der Vergleich der Simulationen mit 1km und 200m Auflösung ist in der Abbildung 121 zu finden. Insgesamt zeigen die wenigen Vergleichspunkte keine nennenswerte Verbesserung. Die Ergebnisse der Brückenoberflächentemperatur mit höherer Auflösung schwanken in beide Richtungen, von sechs Punkten verbesserten sich zwei, drei verschlechterten sich. Die Ergebnisse variieren dabei bis zu 8,7K. Allerdings muss auch hier wiederholt werden, dass die Modellphysik nicht für eine Simulation von Brückeneffekten ausgelegt ist und durch das gezeigte Ergebnis daher nicht zwangsläufig von der Nutzung höherer Auflösungen abgeraten werden kann.

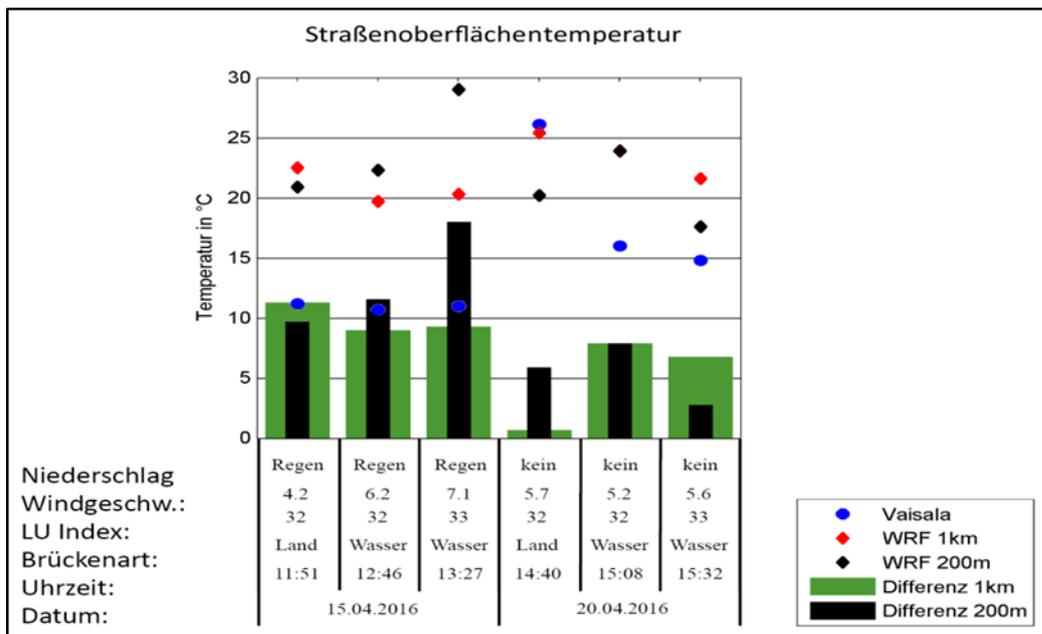


Abbildung 121: Oberflächentemperaturmessung durch Vaisala-Messgerät über verschiedenen Brücken (blau) gegenüber Modellsimulation (rot). Niederschlag nach Augenbeobachtung des Fahrers, Windgeschwindigkeit als Tagesmittel der DWD Messstation Potsdam, Simulationsergebnisse aus gleichem Modelllauf

## 6.9 Zusammenfassung

Um flächendeckend hochaufgelöste Wetterparameter für Berlin und Umgebung zu erhalten, wurde das amerikanische Wettervorhersagemodell WRF im Regionalbetrieb mit Stadtparametrisierung verwendet. Es wurde die 2m Lufttemperatur mit den Stationsmessungen der Fasanenstraße im

Zeitraum vom 02.06.-09.06.2015 verglichen, die Bodentemperatur für 2 Tage mit MODIS Satellitendaten. Die Auflösung des Modells beträgt 1 km.

Die simulierte Lufttemperatur korreliert sehr gut mit denen der Messstation, der RMSE (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers) liegt über alle Tage berechnet bei 2,54. Es wurden mehrere Parametrisierungsansätze getestet, in aufsteigender Reihenfolge nach ihrer Komplexität waren das die Bulk-, SLUCM- und BEP Parametrisierung. Deren Detailgrad wirkt sich auf die benötigte Rechenzeit und Rechenleistung aus, womit je nach Anforderung im Vorfeld eine Kosten-, Nutzenüberlegung stehen muss. Es zeigt sich, dass nach aktuellem Modellstand die anspruchsvollste Parametrisierung BEP im Vergleich zum SLUCM nur wenig Auswirkung auf das Modellergebnis hat. Letzteres zeigt die beste Performance über den gesamten Modellzeitraum und weist eine deutliche Verbesserung zum Bulk-Ansatz auf.

Der Vergleich der Bodentemperatur mit Satellitendaten führte, besonders in den Mittagszeiten, zu ungenügenden Ergebnissen. WRF tendiert in den meisten Fällen zu niedrigeren Temperaturen. WRF enthält ein eigenes Landoberflächenmodell (LSM, hier *Unified Noah Land Surface Model*), was unter anderem die 33 CORINE Landnutzungsklassen verwendet. Tatsächlich sind im Raum Berlin nur 17 dieser Klassen relevant, das Modell unterscheidet somit nur zwischen dieser Anzahl an Oberflächen. Für eine Verbesserung der Ergebnisse könnte daher eine Erhöhung der Landnutzungsklassen bzw. die Verwendung anderer LSMs zielführend sein.

Beiden Vergleichen gemein ist, dass eine akkurate Übereinstimmung nicht zu erwarten ist. Während bei Stationsmessungen gegenüber den Modelldaten ein Punktdatensatz einem Felddatensatz gegenübergestellt wird, muss bei Satellitendaten aufgrund ihrer Methodik von einer geringen Messungenaugigkeit ausgegangen werden.

Anschließend wurde das Modell mit Bremspunktdaten validiert. Die Bodenoberflächentemperatur und -feuchte konnte gut simuliert werden, lediglich bei einsetzen von Niederschlag kam es zu einem signifikanten Anstieg des Fehlers. Dieses Problem konnte mit der Nutzung von Datenassimilation signifikant verbessert werden. Lokale und zeitliche Phänomene lassen sich in den Modelldaten erkennen wobei die durch lokale Mikroklimata verursachte Varianz aus den Messwerten nicht vollständig erreicht wird. Besonders Abschnitte mit Beschattung können in einem homogenen Modellgitter von einem Kilometer Maschenweite nur unzureichend simuliert werden. Verbessert werden konnte dieser Umstand durch die Nutzung des Mosaik-Ansatzes. Ebenfalls die manuelle Anpassung der Landnutzungsklassen an den spezifischen Messpunkt führte zu einem Anstieg der Modellgüte.

## 7 Verfahren zur Reibwertpotentialschätzung

Auf Basis der erhobenen und in Kapitel 5.2 dargestellten Messergebnisse wurde ein Verfahren entwickelt, welches durch eine geeignete Auswertung der aktuellen Umweltdaten eine Schätzung des momentan maximalen Reibwerts ermöglicht.

Als geeignete Methode hat sich dafür die logistische Regression erwiesen. Bei dieser Methodik, welche im Abschnitt 7.1 genauer beschrieben wird, handelt es sich um ein statistisches Analyseverfahren. Dieses bestimmt anhand von verschiedenen Eingangsgrößen die Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses oder Zustands, in diesem Fall der Zwischenschicht. Mit Hilfe der gemessenen Reibwerte lässt sich daraus unmittelbar eine Reibwertpotentialschätzung vornehmen.

Die Anwendung des entwickelten Verfahrens auf die vorhandenen Reibwertdaten wird in Kapitel 7.2 gezeigt. Dabei wird insbesondere untersucht, wie häufig und mit welcher Genauigkeit der geschätzte maximale Reibwert mit den real gemessenen Werten übereinstimmt.

Eine Bewertung der Robustheit des Schätzalgorithmus' erfolgt im folgenden Kapitel 7.3. Dort wird beschrieben zu welchem Qualitätsverlust der Wegfall wichtiger Eingangsinformationen des Schätzverfahrens führt.

Abschließend wird in Kapitel 7.4 gezeigt, wie die Reibwertschätzung in ein echtzeitfähiges System umgesetzt wurde und wie zuverlässig dieses unter Realbedingungen funktioniert. Diese Funktionalität stellt die eigentliche Zielstellung des Forschungsprojektes dar.

### 7.1 Schätzung des maximalen Reibwerts auf Basis logistischer Regression

Zur möglichst genauen Schätzung des Reibwertpotentials ist es notwendig den aktuellen Zustand der wichtigsten Einflussparameter zu kennen. Wie in Kapitel 3 gezeigt, zählen hierzu vor allem die Zwischenschicht, die Straßenoberfläche oder die Reifenart. Die aktuelle Straßenoberfläche sowie die genutzte Reifenart werden zunächst als bekannt angenommen. Später wird aufgezeigt, auf welche Art auf diese Informationen für die Echtzeitschätzung zurückgegriffen wird.

Weitaus herausfordernder ist es, die Zwischenschicht zwischen Fahrzeugreifen und Straße (trocken, feucht, nass, verschneit/vereist) zu bestimmen. Im Sinne der eingangs beschriebenen Anforderung, dass am Fahrzeug keine zusätzliche Messtechnik außer der bereits vorhandenen Sensorik genutzt werden soll, lässt sich der Zustand der Zwischenschicht nicht direkt messen. Stattdessen muss versucht werden, mit Hilfe anderer Parameter, die Zwischenschicht zu schätzen. Parameter, die hierfür genutzt werden könnten sind beispielsweise die Außentemperatur, die Regenintensität, die

Luftfeuchtigkeit oder die Taupunkttemperatur. Während die Außentemperatur unmittelbar am Fahrzeug gemessen wird und über eine Schnittstelle am CAN-Bus abgefragt werden kann, müssen die anderen genannten Daten anderweitig gewonnen werden. Im Rahmen dieses Projekts wurden dazu die Datenserver vom Deutschen Wetterdienst genutzt. Die relevanten Informationen der Wetterstationen entlang der Messstrecke werden dabei über das Internet abgerufen und direkt ins Fahrzeug übertragen. Zusätzliche Informationen, wie beispielsweise die Straßenoberflächentemperatur oder den Taupunkt wurden auf gleiche Weise von den Glättemeldeanlagen abgerufen. Auch die Nutzung von zusätzlicher Messtechnik, wie die Oberflächentemperatur vom Vaisala, wurde berücksichtigt.

Auf Basis dieser Daten wurde mit Hilfe der logistischen Regression der Zustand der Zwischenschicht abgeschätzt. Hierbei handelt es sich um ein statistisches Analyseverfahren zur Abbildung von dichotom<sup>4</sup> abhängigen Variablen. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es möglich, den Zusammenhang zwischen einzelnen Wettereinflussgrößen und der Zwischenschicht mathematisch zu beschreiben. Auf Basis dieser Beschreibung kann dann die Wahrscheinlichkeit für den Zustand der Zwischenschicht berechnet werden.

Zur Bestimmung der Zwischenschicht mittels der logistischen Regression werden zunächst die Zustände definiert, die sie einnehmen kann: „trocken“, „feucht“, „nass“, „vereist“, „verschneit“. Da aufgrund der Erhebungsregion nur selten die Zwischenschichtzustände „vereist“ und „verschneit“ aufgetreten sind, wurden diese zu einer Zwischenschicht „vereist/verschneit“ zusammengefasst.

Im nächsten Schritt muss anhand der Datenbasis entschieden werden, welche Messgröße die Zwischenschicht maßgeblich beeinflusst. Dabei haben sich nach intensiver Auswertung aller Größen die folgenden sechs Parameter als bedeutend herausgestellt. Die Robustheit der einzelnen Messgrößen wurde bereits in Kapitel 5.1 ausführlich dargestellt und soll hier nicht erneut diskutiert werden.

### **7.1.1 Messgrößen verfügbarer Quellen**

#### **Relative Luftfeuchtigkeit**

Die relative Luftfeuchtigkeit beschreibt das Verhältnis zwischen der tatsächlich enthaltenen und der maximal möglichen Menge an Wasserdampf, die die Luft aufnehmen kann. Dieser Wert ist dimensionslos und wird in der Regel in Prozent angegeben. Als Eingangsgröße für das Schätzverfahren

---

<sup>4</sup> Dichotom(griechisch: in zwei Teile gespalten): Für eine Eigenschaft gibt es genau zwei eindeutige Zustände, z.B. ja/nein, an/aus, 0/1, nass/nicht nass.

wird dieser Wert von der nächstgelegenen Wetterstation bezogen, die die Luftfeuchtigkeit in einer Höhe von 2 Metern misst.

### **Taupunktdifferenz**

Die Taupunktdifferenz ist die Differenz zwischen der Taupunkttemperatur und der Umgebungstemperatur. Die Taupunkttemperatur ist die Temperatur, bei deren Unterschreitung Wasserdampf in Form von Tau oder Nebel aus der Luft abgeschieden wird. Entsprechend beträgt die Luftfeuchtigkeit 100 %, wenn die Umgebungstemperatur gleich der Taupunkttemperatur ist.

Entsprechend gilt: Je kleiner die Differenz zwischen Taupunkttemperatur und Umgebungstemperatur ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Straßenoberfläche feucht oder nass ist. Dieser Umstand ist für die Schätzung der Zwischenschicht sehr hilfreich.

### **Wischergeschwindigkeit**

Die Wischergeschwindigkeit beschreibt mittels diskreter Zahlen, die momentane Geschwindigkeit des Scheibenwischers am Versuchsfahrzeug. Ist der Wischer inaktiv, so beträgt der Wert 33, dieser Wert kann je nach Regenintensität auf bis zu 61 steigen. Die Wischergeschwindigkeit wird unmittelbar vom Regensensor gesteuert, zeigt jedoch eine deutliche bessere Korrelation zum tatsächlichen Niederschlag als die durch den Regensensor direkt gemessene Regenintensität. So kam es im Lauf der Testfahrten mehrfach vor, dass der Regensensor eine Intensität von null angegeben hat, während es tatsächlich heftigen Niederschlag gab. Trotz des Wertes vom Regensensor war der Wischer aber aktiv, entsprechend der Regenstärke auch mit erhöhter Wischergeschwindigkeit. Zusätzlich wird die Wischergeschwindigkeit der letzten 30 s aufgezeichnet und ausgewertet, somit kann eine noch nasse Straße detektiert werden, obwohl es im Moment der Bremsung nicht mehr geregnet hat, wenn also die Wischergeschwindigkeit 33 beträgt, die Wischergeschwindigkeit der letzten 30 s jedoch größer als 33 war.

### **Umgebungstemperatur (Fahrzeug)**

Die Umgebungstemperatur ist die mit dem fahrzeugeigenen Sensor gemessene Außentemperatur der Luft.

### **Straßenzustand gemäß Glättemeldeanlage**

Die Glättemeldeanlage gibt unter Berücksichtigung zahlreicher Wetterdaten, die sie selbst erhebt, eine Aussage zum Zustand der Straßenoberfläche an. Diese kann die Zustände „trocken“, „feucht“, „nass“, „Reif“, „Schnee“ und „Eis“ einnehmen.

## 7.1.2 Zusätzlich genutzte Messsensorik

### Bodentemperatur

Die Bodentemperatur, gemessen mit dem Vaisala-Sensor, beschreibt die Temperatur der Fahrbahnoberfläche und ist im globalen Schätzmodell ein wichtiger Stellhebel.

### 7.1.3 Beschreibung der logistischen Regression

Auf Basis der durch die Testfahrten gewonnenen Datenbank wird dann für jede Wettereinflussgröße und für jeden Bremspunkt festgelegt, welcher der beschriebenen Zustände der Zwischenschicht vorhanden war. So ergibt sich beispielsweise für den Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und dem Zustand „nass“ folgende Verteilung (Abbildung 122, blaue Punkte).

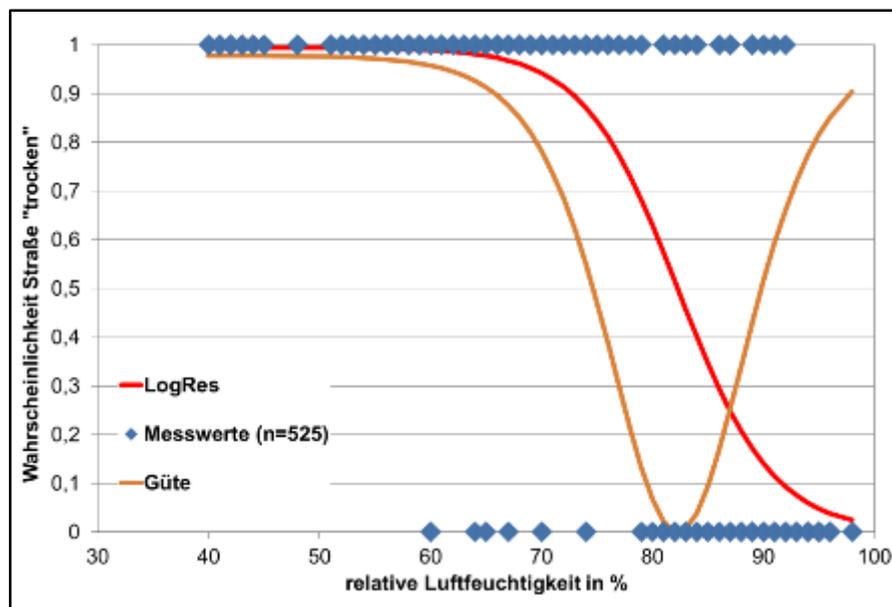


Abbildung 122: Logistische Regression für den Zusammenhang Luftfeuchtigkeit und Zwischenschichtzustand "trocken"

Basierend auf dieser Verteilung wird die Funktionsgleichung der logistischen Regression optimiert. Die Gleichung hat dabei folgende Form:

$$P(y(x)) = \frac{c}{1 + ae^{-bx}}, \quad (\text{Gl. 4})$$

wobei  $P$  die Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Zwischenschichtzustandes  $y$  ist, im dargestellten Beispiel „nass“, der seinerseits vom Wert der Eingangsgröße  $x$  abhängt, hier die relative

Luftfeuchtigkeit. Die freien Parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$  werden derart optimiert, dass der quadratische Fehler zwischen  $P$  und  $y$  minimiert wird. In Abbildung 122 ist der optimierte Kurvenverlauf der Regressionskurve dargestellt (rot). Nach [Eid, 2010] lässt sich für den Funktionsverlauf die bedingte Varianz berechnen, welche die Prognoseunsicherheit angibt. Ihr Wertebereich liegt zwischen 0 und 0,25. Wird dieser Wert normiert und das Reziprok gebildet, so ergibt sich eine funktionale Aussage zur Güte  $G$  der berechneten Wahrscheinlichkeit (orange), mit

$$G(y(x)) = \frac{1}{4P(1-P)} \tag{Gl. 5}$$

Entsprechend dieser Gleichungen würde sich für das in Abbildung 123 gezeigte Beispiel für eine Luftfeuchtigkeit von 91 % eine Eintrittswahrscheinlichkeit für den Zwischenschichtzustand „trocken“ von 22 % ergeben, diese Aussage hätte eine Güte von 0,3.

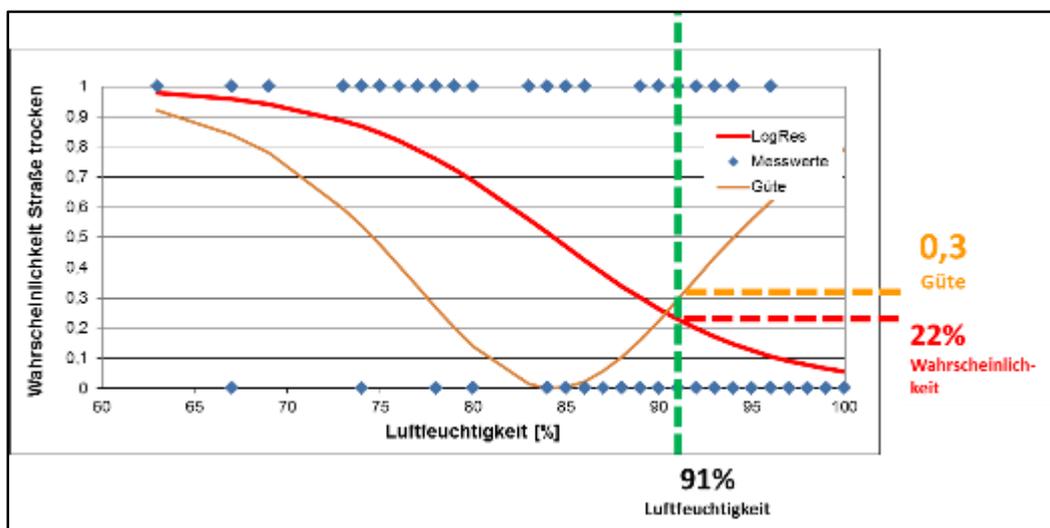


Abbildung 123: Eintrittswahrscheinlichkeit und Güte des Zwischenschichtzustands „trocken“ in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit

In gleicher Art und Weise wird für alle Zustände der Zwischenschicht und für alle berücksichtigten Parameter verfahren, sodass sich bei 4 Zuständen und 6 Eingangsgrößen insgesamt 36 optimierte Regressionsfunktionen mit zugehöriger Gütefunktion ergeben. Die zugehörigen Kurven für alle diese Kombinationen sind in Anhang 10.5 dargestellt, wobei die Eingangsgröße „Bodentemperatur“ beim lokalen Modell von Berlin und Brandenburg nicht berücksichtigt wurde..

Um eine Aussage zur Eintrittswahrscheinlichkeit einer Zwischenschicht in Abhängigkeit der Eingangsgrößen zu erhalten, werden alle Einzelwahrscheinlichkeiten berechnet und mit ihrer jeweils zugehörigen Güte gewichtet:

$$\bar{P}_{k,j} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{k,j}(y_j(x_i)) \cdot G_{k,j}(y_j(x_i))}{\sum_{i=1}^n G_{k,j}(y_j(x_i))}, \quad (\text{Gl. 6})$$

wobei  $n$  die Anzahl der berücksichtigten Eingangsgrößen ist,  $x_i$  entspricht der jeweiligen Eingangsgröße,  $y_j$  ist der Zwischenschichtzustand und  $k$  ist die Nummer des jeweiligen Bremspunktes.

Der Zustand  $y_j$  mit der höchsten berechneten Wahrscheinlichkeit ist die geschätzte Zwischenschicht. Dabei ist die Zwischenschichtschätzung umso verlässlicher, je größer  $P_{k,j}$  ist.

In Abbildung 124 ist diese Auswertung für ausgewählte Eingangsgrößen für einen konkreten Bremsversuch dargestellt. Bei diesem war der Wischer an (Wischergeschwindigkeit = 33,04), die Luftfeuchtigkeit betrug 91 %, die Taupunktdifferenz lag bei 1,64 °C und der Straßenzustand wurde von der nächstgelegenen GMA als „feucht“ klassifiziert. Entsprechend der oben dargestellten Berechnung ergab sich die größte Eintrittswahrscheinlichkeit  $P=95,02$  für den Zwischenschichtzustand feucht-nass.

		Trocken		Feucht-Nass	
		Wert	Güte	Wert	Güte
<b>Wischergeschwindigkeit</b>	33,04	0,02	0,91	0,93	0,73
<b>Luftfeuchtigkeit in %</b>	91,00	0,07	0,74	0,93	0,93
<b>Taupunktdifferenz in °C</b>	1,64	0,03	0,88	0,94	0,76
<b>Straßenzustand</b>	feucht	0,09	0,65	0,92	0,71
		<b>P = 4,98</b>		<b>P = 95,02</b>	

Abbildung 124: Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit für bestimmten Zwischenschichtzustand mit ausgewählten Stellhebeln

Im Laufe des Aufbaus des Regressionsmodells hat es sich als sinnvoll erwiesen im ersten Schritt zunächst nur zwischen „trocken“ und „feucht/nass/verschneit“ zu unterscheiden, da sich diese Unterscheidung mit einer sehr hohen Trefferquote umsetzen ließ. Im zweiten Schritt wurde dann zwischen „feucht“ und „nass/verschneit“ unterschieden und im letzten Schritt wurden die Fälle aus dem Bereich „nass/verschneit“ einzeln aufgeteilt, im Anschluss daran erfolgt eine Abfrage, um eine passende Reibwertspanne zuzuordnen (Abbildung 128).

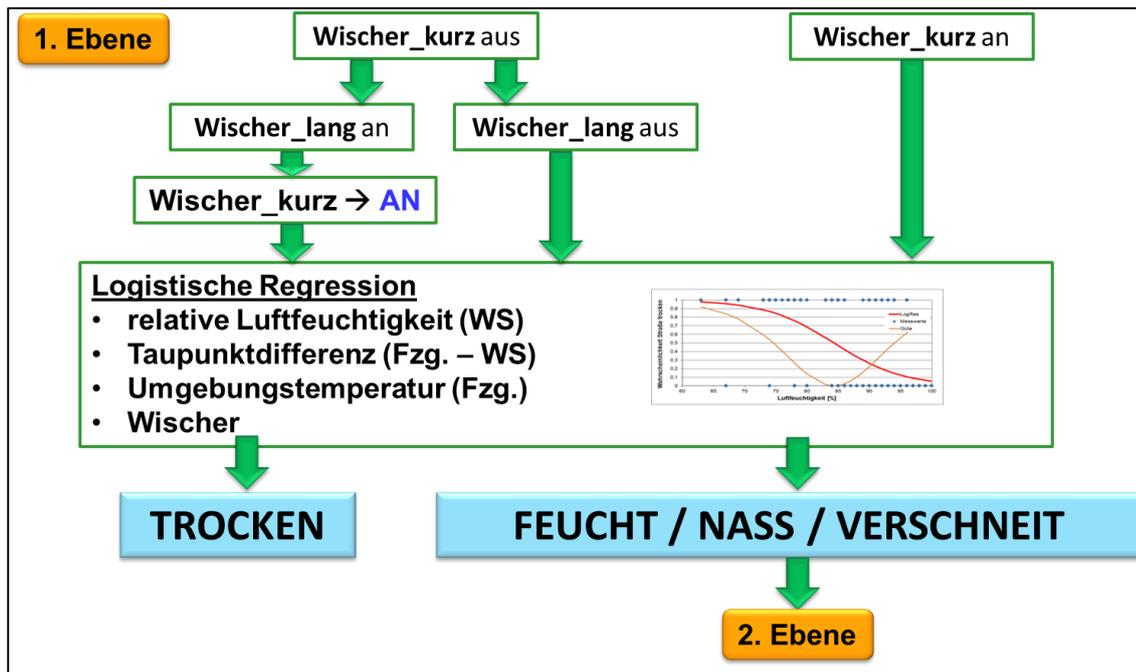


Abbildung 125: Aufbau des Schätzmodells in drei Ebenen; Funktionsweise der ersten Ebene

In der ersten Ebene wird zwischen den Zwischenschichtzuständen „trocken“ und „feucht/nass/verschneit“ unterschieden. Liegt die Wischergeschwindigkeit bei 33, ist der Wischer also im Moment der Bremsung nicht aktiv gewesen, wird überprüft ob der Wischer in den letzten 30s aktiv gewesen ist oder nicht. War der Wischer in den letzten 30s an, so wird der Parameter des kurzen Wischers ebenfalls auf aktiv gesetzt. In der ersten Ebene werden für die logistische Regression die Parameter der relativen Luftfeuchtigkeit gemäß der Wetterstation, der Taupunktdifferenz von Fahrzeug und Wetterstation, der Umgebungstemperatur des Fahrzeugs, sowie der Wischeraktivität genutzt (Abbildung 125). Im globalen Modell wird an dieser Stelle ebenfalls die Oberflächentemperatur des Vaisalas berücksichtigt, welche im lokalen Modell nicht von Nutzen ist. Abschließend kann in der ersten Ebene eine Entscheidung getroffen werden, ob die Zwischenschicht „trocken“ oder „feucht/nass/verschneit“ ist. Ist die Zwischenschicht „trocken“ endet die Schätzung und es kann nach weiteren Abfragen eine Reibwertspanne ausgegeben werden (Abbildung 128). Ist die Zwischenschicht hingegen „feucht/nass/verschneit“ werden die Parameter in einer zweiten logistischen Regression nach „feucht“ und „nass/verschneit“ getrennt (Abbildung 126).

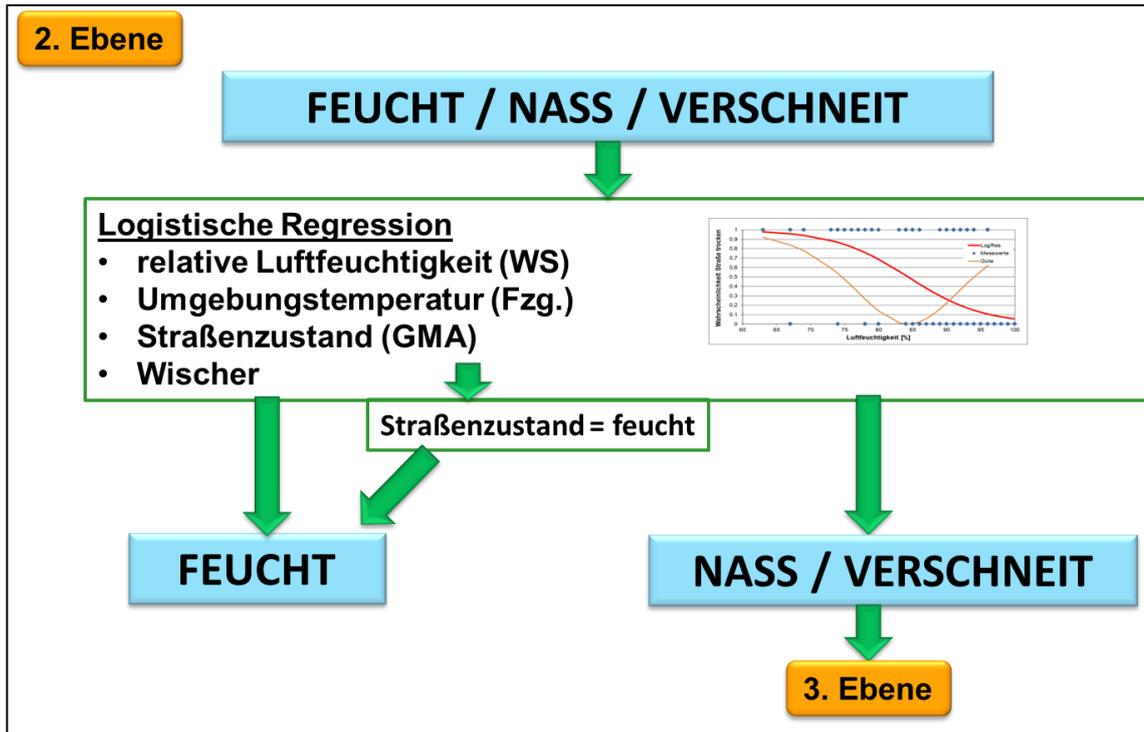


Abbildung 126: Aufbau des Schätzmodells in drei Ebenen; Funktionsweise der zweiten Ebene

In der zweiten Ebene werden für die logistische Regression ebenfalls die relative Luftfeuchtigkeit gemäß Wetterstation, die Umgebungstemperatur, sowie die Wischergeschwindigkeit genutzt. Die Taupunktdifferenz führt in der zweiten Ebene zu Fehlern und wurde nicht berücksichtigt, dafür wird der Straßenzustand gemäß Glättemeldeanlage mit einbezogen, in der logistischen Regression, sowie als Schalter nach der logistischen Regression. Ist das Ergebnis aus der logistischen Regression der zweiten Ebene „feucht“, so endet die Schätzung der Zwischenschicht und es kann eine Reibwertspanne ausgegeben werden, ebenfalls endet die Schätzung, wenn die Glättemeldeanlage „feucht“ als Straßenzustand ausgibt (Tabelle 2). Das Modell schätzt aufgrund der geringen Anzahl von Feuchtfällen nur in den seltensten Fällen „feucht“. Der Straßenzustand der Glättemeldeanlage gibt zuverlässig den Zustand „feucht“ aus, so dass sich auf diesen bezogen werden kann. Ist das Ergebnis der Schätzung der zweiten Ebene „nass/verschneit“ folgt eine weitere logistische Regression in der dritten Ebene.

In der dritten Ebene wird zwischen den Zuständen „nass“ und „verschneit“ unterschieden. Die logistische Regression beinhaltet die Stellhebel: relative Luftfeuchtigkeit gemäß der Wetterstation, Umgebungstemperatur des Fahrzeugs, Taupunktdifferenz zwischen Fahrzeugtemperatur und Taupunkttemperatur der Wetterstation, Wischergeschwindigkeit, Straßenzustand gemäß Glättemeldeanlage (Abbildung 127).

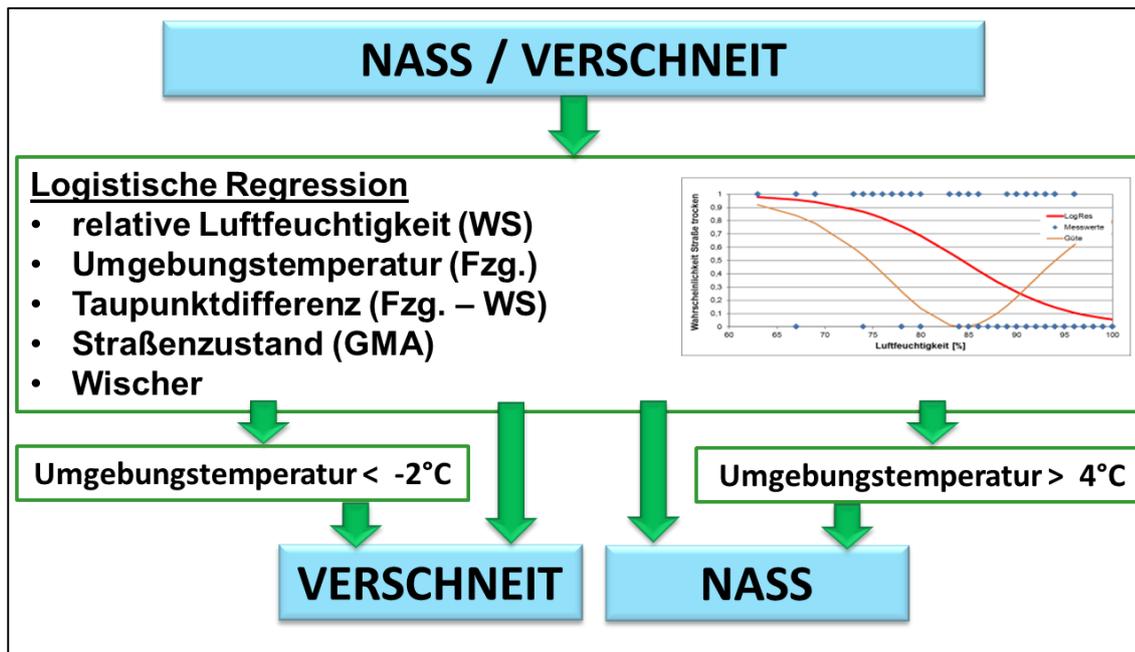


Abbildung 127: Aufbau des Schätzmodells in drei Ebenen; Funktionsweise der dritten Ebene

Außerdem wird der Zwischenschichtzustand bezüglich der Umgebungstemperatur eingeteilt. Im lokalen Modell ist das Ergebnis „verschneit“, wenn die Umgebungstemperatur unter  $-2^{\circ}\text{C}$  liegt und „nass“, wenn die Umgebungstemperatur über  $4^{\circ}\text{C}$  liegt. Bei den Temperaturen zwischen  $-2^{\circ}\text{C}$  und  $4^{\circ}\text{C}$  entscheidet die logistische Regression, ob das Ergebnis der dritten Ebene „verschneit“ oder „nass“ ist. Im Anschluss folgt die Schätzung des Reibwertpotentials, welche in Kapitel 7.2 vorgestellt wird.

Als Datengrundlage für die Schätzung der Zwischenschicht wurden die zu einem bestimmten Stichtermin erhobenen Daten genutzt, diese umfassen für das lokale Schätzmodell ausschließlich die Messdaten von Berlin und Umgebung ( $n=1.471$ ). Da alle Messgrößen einen unterschiedlichen Datenumfang besitzen, beispielsweise gab es, aufgrund einer defekten Glättemeldealage, weniger Werte zum Straßenzustand gemäß Glättemeldealage, als von der Umgebungstemperatur am Fahrzeug, wurden von jeder Messgröße individuell 80% der Datenmenge zum Aufbau des Schätzmodells und insbesondere für die Optimierung der Regressionskurven genutzt.

Dabei wurde nur auf Datensätze zurückgegriffen, die für alle Eingangsgrößen valide Daten enthielten. Messfahrten, bei denen beispielsweise keine oder nachweislich fehlerhafte Daten der GMA vorlagen, wurden entsprechend nicht berücksichtigt.

Die Modellgüte wurde anschließend mit den verbleibenden 20 % der Messdaten ( $n=295$ ) bewertet. Dafür wurde für diese Fälle mittels des Schätzverfahrens die Zwischenschicht geschätzt. Anschließend wurde die geschätzte Zwischenschicht mit der tatsächlich beobachteten Zwischenschicht verglichen. Dabei zeigt sich, dass in rund 87 % der Fälle die Zwischenschicht richtig geschätzt wurde, in 13 Fällen

wurde eine Zwischenschicht mit einem höheren Reibwert geschätzt, als er im Versuch vorhanden war. Beispielsweise wurde die Zwischenschicht „trocken“ geschätzt, tatsächlich was es aber zum Zeitpunkt der Bremsung „nass“. Diese Fehlerart wurde als Fehler 1 klassifiziert. Diese Art von Fehleinschätzung bedeutet, dass im Sinne des Reibwerts ein besserer Straßenzustand geschätzt wird, als er tatsächlich vorhanden ist. Diese Fehlleistung stellt somit ein Sicherheitsrisiko dar und muss im Verlauf der weiteren Verbesserung des Schätzalgorithmus' ausgeschlossen werden.

In weiteren sechs Fällen wurde ein Zustand geschätzt, der schlechter ist, als er im realen Versuch tatsächlich war. Diese Ergebnisse wurden als Fehler 2 benannt und beschreiben einen Zustand, der ein höheres Sicherheitsverhalten nach sich ziehen würde, als er tatsächlich erforderlich wäre.

Als Fehler 3 wurden Fehleinschätzungen benannt, bei denen die Zwischenschicht entweder als „nass“ geschätzt wurde, während sie „feucht“ war oder bei denen sie als „feucht“ geschätzt wurde, während sie „nass“ war. Dieser Fehler trat in 13 Fällen auf (Tabelle 2: Schätzung der Zwischenschicht für die Kontrollgruppe (20% der Messdaten)

).

	n	%
<b>Richtige Schätzung</b>	256	86,78
<b>Fehler I</b>	13	4,40
<b>Fehler II</b>	6	2,03
<b>Fehler III</b>	20	6,78

Tabelle 2: Schätzung der Zwischenschicht für die Kontrollgruppe (20% der Messdaten)

Der Ansatz der Schätzung des Zustandes der Zwischenschicht mittels der logistischen Regression erweist sich als zielführend. Ein hoher Prozentsatz konnte richtig vorhergesagt werden. Das Verfahren erweist sich hinsichtlich seiner Struktur als übersichtlich und leicht nachvollziehbar. Neue Daten können leicht eingepflegt und für weitere Optimierungsschritte berücksichtigt werden.

In den nächsten Entwicklungsschritten gilt es nun die auftretenden Fehler zu unterbinden. Insbesondere Fehler 1 und Fehler 2 wären für einen Einsatz des Systems für sicherheitsrelevante Fragestellungen nicht akzeptabel.

Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass die Vorgehensweise in der Theorie auch globale Gültigkeit besitzt. Somit sollte das Modell ebenfalls für die zusätzlich erhobenen Messdaten in Schweden gute Werte liefern.

Die Auswertung der Messdaten aus Schweden mit dem für Berlin und Umgebung antrainierten Modell ergab eine Trefferquote von 14% für die Zwischenschichtschätzung. Diese niedrige Trefferquote erklärt sich anhand der angelernten Schiefeit der Datenmenge. So sind im lokalen Modell lediglich 2% der Datenmenge der Zwischenschicht „verschneit/vereist“ zuzuordnen, wohingegen in den Messdaten von Schweden rund 90% aller Fälle „verschneit/vereist“ waren. Es ist somit auch nicht möglich das Modell lediglich auf die Messdaten von Schweden anzutrainieren, da sich das Modell immer für „verschneit/vereist“ entscheiden würde. Demnach muss für ein globales Modell die Datenmenge von Schweden und von Berlin/Brandenburg zum antrainieren genutzt werden.

Das globale Schätzmodell liefert mit den gleichen Eingangsparametern, wie für das lokale Schätzmodell eine Trefferquote bei der Zwischenschichtschätzung von 76,70%. Die Bodentemperatur spielte beim lokalen Schätzmodell keine Rolle, nutzt man jedoch die Bodentemperatur des Vaisalas als zusätzliche Messgröße beim globalen Modell kann eine Trefferquote bei der Reibwertschätzung von 92,49% (n=3.548) und eine Trefferquote der Zwischenschichtschätzung von 83,21% erreicht werden.

Problematisch sind Fälle, in denen alle Wetterbeobachtungsparameter für „verschneit/vereist“ sprechen, dieser Zustand auch zutreffend wäre, wenn die Fahrbahn nicht geräumt wäre und somit der Straßenzustand „trocken“ vorherrscht.

An dieser Stelle kann vermutet werden, dass das Nutzen von verschiedenen Modellen, je nach Klimazone bessere Werte liefern würde. In der subpolaren Zone, in welcher über mehrere Wochen und Monate Frost herrscht, führt eine kurzfristige Temperaturerhöhung nicht zum Abtauen der Straße und es würde immer noch der Zustand „verschneit/vereist“ herrschen, wohingegen es in der gemäßigten Zone und vor allem in Großstädten kaum zu tagelangen Bodenfrosts kommt, sowie nur geringe Schneehöhen erreicht werden und bei kurzfristiger Temperaturerhöhungen der Zustand „verschneit/vereist“ schneller zu „nass“ wechseln kann.

## **7.2 Prognose des maximalen Reibwertbereichs auf Basis der Zwischenschichtschätzung**

Auf Basis der geschätzten Zwischenschicht kann das eigentliche Reibwertpotential prognostiziert werden. Dafür wird die aus den Versuchsfahrten gewonnene Datenbank genutzt. Je nach ermittelter Zwischenschicht kann hieraus unmittelbar unter Kenntnis der Fahrbahnoberfläche, der Reifenart und der gefahrenen Geschwindigkeit eine untere und eine obere Reibwertgrenze ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Ausprägungen ergeben sich für das aktuelle Schätzmodell 72 Möglichkeiten, für die der Reibwertbereich angegeben werden kann (Abbildung 128).



Abbildung 128: Ausprägungsvarianten für alle Stellhebel

Derzeit sind nicht alle der 72 Ausprägungen durch eine untere und eine obere Reibwertgrenze beschrieben. Das liegt zumeist daran, dass in der Datenbank nicht für alle denkbaren Kombinationen hinreichend genug (in der Regel mindestens 10) Datensätze vorliegen. So wurde beispielsweise nie auf der Autobahn mit einer Ausgangsgeschwindigkeit gebremst, die unterhalb von 50 km/h lag, auch war der Belag Kopfsteinpflaster selbstverständlich nicht auf der Autobahn anzutreffen. Wird unter Realbedingungen eine Ausprägung adressiert, für deren Auswertung keine oder zu wenig Daten vorliegen, so wird die jeweils nächst höhere Ebene ausgewertet. Liegt beispielsweise die Situation vor: *trocken, Beton, Winterreifen, Geschwindigkeit 40 km/h*, für die in der Datenbank nicht genügend Werte hinterlegt sind, so werden die Reibwertgrenzen für die Situation *trocken, Beton, Winterreifen* angegeben.

Die Aussage wird dabei mit zunehmender Kenntnis der unterschiedlichen Stellhebel verfeinert (Abbildung 129).

Stellhebel	Beispiel	maximaler Reibwert liegt zwischen
Keine Einschränkung	-	0,16 ... 1,05
Zwischenschicht	nass	0,24 ... 0,90
Oberfläche	Asphalt	0,33 ... 0,90
Reifenart	Winterreifen	0,38 ... 0,88
Geschwindigkeit	> 80 km/h	0,59 ... 0,88

Abbildung 129: Flussdiagramm zur Abschätzung der oberen und unteren Grenze des maximalen Reibwerts

Für eine Fahrt unter nassen Bedingungen auf Asphalt mit Winterreifen bei einer Geschwindigkeit größer als 80 km/h, liegt der maximale Reibwert zwischen 0,59 und 0,88. Mit einer verbleibenden Unsicherheit des maximalen Reibwerts von 0,29 ist somit eine recht präzise Prognose zum maximalen Reibwertpotential möglich.

Die Güte der Reibwertvorhersage wurde auch bewertet. Dazu wurden erneut die 295 Datensätze aus der Datenbank ausgewählt, die nicht zur Modellerstellung genutzt wurden. Für diese Fälle wurde, wie oben beschrieben, die Zwischenschicht geschätzt, anschließend wurde unter Berücksichtigung der Stellhebel „Oberfläche“, „Reifenart“ und „Geschwindigkeit“ der Bereich für den maximalen Reibwert ermittelt. Liegt der im jeweiligen Fall gemessene maximale Reibwert  $\mu_{\max}$  innerhalb der geschätzten Grenzen, so liegt das Schätzverfahren richtig. Die Auswertung dieses Vergleichs ist in Tabelle 3 dargestellt.

	n	%	Max. Abweichung
$\mu_{\max}$ liegt <b>innerhalb</b> der Prognosespanne	295	98,64	
$\mu_{\max}$ liegt <b>unterhalb</b> der Prognosespanne	4	1,36	0,11 / 0,38 / 0,06 / 0,15
$\mu_{\max}$ liegt <b>oberhalb</b> der Prognosespanne	0	0	

Tabelle 3: Vergleich der Reibwertschätzung mit realer Messung

Es zeigt sich, dass der gemessene maximale Reibwert in über 98 % der Fälle innerhalb des geschätzten Reibwertbereichs liegt. In insgesamt vier Fällen lag der gemessene Reibwert außerhalb der Schätzung,

wobei drei Werte unterhalb des Schätzbereiches lagen, der reale Reibwert war also geringer als der geschätzte Bereich, in zwei Fällen lag der gemessene Wert oberhalb der Schätzung.

Die Güte der Reibwertprognose insgesamt nimmt im Vergleich zur alleinigen Schätzung der Zwischenschicht noch mal deutlich zu. Das liegt daran, dass der geschätzte Reibwertbereich den tatsächlich gemessenen Reibwert auch dann noch beinhalten kann, wenn die Zwischenschicht nicht richtig geschätzt wurde. So kann beispielsweise die Schätzung der Zwischenschicht „trocken“ ergeben, derweil der wirkliche Zustand „feucht“ war. Dennoch war aber der gemessene maximale Reibwert so hoch, dass er immer noch innerhalb der Schätzgrenzen lag. Dieser zunächst positive Effekt tritt naturgemäß umso stärker auf, je größer der angegebene Reibwertbereich ist. Gleichzeitig reduziert sich damit aber auch die Genauigkeit der Reibwertschätzung. Die Spanne zwischen unterem und oberem maximalen Reibwert für die insgesamt 72 Ausprägungen liegt derzeit im Mittel bei 0,34. Die Spanne ergibt sich unmittelbar aus der Streuung der Messergebnisse und kann durch das Verfahren selbst zunächst nicht beeinflusst werden. Um an dieser Stelle zukünftig genauer zu werden, müssen weitere Einflussgrößen identifiziert und berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung von Pollen (siehe Kapitel 5.4) kann dafür ein Beispiel sein.

Die Schätzung der unteren und oberen Grenzen des maximalen Reibwerts durch die beschriebene Methodik erweist sich als vielversprechend. Die richtige Schätzung des Reibwerts in über 98 % der Fälle zeigt das Potential des entwickelten Verfahrens. Wie beschrieben muss in weiteren Verbesserungsschritten zunächst die Schätzung der Zwischenschicht verbessert und erweitert werden. Weiterhin gilt es weitere Stellhebel zu identifizieren, die den Reibwert beeinflussen, um so die Streuung zu reduzieren und die Spanne der Reibwertgrenzen zu verkleinern.

### **7.3 Bewertung der Verlässlichkeit des Verfahrens**

Im vorherigen Kapitel wurde dargestellt, dass das Verfahren zur Schätzung des maximalen Reibwerts unter den gegebenen Bedingungen sehr gute Ergebnisse liefert. Es stellt sich allerdings die naheliegende Frage welche Ergebnisse zu erwarten sind, wenn einzelne Datenquellen zeitweise oder dauerhaft keinen Input liefern. So zeigte sich beispielsweise im Testbetrieb immer wieder, dass die nahe der Teststrecke gelegene GMA zum Teil über mehrere Tage keine oder sogar falsche Daten bereitstellt. Gleiches kann natürlich auch für die Wetterstation gelten.

Die Wichtung der einzelnen Stellhebel ist sehr unterschiedlich (s. Abbildung 130). Für den Fall des globalen Schätzmodells haben vorrangig die Eingangsgrößen des Straßenzustands der GMA, der Wischergeschwindigkeit und der Bodentemperatur einen Einfluss auf die Schätzung. Die gleichen Ergebnisse sind auch beim lokalen Schätzmodell zu sehen, führen jedoch nicht zu solch starken

Differenzen, des Weiteren spielen im lokalen Modell die Bodentemperatur und die Umgebungstemperatur keine entscheidende Rolle.

Schätzmodell	n	% richtig	Ohne Stellhebel: Wischergeschwindigkeit	n	% richtig
Schätzung der Zwischenschicht	3192	83,21	Schätzung der Zwischenschicht	2990	77,95
$\mu_{max}$ liegt innerhalb der Prognosegrenzen	3548	92,49	$\mu_{max}$ liegt innerhalb der Prognosegrenzen	3399	88,61
Ohne Stellhebel: Relative Luftfeuchtigkeit	n	% richtig	Ohne Stellhebel: Wischergeschwindigkeit 30s	n	% richtig
Schätzung der Zwischenschicht	3123	81,41	Schätzung der Zwischenschicht	3091	80,60
$\mu_{max}$ liegt innerhalb der Prognosegrenzen	3486	90,88	$\mu_{max}$ liegt innerhalb der Prognosegrenzen	3468	90,43
Ohne Stellhebel: Taupunktdifferenz	n	% richtig	Ohne Stellhebel: Temperatur	n	% richtig
Schätzung der Zwischenschicht	3155	82,25	Schätzung der Zwischenschicht	3130	81,58
$\mu_{max}$ liegt innerhalb der Prognosegrenzen	3534	92,15	$\mu_{max}$ liegt innerhalb der Prognosegrenzen	3496	91,13
Ohne Stellhebel: Straßenzustand	n	% richtig	Ohne Stellhebel: Bodentemperatur	n	% richtig
Schätzung der Zwischenschicht	2865	74,71	Schätzung der Zwischenschicht	2952	76,98
$\mu_{max}$ liegt innerhalb der Prognosegrenzen	3263	85,06	$\mu_{max}$ liegt innerhalb der Prognosegrenzen	3326	86,73

Abbildung 130: Bewertung der Verlässlichkeit bei fehlenden Stellhebeln

Ebenfalls untersucht wurde, wieviel besser die Schätzung wird, wenn man lediglich auf Sensoren am Fahrzeug zurückgreift. Für die Auswertung wurde somit die relative Luftfeuchtigkeit, der Taupunkt und die Bodentemperatur vom Vaisala zusätzlich zu den vom Fahrzeug stammenden Parametern genutzt. Auf den Datensatz angewandt, in welchen alle Vaisala-Daten vollständig vorlagen (n=2.266) lag die Trefferquote für die Zwischenschicht bei 83,58% und für die Reibwertschätzung bei 91,79%.

## 7.4 Echtzeitschätzung des maximalen Reibwerts

Das in den vorherigen Kapiteln vorgestellte Schätzverfahren wurde anschließend derart erweitert, dass eine Schätzung des aktuellen Reibwerts im Fahrzeug ermöglicht wird. Dazu waren grundsätzliche Weiterentwicklungen zur Datenbeschaffung und -auswertung notwendig.

Während die Daten der Glättemeldeanlagen und Wetterstationen bisher online über einen ftp-Server abgerufen und ausgewertet wurden, musste das für die Echtzeitschätzung automatisiert und mobil im Fahrzeug ermöglicht werden. Dazu wurde über das Mobilfunksystem eine Verbindung zum Datenserver über das Internet aufgebaut und die relevanten Daten in regelmäßigen Abständen auf

den Versuchsrechner im Fahrzeug geladen. Dort werden die benötigten Informationen automatisiert ausgelesen und dem Schätzverfahren zur Verfügung gestellt. Fahrzeugseitige Informationen, wie die Außentemperatur, die Fahrzeuggeschwindigkeit oder die Aktivität des Scheibenwischers werden über eine Schnittstelle zum CAN-Bus direkt abgerufen und ebenfalls direkt dem System zur Verfügung gestellt.

Für den Algorithmus zur Reibwertschätzung ist es ebenfalls wichtig, Kenntnis über den Straßenbelag zu haben, auf dem sich das Fahrzeug derzeit befindet. Dafür wurde auf dem Messrechner des Fahrzeugs eine digitale Karte hinterlegt. Für die gesamte Messstrecke wurde dafür der Belag erfasst. In Abhängigkeit von der aktuellen Position, die über ein GPS-Signal bekannt ist, kann so ermittelt werden, auf welcher Fahrbahnoberfläche sich das Fahrzeug derzeit befindet. Die Echtzeitschätzung funktioniert somit derzeit entlang der Teststrecke, kann aber jederzeit auf weitere Abschnitte erweitert werden. Dazu ist eine entsprechende Erweiterung der digitalen Karte notwendig, des Weiteren hat der Fahrer die Möglichkeit die aktuelle Fahrbahnoberfläche händisch auszuwählen.

Eine automatische Übertragung der derzeit verwendeten Reifenart ist bisher noch nicht im Versuchsfahrzeug implementiert. Der Versuchsfahrer muss den Reifentyp manuell eintragen. Da eine Kommunikation zwischen Rad und Fahrzeug zur Reifenfülldrucküberwachung bereits heute in vielen Fahrzeugen erfolgt, ist es gut vorstellbar, dass über diesen Weg zukünftig auch Informationen zum Reifentyp übermittelt werden.

Liegen dem Programm zur Reibwertschätzung alle benötigten Informationen vor, so kann es daraus unmittelbar eine Abschätzung des unteren und oberen maximalen Reibwerts durchführen. Diese werden dem Fahrer über ein Display angezeigt (Abbildung 131).

 <b>Asphalt</b>	---	 <b>Trocken</b>	<b>1</b>	<b>maximaler Reibwert</b> 0.82	aktueller Bremspunkt	0
 <b>Beton</b>	---	 <b>Feucht</b>	---	<b>minimaler Reibwert</b> 0.54	Luftfeuchte Wetterst.	57
 <b>Kopfstein</b>	<b>1</b>	 <b>Nass</b>	---	<b>gemessener Reibwert</b> 0.7783	Taupunktdifferenz GMA	0.6
 <b>Brücke</b>	---	<b>Fahrzeug-Längsbeschl.</b>		0.0374	Straßenzustand GMA	1
					Sommerreifen	1
					Winterreifen	---
					Geschwindigkeit	0
					Bremsdruck	4
					Wischergeschwindigk.	33
					Breitengrad	52.5..
					Längengrad	13.3..
					sichtbare Satelliten	3
					Abstand zur Route	317

Abbildung 131: Darstellung der aktuellen Reibwertgrenzen (0,54 ... 0,82) und weiterer Messwerte

Zu Kontroll- und Überwachungszwecken werden dem Fahrer weitere Informationen angezeigt. Das sind Daten, die die aktuelle Wettersituation beschreiben und für die Schätzung der Zwischenschicht benötigt werden (Luftfeuchtigkeit, Taupunktdifferenz, Straßenzustand gemäß GMA) und der daraus geschätzte Zwischenzustand selbst, in diesem Fall „trocken“. Weiterhin werden Daten zum Fahrzeugzustand und zur Fahrzeugposition angezeigt (Fahrgeschwindigkeit, Bremsdruck, Wischergeschwindigkeit, Position gemäß GPS Sensor, die Straßenoberfläche und der ausgewählte Reifentyp). Außerdem wird die Nummer des nächstliegenden Bremspunktes dargestellt, sofern dieser weniger als 50 Meter entfernt ist und dort die gleiche Oberfläche wie am aktuellen Ort vorhanden ist. Für die zukünftige Optimierung des Schätzverfahrens kann durch die Kenntnis des Abstandes zu einem bestimmten Bremspunktes eine individuellere und damit genauere Angabe der Reibwertgrenzen umgesetzt werden. Zur Kontrolle der geschätzten Reibwertgrenzen wird auch der gemessene maximale Reibwert der letzten Bremsung angezeigt. Liegt dieser Wert innerhalb der Grenzen, so war die Schätzung richtig.

Das Verfahren zur Echtzeitschätzung zeigt zunächst eine sehr gute und verlässliche Funktionalität. Die Zuverlässigkeitswerte, die sich bereits im Prognoseverfahren gezeigt haben (s. Kapitel 7.2), ließen sich auf das Echtzeitverfahren übertragen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Forschungsprojekt „Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen“ wurden über 4.200 Datensätze erzeugt und in einer umfassenden Datenbank zum maximalen Reibwert und seinen Einflussgrößen abgelegt. Die Datenbank beinhaltet Datensätze für den Zwischenschichtzustand „trocken“, „feucht“, „nass“, „verschneit“ und „vereist“. Für zahlreiche Stellgrößen wie Reifenart, Fahrgeschwindigkeit, Wetterparameter, Straßenoberfläche etc. lässt sich aus dieser Datenbank ableiten, wie sie den maximalen Reibwert beeinflussen und ggf. durch andere Parameter verändert werden. Dieses Wissen kann für zukünftige Untersuchungen zum Thema Reibwert und alle damit verbundenen Themen genutzt werden.

Eine Untersuchung zum Unfallgeschehen hat ergeben, dass mindestens 3,6 % der Verkehrstoten in Deutschland auf Unfälle zurückzuführen sind, die durch Glätte verursacht wurden, fast 14.000 Menschen wurden dabei verletzt. Die Gefahr bei einem Glätteunfall tödlichen zu verunglücken ist um den Faktor 2,7 höher im Vergleich zum sonstigen Unfallgeschehen. Weiterhin hat sich gezeigt, dass bei rund 20 % aller Verkehrsunfälle Glätte eine Rolle spielte, auch wenn sie nicht als hauptverursachendes Unfallmerkmal identifiziert wurde. Aus diesen Zahlen geht eindrücklich hervor, wie groß der Nutzen einer verlässlichen Reibwertschätzung sein kann. Nutznießer wären dabei nicht nur die Fahrzeuginsassen, sondern auch ungeschützte Verkehrsteilnehmer außerhalb des Fahrzeugs.

Im vorgestellten Forschungsprojekt wurde daher ein Verfahren entwickelt, welches das Reibwertpotential zwischen Reifen und Fahrbahn schätzt. Grundlage dieses Verfahrens ist die Auswertung von zahlreichen Messgrößen, die den Reibwert beeinflussen. Diese Größen sind frei verfügbar, wie zum Beispiel die Daten von Wetterstationen oder Glättemeldeanlagen oder sie basieren auf fahrzeugseitiger Sensorik, die standardmäßig in heutigen Pkw verbaut ist, wie beispielsweise das Außenthermometer oder der Regensensor. Somit ist das Verfahren mit heutigen Serienfahrzeugen ohne zusätzliche Sensorik umsetzbar. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich das Modell, beim globalen Einsatz, mit zusätzlichen Informationen über die Oberflächentemperatur deutlich verbessern ließe.

Für die Schätzung des Reibwertpotentials wird zunächst der Zustand der Zwischenschicht, (trocken, feucht, nass, ...) mit Hilfe der logistischen Regression geschätzt. Dabei handelt es sich um ein statistisches Analyseverfahren, welches die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Zustände basierend auf beliebig vielen Eingangsgrößen berechnet. Anschließend werden die Grenzen für das maximale und minimale Reibwertpotential genauer definiert, indem weitere Kenngrößen, wie die Fahrgeschwindigkeit, die Fahrbahnoberfläche oder die Reifenart, berücksichtigt werden. Je detaillierter die Kenntnis über die einzelnen Größen ist, desto besser kann der Bereich beschränkt werden.

Die Analyse des beschriebenen Verfahrens zur Schätzung des Reibwertpotentials zeigt deutlich, dass eine verlässliche Prognose des maximalen Reibwerts in gewissen Grenzen ohne zusätzliche Sensorik möglich ist. In über 97 % aller Fälle lag der gemessene maximale Reibwert innerhalb der geschätzten Grenzen. In knapp 2 % der Testbremsungen lag der gemessene Wert unterhalb der geschätzten Grenzen, bei 1 % lagen die Grenzen der Schätzung unterhalb des gemessenen Wertes. Die maximale Abweichung zwischen Schätzbereich und Messwert lag bei maximal 0,14.

Auch wenn die Zuverlässigkeit der Schätzung des Reibwertpotentials bereits sehr hoch ist, so muss diese weiter verbessert werden, um als verlässliche Eingangsgrundlage für hochautomatisierte Fahrfunktionen genutzt zu werden. Gleiches gilt für die Verkleinerung des geschätzten Bereichs für den maximalen Reibwert. Auch seine Reduzierung ist ein zentrales Ziel für die Weiterentwicklung des Schätzverfahrens. Dieser Bereich ergibt sich aus realen Messwerten und kann nur durch die Berücksichtigung zusätzlicher Stellhebel oder durch die genauere Bestimmung der jeweiligen Stellhebel erfolgen. Die Robustheit des Verfahrens wurde schon für Einzelfälle erfolgreich getestet, sollte allerdings noch intensiver untersucht werden. Die Frage nach der Verlässlichkeit der Schätzung bei fehlenden Informationen ist dabei ebenfalls von Bedeutung.

Der Einsatz von numerischen Wettersimulationsmethoden oder ähnlichen Verfahren versprechen einen zusätzlichen Mehrwert für das Schätzverfahren. Je nach Auflösung können darüber auch sehr lokale Einflüsse des Wetters berücksichtigt werden. Die Prognosefähigkeit solcher Verfahren ermöglicht außerdem nicht nur eine Schätzung des Reibwertpotentials zum momentanen Zeitpunkt. Mit Hilfe der Wettersimulation können darüber hinaus Prognosen zum maximalen Reibwert in der Zukunft erstellt werden. Das kann einerseits für die unmittelbar bevorstehende Fahrstrecke gelten, was eine rechtzeitige Warnung vor kritischen Situationen erleichtert. Andererseits kann bei hinreichendem Vorlauf auch die Fahrstrecke gezielt in Abhängigkeit vom zu erwartenden Reibwertpotential geplant und optimiert werden.

Die häufig diskutierte Möglichkeit, dass zukünftige Fahrzeuge untereinander oder mit der Umwelt kommunizieren (C2X), wird für die Reibwertschätzung weitere Möglichkeiten eröffnen. Messungen oder Schätzungen von unterschiedlichen Fahrzeugen an verschiedenen Positionen können der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt werden. Daraus können flächendeckende Karten zum aktuellen Reibwertpotential entstehen, von denen sowohl andere Verkehrsteilnehmer als auch andere Beteiligte, beispielsweise Winterdienste, profitieren können.

## 9 Literaturverzeichnis

- [Bachmann, 1995] T. Bachmann: The importance of the integration of road, tyre and vehicle technologies. FISITA XXth World Congress, Montreal, Canada, September 1995
- [Bachmann, 1996]: Bachmann, Th.: „Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn“, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996
- [Bachmann, 1998]: Bachmann, Th.: „Wechselwirkungen im Prozeß der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn“, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1998
- [Becherer, 2000]: Becherer, Th. et al.: Der Seitenwandtorsionssensor SWT. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 102 (2000), 11, S. 946
- [Breuer, 1992]: Breuer, B., Eichhorn, U. and J. Roth: Measurement of tyre/road friction ahead of the car and inside the tyre. Proceedings of AVEC'92 (International Symposium on Advanced Vehicle Control), pages 347-353, 1992
- [Breuer, 2000] Breuer, B., Bartz, M., Karlheinz, B., Gruber S., Semsch, M., Strothjohann, T. and C. Xie: 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
- [BreuerBill, 2003]: B. Breuer und K.H. Bill (Hrsg.)(2003): Bremsenhandbuch. Wiesbaden: Vieweg&Sohn Verlag, 1 Auflage
- [Blackvue, 2014] Pittasoft Co.,Ltd. Produkthandbuch mit technischen Daten und Produktbeschreibung. [http://www.blackvue.de/wp-content/uploads/2014/11/DR750LW-2CH\\_Manual\\_DE\\_WEB\\_Ver.2.00\\_150114.pdf](http://www.blackvue.de/wp-content/uploads/2014/11/DR750LW-2CH_Manual_DE_WEB_Ver.2.00_150114.pdf) , Letzter Abruf: 22.01.2016
- [Blackvue, 2015] Dashcam Reviews. Testbericht veröffentlicht am 20.07.2015, <http://dashcamreviews.net/blackvue-dr650gw-2ch-dual-channel-dashcam-review/> , Letzter Abruf: 22.01.2016
- [Breitenbücher, 2010] R. Breitenbücher, B.-Y. Youn: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Ruhr Universität Bochum, 2010
- [Brückert, 2012]: M. Brückert, F. Gauterin und H-J. Unrau: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2012
- [BSR1, 2016]: <http://www.bsr.de/9672.html>; Berliner Stadtreinigungsbetriebe: Winterdienst. Stand: 06.01.2016

- [BSR2, 2015]: Screenshot aus der Winterdienst-Software der Berliner Stadtreinigungsbetriebe
- [Chen et al., 2011]: Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., et al.: The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 31(2), 273-288. doi: DOI 10.1002/joc.2158, 2011
- [Chen et al., 2014]: Chen, F., Yang, X. C., & Zhu, W. P.: WRF simulations of urban heat island under hot-weather synoptic conditions: The case study of Hangzhou City, China. *Atmospheric Research*, 138, 364-377. doi: DOI 10.1016/j.atmosres.2013.12.005, 2014
- [Continental, 2011]: o.A.: „Grundlagen Nassgriff“, Continental AG, Hannover, 2011; [http://www.continental-reifen.de/generator/www/de/de/continental/reifen/themen/news/meldungen/2011\\_launch\\_event/download/CSC\\_5\\_nassgriff.pdf](http://www.continental-reifen.de/generator/www/de/de/continental/reifen/themen/news/meldungen/2011_launch_event/download/CSC_5_nassgriff.pdf); letzter Zugriff: 04.07.2015
- [CORINE, 2015]: <http://www.corine.dfd.dlr.de/>, Stand: 20.05.2015
- [Daniels et al., 2015]: - Daniels, E. E., Hutjes, R. W. A., Lenderink, G., et al.: Land Surface Feedbacks on Spring Precipitation in the Netherlands. *Journal of Hydrometeorology*, 16(1), 232-243. doi: Doi 10.1175/Jhm-D-14-0072.1, 2015
- [DESTATIS, 2015]: DESTATIS (Statistisches Bundesamt): „Fachserie 8 Reihe 7 Verkehrsunfälle 2014“, Juli 2015 (in German); Wiesbaden 2015
- [Dieckmann, 1992] T. Dieckmann: Assessment of road grip by way of measured wheel variables. *Proceedings of FISITA '92 Congress, London, GB, 2:75-81, June 7-11 1992. "Safety of the Vehicle and the Road"*
- [DIN, 2011]: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren. Teil 4: Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen: Der Pendeltest; Deutsche Fassung, DIN EN 13036-4:2011-12, S. 6 f.
- [DWD1, 2016]: [https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/presse/zahlen\\_und\\_fakten.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/presse/zahlen_und_fakten.pdf?__blob=publicationFile&v=5); Deutscher Wetterdienst: Pressemitteilung 2015. Stand: 06.01.2016
- [DWD2, 2016]: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/stationsuebersicht.html?lsbld=526270>; Deutscher Wetterdienst: Stationsliste. Stand: 06.01.2016
- [DWD\_P1, 2016]: <http://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrendizespollen/gefahrendindexpollen.html> Deutscher Wetterdienst: Pollenflug-Gefahrenindex. Stand: 06.01.2016

[DWD\_P2, 2016]:

<http://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrendizespollen/erklaerungen.html?nn=16102&lsbld=463856> Deutscher Wetterdienst: Einstufung der Belastungsintensitäten. Stand: 06.01.2016

[DWD\_P3, 2016]:

[http://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrendizespollen/Pollenmessung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrendizespollen/Pollenmessung.pdf?__blob=publicationFile&v=2) Deutscher Wetterdienst: Die Pollenmessung. Stand: 06.01.2016

[Eichhorn, 1992]: Eichhorn, U. and J. Roth: Prediction and monitoring of tyre/road Friction. XXIV FISITA Congress, London, GB, 2:67-74, June 7-11 1992. "Safety of the Vehicle and the Road"

[Eichhorn, 1994]: Eichhorn, U.: „Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn - Einflußgrößen und Erkennung“, VDI-Verlag GmbH, Berlin, 1994

[Eid, 2010]: Eid, M., Gollwitzer, M., und M. Schmitt.: Statistik und Forschungsmethoden. Lehrbuch mit Online-Materialien, 1. Auflage, Weinheim, Basel, Beltz, 2010

[Fallmann et al., 2013]: Fallmann, J., Emeis, S., & Suppan, P.: Mitigation of urban heat stress - a modelling case study for the area of Stuttgart. Erde, 144(3-4), 202-216, 2013

[FgSV, 2014]: Technisches Regelwerk (Technical Rules). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen <http://www.fgsv.de/regelwerk.html>, Letzter Abruf: 19.01.2016

[Garcia-Diez et al., 2013]: Garcia-Diez, M., Fernandez, J., Fita, L., & Yague, C.: Seasonal dependence of WRF model biases and sensitivity to PBL schemes over Europe. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 139(671), 501-514. doi: DOI 10.1002/qj.1976, 2013

[GeneSys, 2015] GeneSys Elektronik GmbH: Automotive Testing Equipment. Datenblatt mit technischen Daten und Produktbeschreibung. [http://www.genesys-offenburg.de/fileadmin/user\\_upload/ProdBeschr\\_ADMA\\_rel\\_04.2015.pdf](http://www.genesys-offenburg.de/fileadmin/user_upload/ProdBeschr_ADMA_rel_04.2015.pdf) , Letzter Abruf: 22.01.2016

[GgGm1, 2012]: Überblick über die Griffigkeitsmessverfahren. Gütegemeinschaft Griffigkeitsmessungen e.V. <http://ggm-ev.de/messverfahren/messverfahren.php>, Letzter Abruf: 19.01.2016

[GgGm2, 2012]: Überblick über die Griffigkeitsmessverfahren. Gütegemeinschaft Griffigkeitsmessungen e.V. <http://ggm-ev.de/srt-pendel.php>, Letzter Abruf: 19.01.2016

[GgGm3, 2012]: Überblick über die Griffigkeitsmessverfahren. Gütegemeinschaft Griffigkeitsmessungen e.V.; <http://ggm-ev.de/messverfahren/skm.php>, Letzter Abruf: 19.01.2016

- [GgGm4, 2012]: <http://ggm-ev.de/grip-tester.php>; Überblick über die Griffigkeitsmessverfahren. Gütegemeinschaft Griffigkeitsmessungen e.V., Stand: 22.01.2016
- [GMA1, 2016]: <http://www.glaette24.de/produkte/glaettemeldeanlagen/gma-hintergrund.html>; MeteoGroup – Glätte24: Glättemeldeanlagen. Stand: 13.01.2016
- [GMA2, 2016]: Alle Informationen wurden vom Deutschen Wetterdienst in der Kostenfreien Grundversorgung als pdf zur Verfügung gestellt. Stand: 06.01.2016
- [Gustafsson, 1997]: F. Gustafsson: Slip-based tire-road friction estimation. *Automatica*, 33(6):1087-1099, June 1997
- [Halgamuge, 1993]: Halgamuge, S. K., Herpel, H.-J. and M. Glesner: Echtzeit Fahrbahnzustandserkennung mit Fuzzy-Neuronalen Netzen. In: Reusch, B. (Hg.): *Fuzzy-Logic - Theorie und Praxis*, 3. Dortmunder Fuzzy-Tage Dortmund, 7.–9. Juni 1993. Informatik Aktuell, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 204-211
- [IfM, 2016]: <http://www.geo.fu-berlin.de/met/service/pollenflugkalender/pollenfalle.html>
- [JSC, 2016] <http://www.izovoltas.com/en/kontaktai/> JSC „IZOVOLTAS“: Airport equipment. Stand: 03.02.2016]
- [Kangas et al.,2015]: Kangas, M., Heikinheimo, M., Hippi, M., (2015). RoadSurf: a modelling system for predicting road weather and road surface conditions, *Meteorol. Appl.*, 22, 544–553.
- [Kfz, o.J.]: o.A.: „8.10 Sicherheit“, TU Berlin, FG Kraftfahrzeuge, Modul Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, Berlin, 2014; [https://isis.tu-berlin.de/pluginfile.php/125771/mod\\_resource/content/0/8.10%20Sicherheit.pdf](https://isis.tu-berlin.de/pluginfile.php/125771/mod_resource/content/0/8.10%20Sicherheit.pdf); letzter Zugriff: 04.06.2015
- [Kiencke, 1994]: Kiencke, U. and A. Daiß: Estimation of tyre friction for enhanced ABS systems. *Proceedings of AVEC'94*, 1994
- [Köppen, 2015]: Köppen, M.: „Vermessung der Oberflächenrauigkeit an definierten Bremspunkten mittels Skid-Tester“; Bachelorarbeit 02/15; Technische Universität Berlin, ILS, FG Kraftfahrzeuge; Berlin, August 2015
- [Lauffer, 2002] Prof. Joachim Lauffer: Ermittlung der Griffigkeit von Verkehrsflächen mittels Kfz-Datenspeicherung, Fachhochschule Konstanz, Forschungsbericht: <http://opus.htwg-konstanz.de/frontdoor/index/index/docId/60>, Stand: 22.01.2016
- [Lee et al., 2011]: Lee, S. H., Kim, S. W., Angevine, W. M., et al.: Evaluation of urban surface parameterizations in the WRF model using measurements during the Texas Air Quality Study

- 2006 field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(5), 2127-2143. doi: DOI 10.5194/acp-11-2127-2011, 2011
- [Lex, 2015]: Lex, C., Eichberger, A. and W. Hirschberg: On-board determination of the friction coefficient between tire and road using standard-application vehicle dynamics sensors. Graz University of Technology, Austria, 24th international Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, August 17-21, 2015, Graz, Austria
- [Li et al., 2013]: Li, D., Bou-Zeid, E., Barlage, M., Chen, F., & Smith, J. A., (2013). Development and evaluation of a mosaic approach in the WRF-Noah framework. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 118(21), 11918-11935. doi: 10.1002/2013jd020657
- [Liao et al., 2014]: Liao, J. B., Wang, T. J., Wang, X. M., et al.: Impacts of different urban canopy schemes in WRF/Chem on regional climate and air quality in Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Research*, 145, 226-243. doi: DOI 10.1016/j.atmosres.2014.04.005, 2014
- [Lindenmann, 2010]: H.P. Lindenmann und N. Leemann: Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen. ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT). Forschungsbericht, 2010
- [Liu et al., 2006]: Liu, Y. B., Chen, F., Warner, T., & Basara, J.: Verification of a mesoscale data-assimilation and forecasting system for the Oklahoma City area during the Joint Urban 2003 field project. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(7), 912-929. doi: Doi 10.1175/Jam2383.1, 2006
- [Loridan et al., 2010]: Loridan, T., Grimmond, C. S. B., Grossman-Clarke, S., et al.: Trade-offs and responsiveness of the single-layer urban canopy parametrization in WRF: An offline evaluation using the MOSCEM optimization algorithm and field observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(649), 997-1019. doi: DOI 10.1002/qj.614, 2010
- [LS1, 2014]: <http://www.ls.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.384223.de>; Landesbetrieb Straßenwesen: Straßenlängen im Land Brandenburg in der Zuständigkeit des LS. Stand: 08.12.2014
- [LS2, 2014]: <http://www.ls.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.384229.de> Landesbetrieb Straßenwesen: Reihenfolge/Prioritäten im Winterdienst. Stand: 08.12.2014
- [Martilli et al., 2002]: Martilli, A., Clappier, A., & Rotach, M. W.: An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, 104(2), 261-304. doi: Doi 10.1023/A:1016099921195, 2002

- [MitschkeWallentowitz, 2004]: M. Mitschke, H. Wallentowitz, 2004: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Heidelberg: Springer-Verlag, 4. Auflage[MG, 2016]: <http://www.glaette24.de/produkte/glaettemeldeanlagen/gma-hintergrund.html>; MeteoGroup, Glätte24: Technik einer Glättemeldeanlage. Stand: 20.01.2016
- [Müller, 2001]: Müller, S., Uchanski, M. and J.K. Hedrick: Slip-based tire-road friction estimation during braking. Proceedings of IMECE'01 (2001 ASME International Engineering Congress and Exposition), November 11-16 2001
- [Müller, 2016]: Müller, G., Müller S: Comparison of standardised roughness measurement methods and friction potential tests under real conditions, Reports of the ESAR 2016, 7th International Conference, "Experts Symposium on Accident Research", Hannover, Germany, 9.-10.Juni 2016
- [Papangelis et al., 2012]: Papangelis, G., Tombrou, M., Dandou, A., & Kontos, T.: An urban "green planning" approach utilizing the Weather Research and Forecasting (WRF) modeling system. A case study of Athens, Greece. Landscape and Urban Planning, 105(1-2), 174-183. doi: DOI 10.1016/j.landurbplan.2011.12.014, 2012
- [Pasterkamp1, 1997]: Pasterkamp, W. and H. Pacejka: Application of Neural Networks in the Estimation of Tire/Road Friction Using the Tire as Sensor. SAE Technical Paper 971122, 1997, DOI: 10.4271/971122
- [Pasterkamp2, 1997]: Pasterkamp, W. and H. Pacejka: The Tyre as a Sensor to Estimate Friction. In: Vehicle System Dynamics, 1997, Vol. 27, No. 5-6, pp. 409-422, DOI: 10.1080/00423119708969339
- [ReimpellSponagel, 1986]: J. Reimpell, P. Sponagel (Hrsg.) (1986): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder. Würzburg: Vogel Verlag, 1. Auflage
- [Ryu et al., 2011]: Ryu, Y. H., Baik, J. J., & Lee, S. H.: A New Single-Layer Urban Canopy Model for Use in Mesoscale Atmospheric Models. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50(9), 1773-1794. doi: Doi 10.1175/2011jamc2665.1, 2011
- [San Jose et al., 2013]: San Jose, R., Perez, J. L., & Gonzalez, R. M.: Using Wrf/Ucm and Cmaq Mesoscale Models with Very High Resolution over European Urban Cities. Fresenius Environmental Bulletin, 22(12c), 3815-3822, 2013
- [Sac, 2008]: SACR Zürich AG: Skiddometer – Griffigkeitsmessgerät. [http://www.sacr.ch/de/pdf.php?pdf=Zusa\\_2008\\_Skiddo.pdf](http://www.sacr.ch/de/pdf.php?pdf=Zusa_2008_Skiddo.pdf), Letzter Abruf: 20.01.2016
- [Salamanca et al., 2010]: Salamanca, F., & Martilli, A.: A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations-part II. Validation with one

- dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3-4), 345-356. doi: DOI 10.1007/s00704-009-0143-8, 2010
- [Salamanca et al., 2011]: Salamanca, F., Martilli, A., Tewari, M., & Chen, F.: A Study of the Urban Boundary Layer Using Different Urban Parameterizations and High-Resolution Urban Canopy Parameters with WRF. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(5), 1107-1128. doi: Doi 10.1175/2010jamc2538.1, 2011
- [Sohrabinia et al., 2012]: Sohrabinia, M., Rack, W., & Zawar-Reza, P.: Analysis of MODIS LST Compared with WRF Model and in situ Data over the Waimakariri River Basin, Canterbury, New Zealand. *Remote Sensing*, 4(11), 3501-3527. doi: 10.3390/rs4113501, 2012
- [Szénási, 2013]: Szénási, B.: Evaluierung des Modells COSMO-CLM mit der Double-Canyon Effects Parametrization für die Berliner Temperaturwerte. (Bachelor), FU Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, 2013
- [TÜV, 2016]: <http://www.schniering.com/messsysteme> TÜV Rheinland Schniering: Messsysteme. Stand: 03.02.2016
- [Urban, 2010]: Urban Atlas: from <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas/>, 2010
- [Vaisala, 2010] Vaisala: Vaisala Surface Patrol HD Pavement Temperature and Humidity Sensor with Display DSP200 Series, Data Sheet <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datashets/DSP200-Surface-Patrol-HD-Datasheet-B210978EN-A-LOW.pdf> , Letzter Abruf: 22.01.2016
- [Wan et al., 2008]: Wan, Z., & Li, Z. L.: Radiance-based validation of the V5 MODIS land-surface temperature product. *International Journal of Remote Sensing*, 29(17-18), 5373-5395. doi: 10.1080/01431160802036565, 2008
- [Wan et al., 2004]: Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., & Li, Z. L.: Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 261-274. doi: 10.1080/0143116031000116417, 2004
- [Wang et al., 2011]: Wang, Z. H., Bou-Zeid, E., Au, S. K., & Smith, J. A.: Analyzing the Sensitivity of WRF's Single-Layer Urban Canopy Model to Parameter Uncertainty Using Advanced Monte Carlo Simulation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(9), 1795-1814. doi: Doi 10.1175/2011jamc2685.1, 2011
- [Warrach et al., 2013]: Warrach-Sagi, K., Schwitalla, T., Wulfmeyer, V., & Bauer, H. S.: Evaluation of a climate simulation in Europe based on the WRF-NOAH model system: precipitation in Germany. *Climate Dynamics*, 41(3-4), 755-774. doi: DOI 10.1007/s00382-013-1727-7, 2013

[Winner, 2002]: H. Winner (2002): 4. Darmstädter Reifenkolloquium. VDI Reihe 12, Nr. 511. Düsseldorf: VDI Verlag

[WRF, 2015]: WRF-Modell: <http://wrf-model.org/index.php>, Stand: 08.05.2015

[Yang et al., 2012]: Yang, B., Zhang, Y. C., & Qian, Y.: Simulation of urban climate with high-resolution WRF model: A case study in Nanjing, China. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 48(3), 227-241. doi: DOI 10.1007/s13143-012-0023-5, 2012

## 10 Anhang

### 10.1 Messverfahren zur Rauheitsmessung

Messverfahren	Messgerät	Art der Rauheitsmessung	Geschwindigkeit (km/h)	Land	Kurzbeschreibung
Skid Resistance Tester (SRT)	Mobiles Messgerät, Schwing-Pendel	Mikrorauigkeit	10	Großbritannien	Kalibriertes Pendel gleitet mit einem Gleitkörper/Reibgummi über die mit einem Wasserfilm bedeckte Messoberfläche. [GgGm2, 2012], [DIN, 2011]
Stuttgarter Reibungsmesser (SRM)	Messradanhänger (Einzelradanhänger)	Mikro- & Makrorauigkeit	30 - 90	Deutschland	Ein Europäischer Standardreifen (P.I.A.R.C.-Reifen) wird mit definierter Radlast von 3,5 kN blockiert und über Wasserfilm bedeckte Messoberfläche gezogen. [Lauffer, 2002]
Seitenkraftmessverfahren (SKM)	Messfahrzeug, Schräggestelltes Messrad (20°)	Mikro- & Makrorauigkeit	40 - 80	Großbritannien	Ein schräggestelltes Messrad (20°) wird mit Radlast 1,96 kN blockiert. Messfahrzeug sprüht ein Wasserfilm vor das Rad. Brückert, 2012], [GgGm3, 2012]
Skidometer	Dreiradanhänger mit Messrad	Mikro- & (Makro)rauigkeit	30 - 90	Schweden	Dreiradanhänger mit einem Messrad, Radlast 1,1 kN, Rad wird blockiert oder rollt unter rund 17% Schlupf ab. Messung zwischen Rollspuren und bei Wasserfilm. [Sac, 2008], [Lauffer, 2002]
Griptester	Dreiradanhänger mit Messrad	Mikrorauigkeit	30 - 90	Schottland	Messrad mit 250 N Radlast. Definierter Schlupf 15%. Zug- oder Schiebebetrieb möglich. Messauflösung 16cm [GgGm4, 2012]
Ausflussmesser nach Moore DIN EN 13036-3	Zylinderförmiges Glasgefäß	Makrorauigkeit	0	Großbritannien	Verfahren zur Beurteilung des Drainageverhaltens. Ein Glasgefäß wird mit definierter Wassermenge gefüllt. Je gröber die Oberfläche, desto schneller läuft das Wasser ab. [Brückert, 2012]
Sandfleckverfahren DIN EN 13036-1	Definierte Menge Glassand (Quarzsand)	Makrorauigkeit	0	-	Definierte Menge Quarzsand (z.B. 25cm <sup>3</sup> oder 50cm <sup>3</sup> ) wird ohne Druck kreisförmig verteilt bis die Poren der Oberfläche gefüllt sind. Über den Durchmesser der Sandfläche wird die Rautiefe ermittelt. [Breitenbücher, 2010]

Abbildung 132: Messverfahren zur Rauheitsmessung

### 10.2 Beschreibung der Bremspunkte

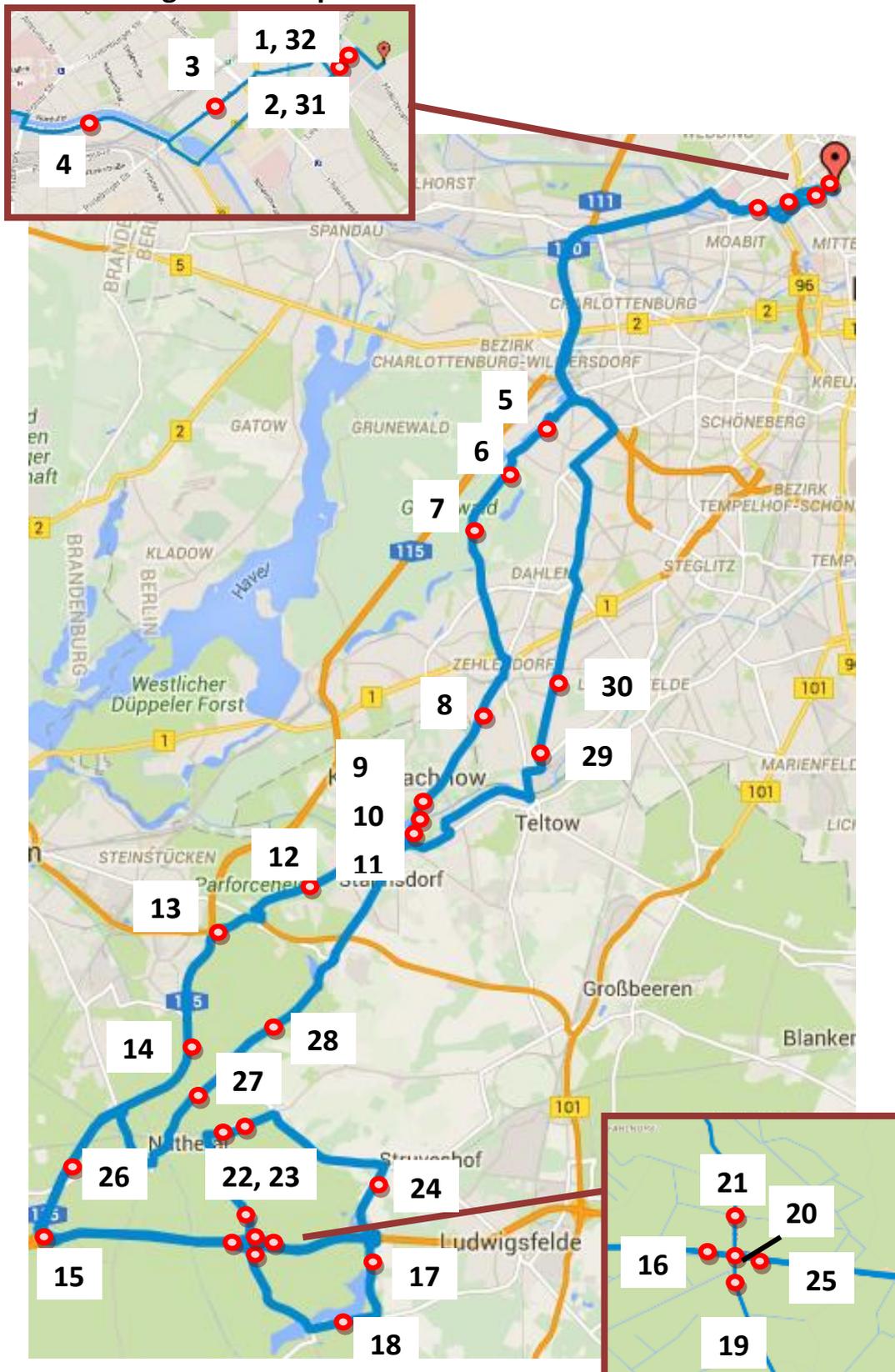


Abbildung 133: Übersicht der Messstrecke mit 32 Bremspunkten



<b>Bremspunktnummer</b>	1
<b>Straße</b>	Grenzstraße, 13355 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	1 Grenzstr.
<b>GPS Koordinaten</b>	52.543219, 13.380167
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Kopfsteinpflaster
<b>Zustand</b>	gut
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Tegel (5,60 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (30,50 km)
<b>Sonstiges</b>	-

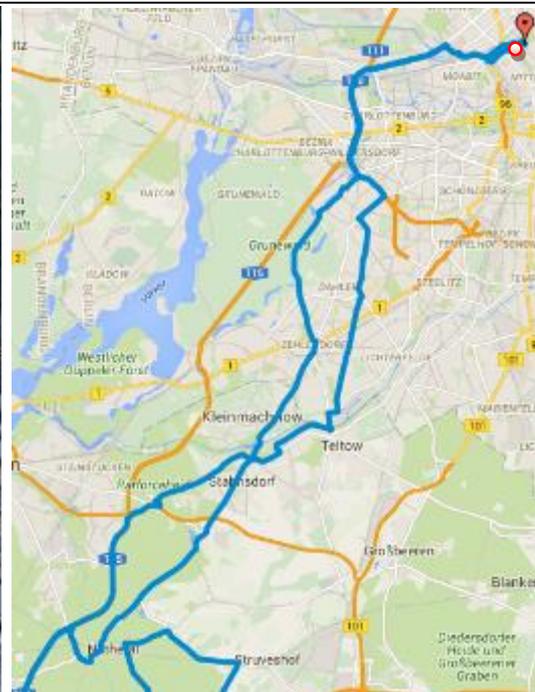
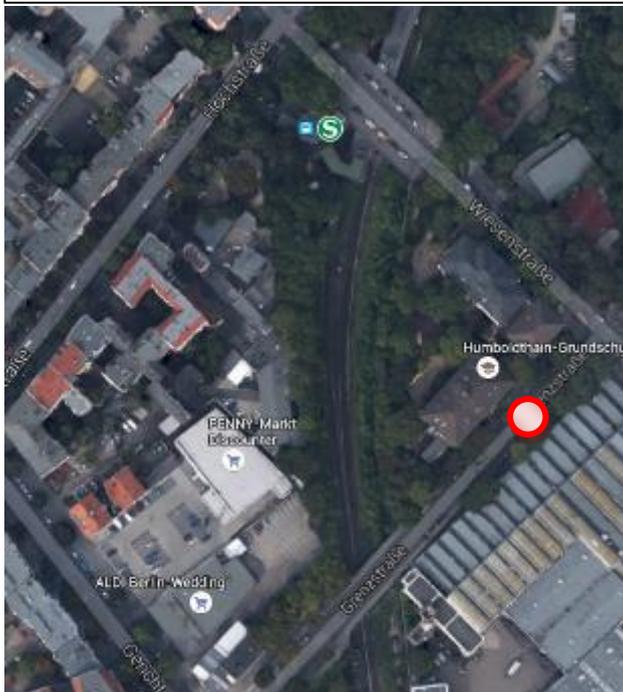


Abbildung 134: Informationen zu Bremspunkt 1



<b>Bremspunktnummer</b>	2
<b>Straße</b>	Grenzstraße, 13355 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	2 Grenzstr. (Brücke)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.542495, 13.379089
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	gut
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Tegel (5,58 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (30,48 km)
<b>Sonstiges</b>	Brücke über Bahnstrecke

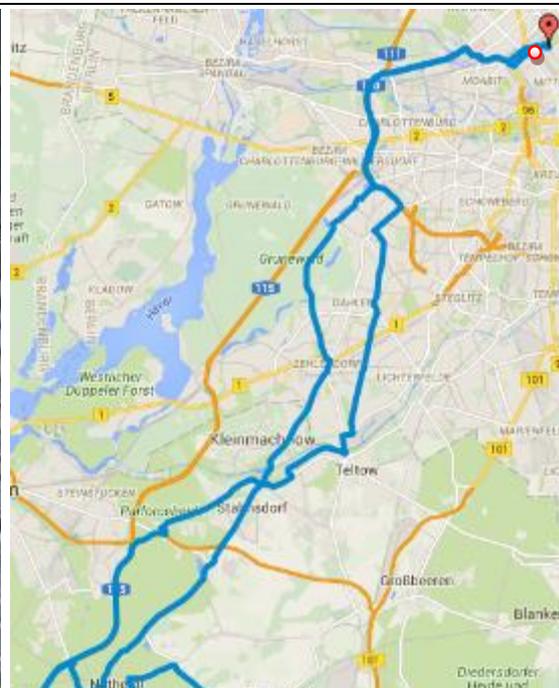
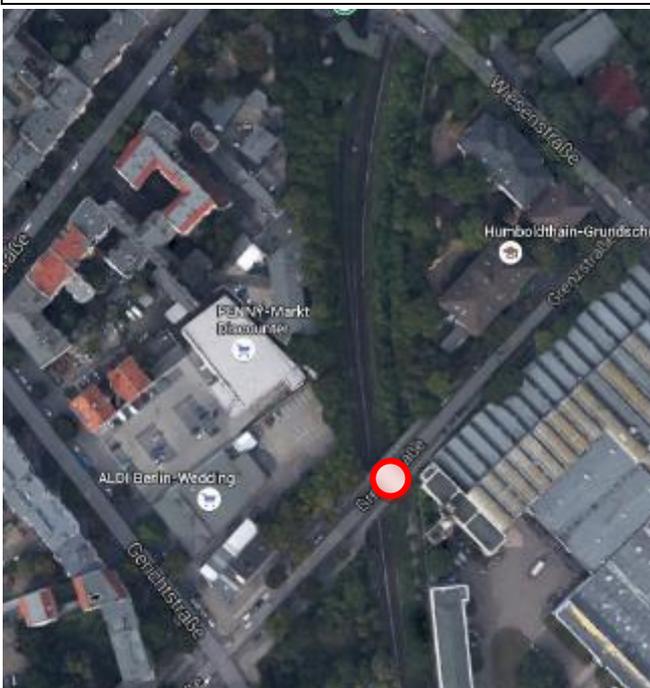


Abbildung 135: Informationen zu Bremspunkt 2



<b>Bremspunktnummer</b>	3
<b>Straße</b>	Fennstraße, 13355 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	3 Fennstr.
<b>GPS Koordinaten</b>	52.539856, 13.365587
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	50
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	mittelmäßig
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Tegel (5,04 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (29,80 km)
<b>Sonstiges</b>	Busspur

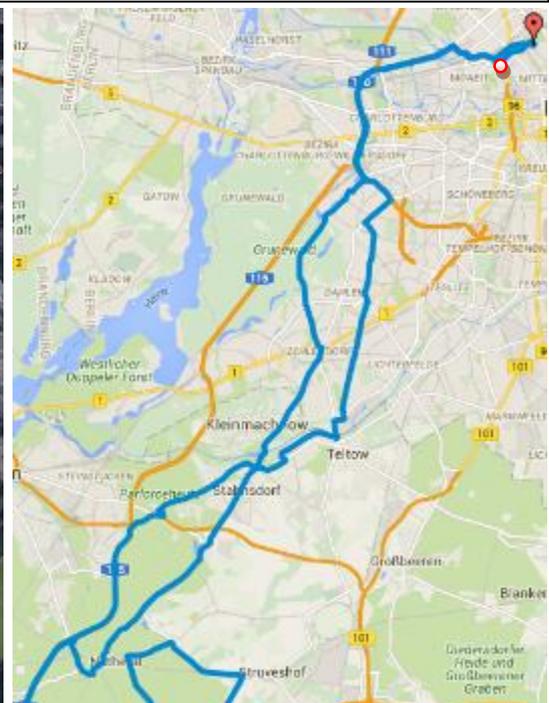


Abbildung 136: Informationen zu Bremspunkt 3



<b>Bremspunktnummer</b>	4
<b>Straße</b>	Friedrich-Krause-Ufer, 13353 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	4 Friedrich-Krause
<b>GPS Koordinaten</b>	52.538714, 13.35223
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	50
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	gut
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Tegel (4,50 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (29,32 km)
<b>Sonstiges</b>	links: Industrie; rechts: Wasser

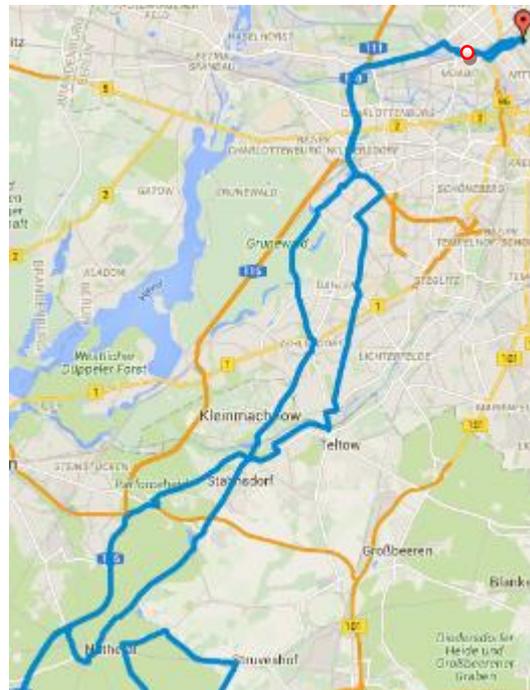
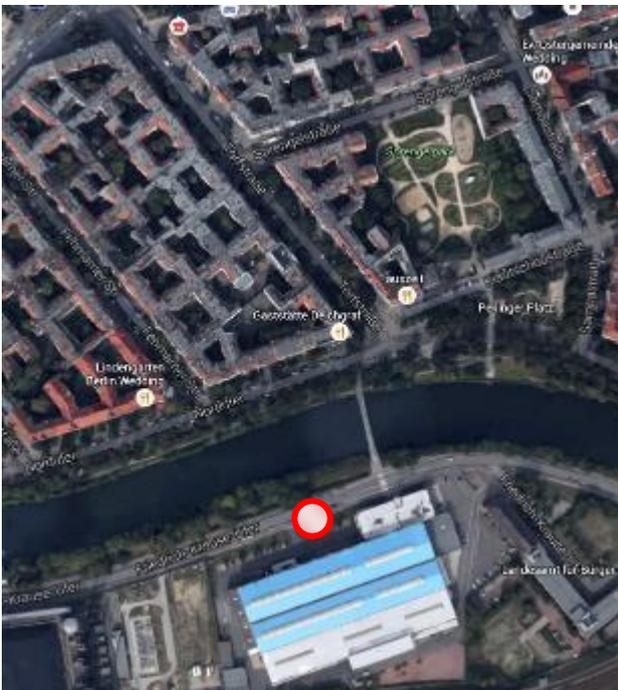


Abbildung 137: Informationen zu Bremspunkt 4



<b>Bremspunktnummer</b>	5
<b>Straße</b>	Koenigsallee, 14193 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	5 Königsallee (Brücke)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.488637, 13.2746821
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	50
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	gut
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (3,62 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (22,16 km)
<b>Sonstiges</b>	kleine Brücke

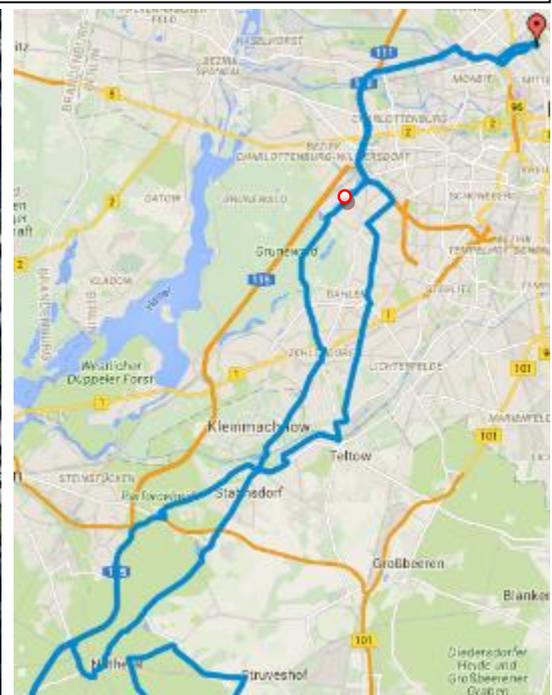
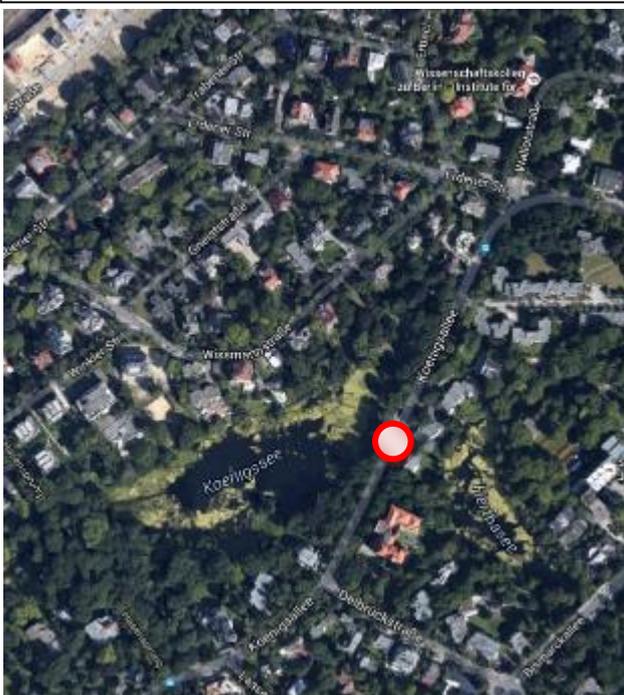


Abbildung 138: Informationen zu Bremspunkt 5



<b>Bremspunktnummer</b>	6
<b>Straße</b>	Koenigsallee, 14193 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	6 Königsallee (Wechsel)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.478474, 13.260772
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	50
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	alt
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (3,36 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (20,53 km)
<b>Sonstiges</b>	Stadt/Land Wechsel

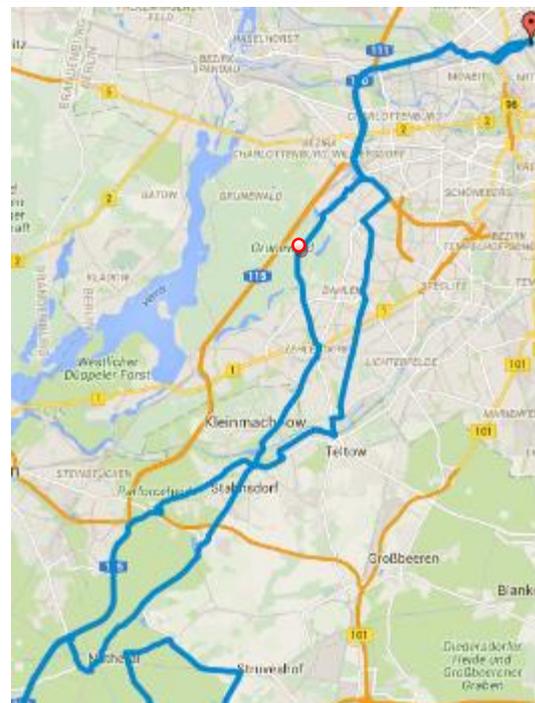
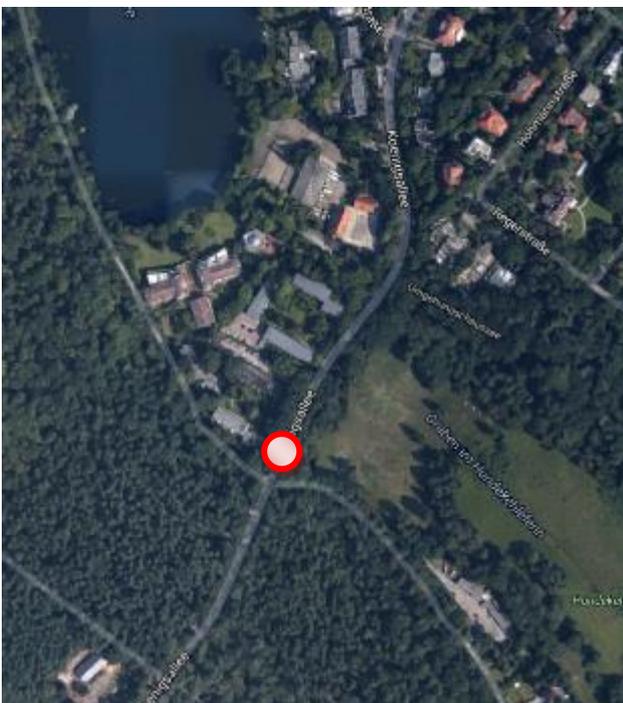


Abbildung 139: Informationen zu Bremspunkt 6



<b>Bremspunktnummer</b>	7
<b>Straße</b>	Koenigsallee, 14193 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	7 Königsallee (Wald)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.468174, 13.248364
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	50
<b>Straßentyp</b>	Waldstraße
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	alt
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (3,61 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (19,55 km)
<b>Sonstiges</b>	-

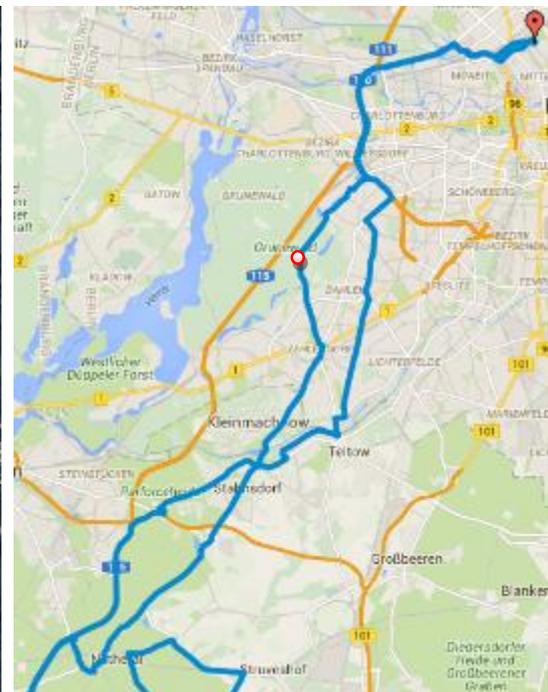
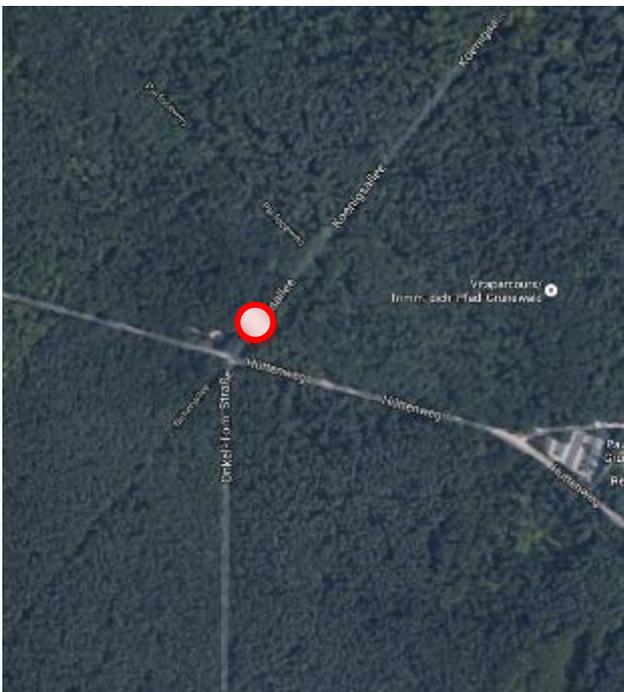


Abbildung 140: Informationen zu Bremspunkt 7



<b>Bremspunktnummer</b>	8
<b>Straße</b>	Machnower Straße, 14165 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	8 Machnower
<b>GPS Koordinaten</b>	52.41882, 13.248793
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	50
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	neu
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (5,75 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (14,30 km)
<b>Sonstiges</b>	-

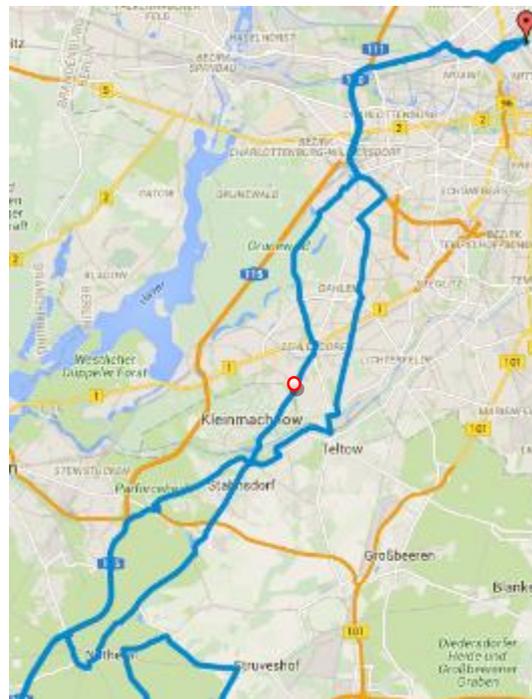
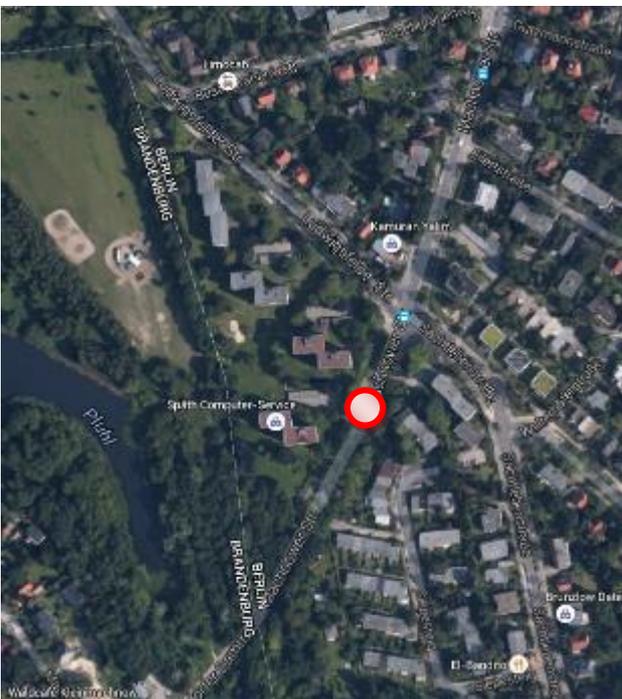


Abbildung 141: Informationen zu Bremspunkt 8



<b>Bremspunktnummer</b>	9
<b>Straße</b>	Zehendorfer D., 14532 Kleinmachnow
<b>Bremspunkt-Name</b>	9 Z.damm (vor)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.399251, 13.227164
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30
<b>Straßentyp</b>	Waldstraße
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (8,50 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (11,81 km)
<b>Sonstiges</b>	Asphalt nach Waldstück

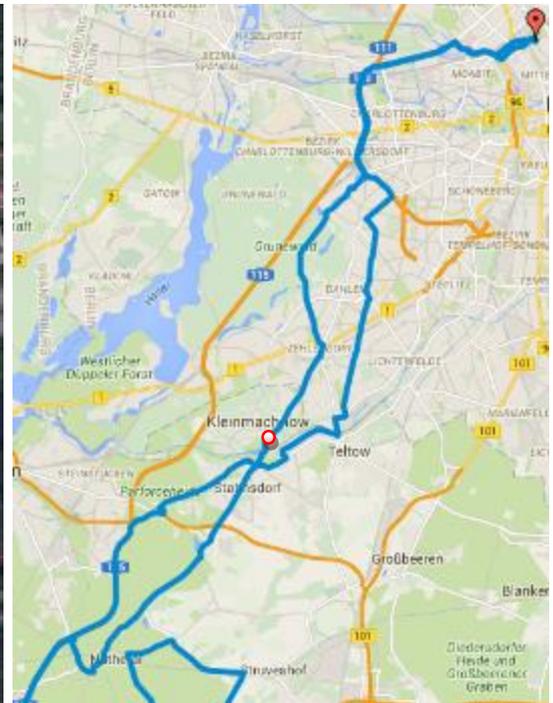
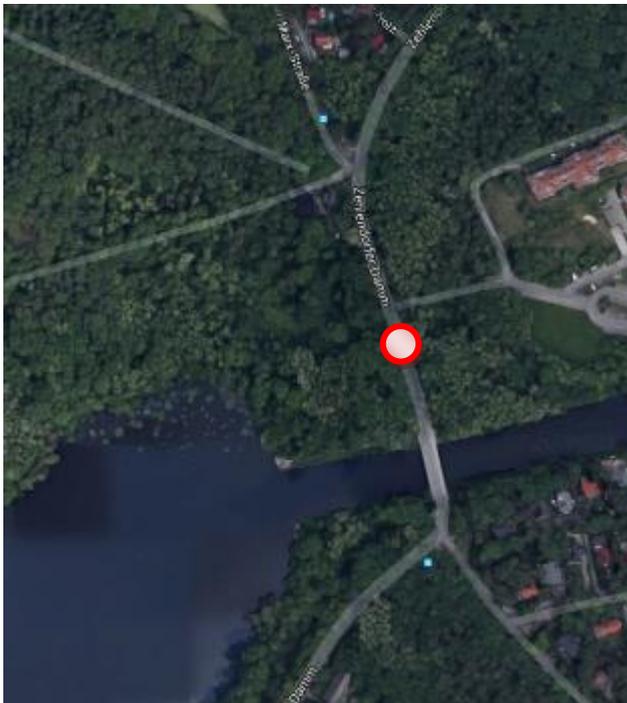


Abbildung 142: Informationen zu Bremspunkt 9



<b>Bremspunktnummer</b>	10
<b>Straße</b>	Zehlendorfer D., 14532 Kleinmachnow
<b>Bremspunkt-Name</b>	10 Z.damm (Brücke)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.398321, 13.227561
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30
<b>Straßentyp</b>	Waldstraße
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (8,50 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (11,69 km)
<b>Sonstiges</b>	Brücke über Wasser

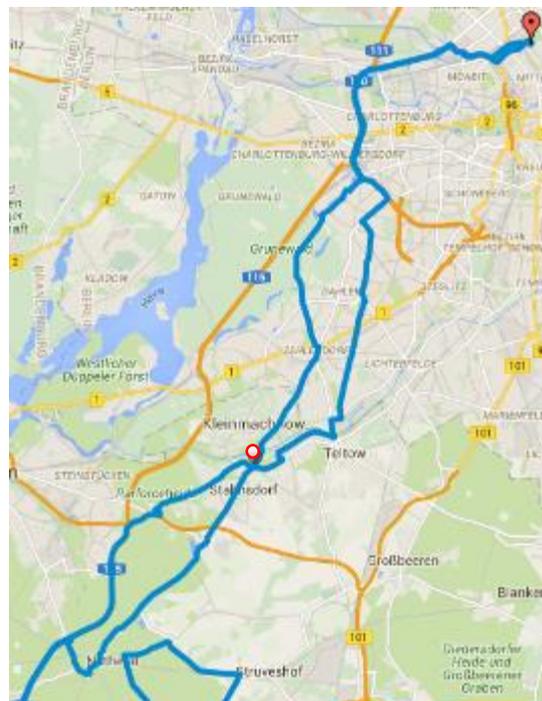
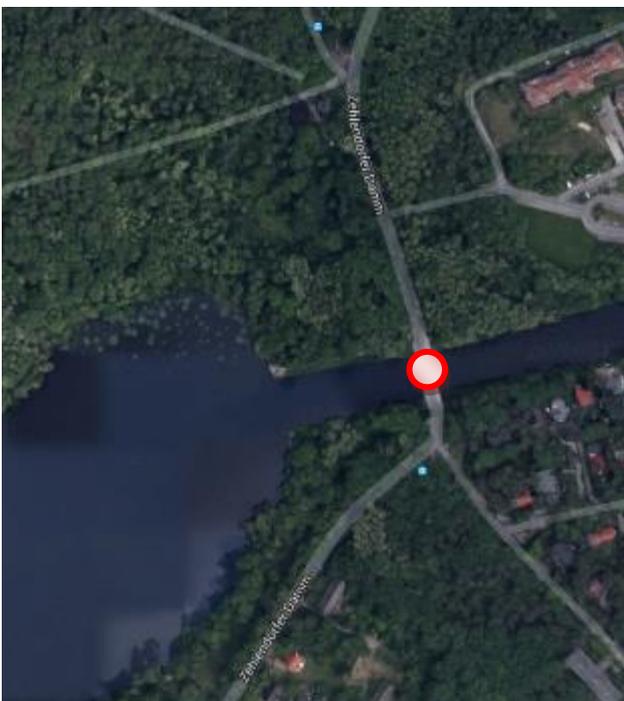


Abbildung 143: Informationen zu Bremspunkt 10



<b>Bremspunktnummer</b>	11
<b>Straße</b>	Zehendorfer D., 14532 Kleinmachnow
<b>Bremspunkt-Name</b>	11 Z.damm (nach)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.397673, 13.227314
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30
<b>Straßentyp</b>	Waldstraße
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (8,50 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (11,60 km)
<b>Sonstiges</b>	-

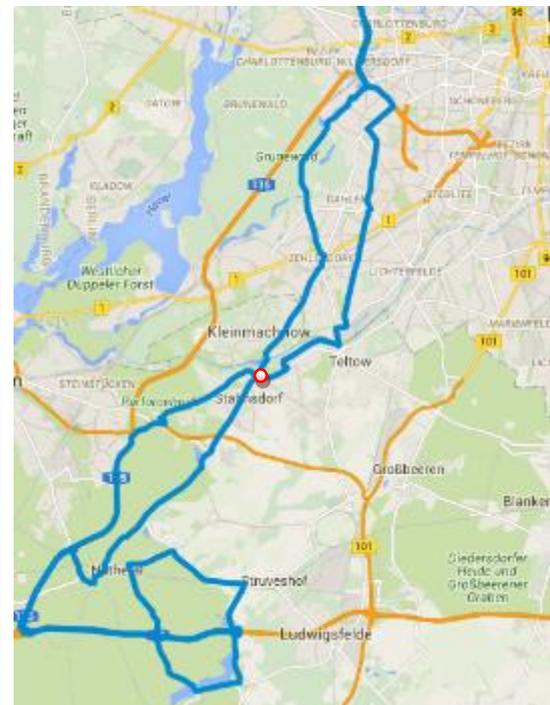
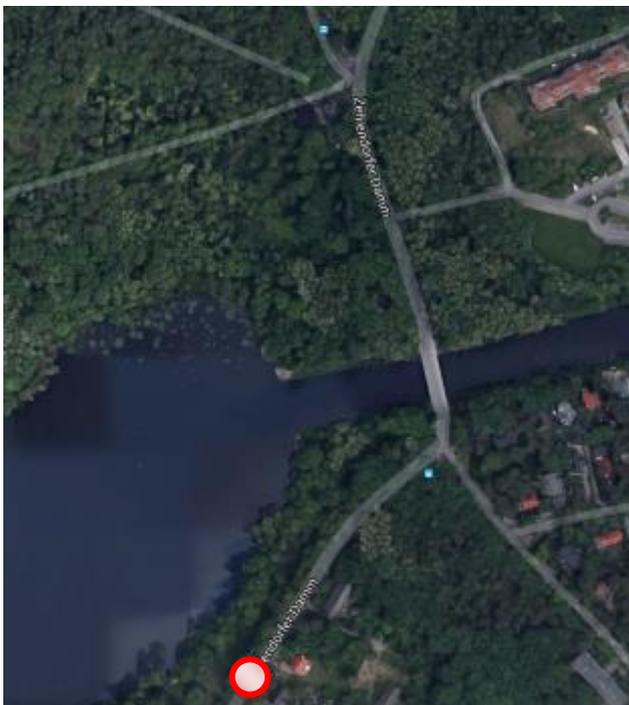


Abbildung 144: Informationen zu Bremspunkt 11



<b>Bremspunktnummer</b>	12
<b>Straße</b>	L76, 14532 Stahnsdorf
<b>Bremspunkt-Name</b>	12 Potsdamer (L76)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.381435, 13.180879
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	50
<b>Straßentyp</b>	Landstraße
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	neu
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (11,90 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (9,03 km)
<b>Sonstiges</b>	links: Feld; rechts: Wald

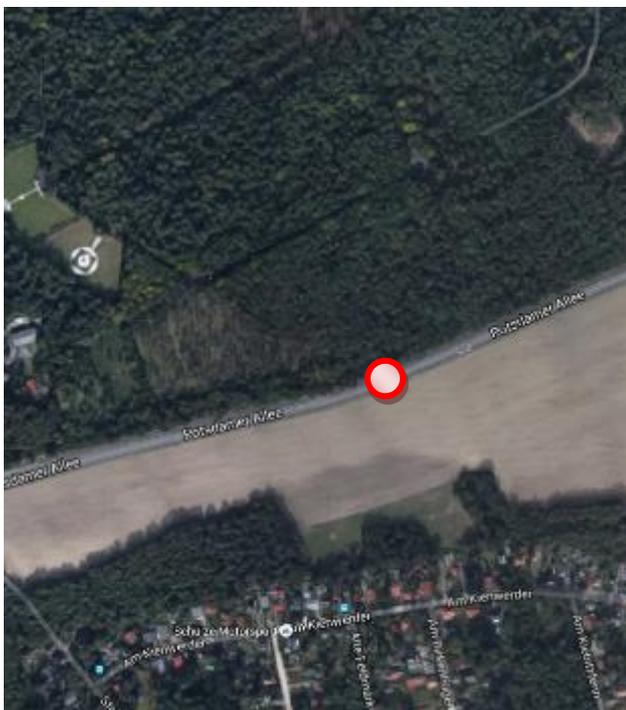


Abbildung 145: Informationen zu Bremspunkt 12



<b>Bremspunktnummer</b>	13
<b>Straße</b>	14480 Potsdam
<b>Bremspunkt-Name</b>	13 A113 (Brücke Ri. A115)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.371735, 13.15091
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	50 - 80
<b>Straßentyp</b>	Autobahn
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (14,10 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (7,91 km)
<b>Sonstiges</b>	Brücke

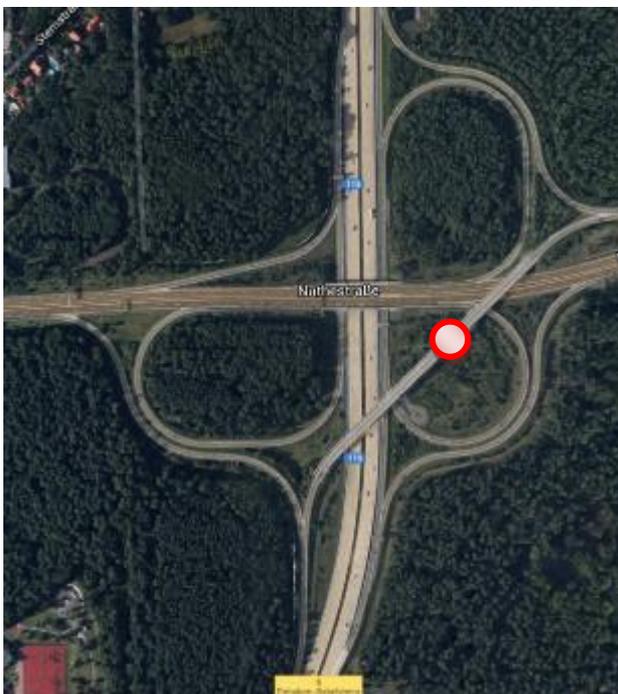


Abbildung 146: Informationen zu Bremspunkt 13



<b>Bremspunktnummer</b>	14
<b>Straße</b>	A115, 14552 Michendorf
<b>Bremspunkt-Name</b>	14 A115 (Ri. A10)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.3097326, 13.0897223 (13.1406645)
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	70 - 145
<b>Straßentyp</b>	Autobahn
<b>Straßenbelag</b>	Beton
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (16,74 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (4,86 km)
<b>Sonstiges</b>	Irgendwo auf der 115

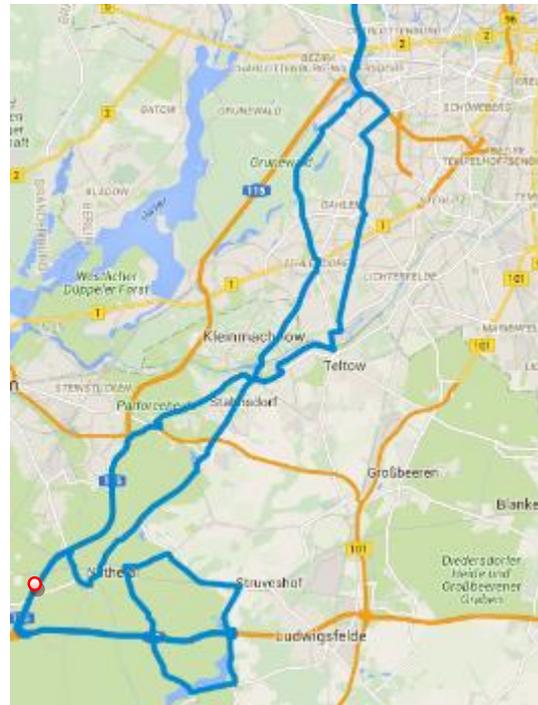
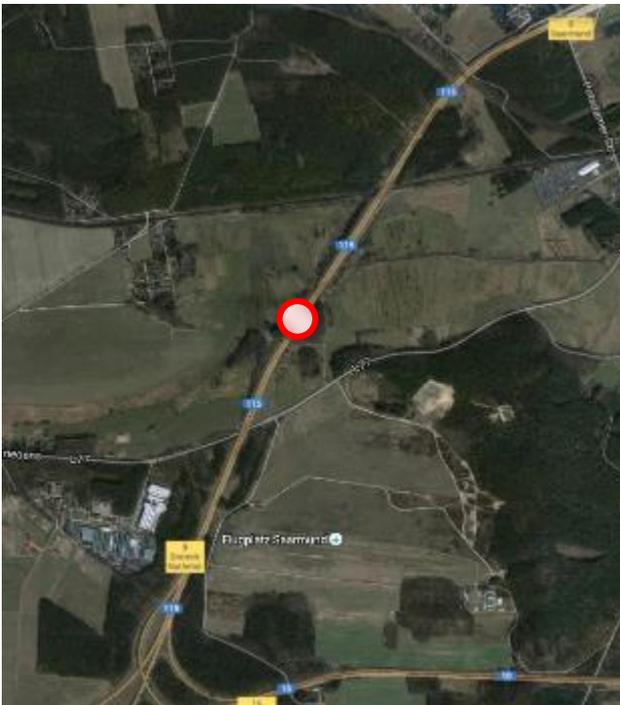


Abbildung 147: Informationen zu Bremspunkt 14



<b>Bremspunktnummer</b>	15
<b>Straße</b>	A115, 14552 Michendorf
<b>Bremspunkt-Name</b>	15 A115 (Brücke Ri. A10)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.3018, 13.086108
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	60 - 90
<b>Straßentyp</b>	Autobahn
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (22,81 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (5,24 km)
<b>Sonstiges</b>	-

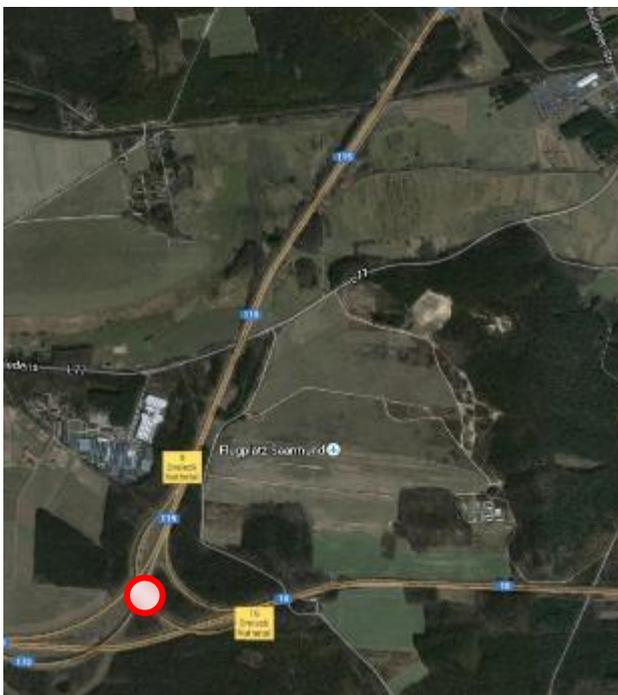


Abbildung 148: Informationen zu Bremspunkt 15



<b>Bremspunktnummer</b>	16
<b>Straße</b>	Berliner Ring, 14558 Nuthetal
<b>Bremspunkt-Name</b>	16 A10 (Ri. Ludwigsfelde)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.300557, 13.162561
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	70 - 190
<b>Straßentyp</b>	Autobahn
<b>Straßenbelag</b>	Beton
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (20,08 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (0,06 km)
<b>Sonstiges</b>	Messung vor Brücke in GMA-Nähe

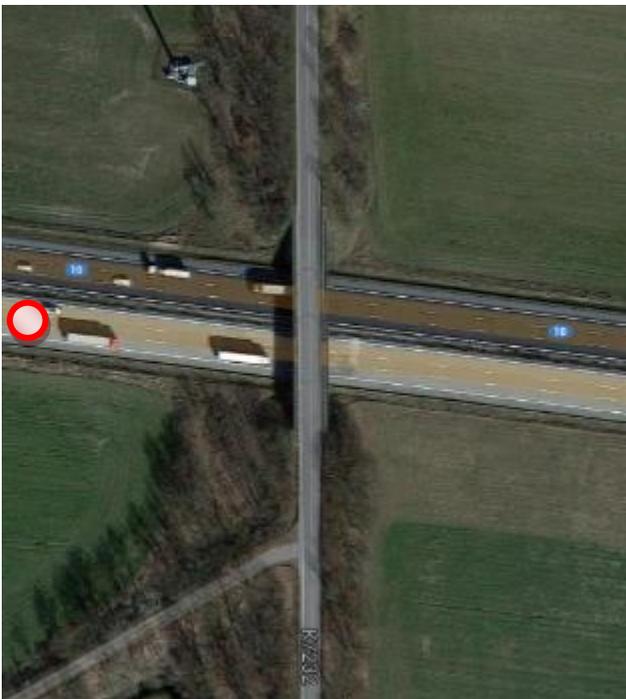


Abbildung 149: Informationen zu Bremspunkt 16



<b>Bremspunktnummer</b>	17
<b>Straße</b>	L795, 14974 Ludwigsfelde
<b>Bremspunkt-Name</b>	17 L795 (Siethen)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.29740519, 13.20909941
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30 - 70
<b>Straßentyp</b>	Landstraße
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (19,45 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (3,13 km)
<b>Sonstiges</b>	Messung nach Abfahrt

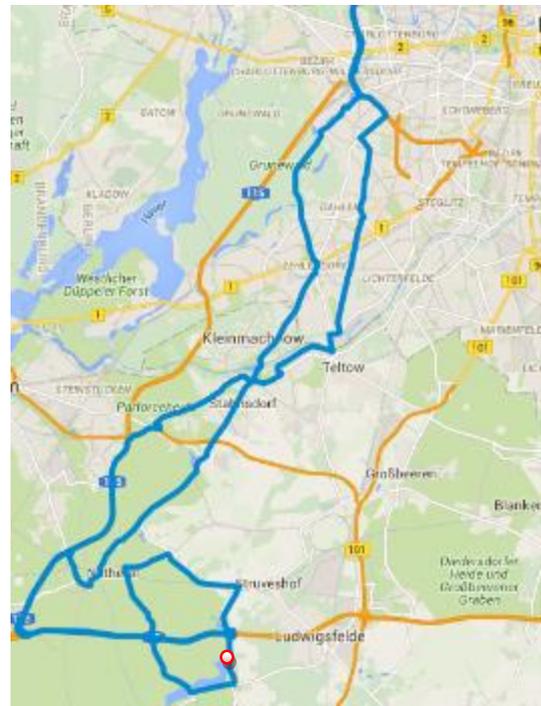
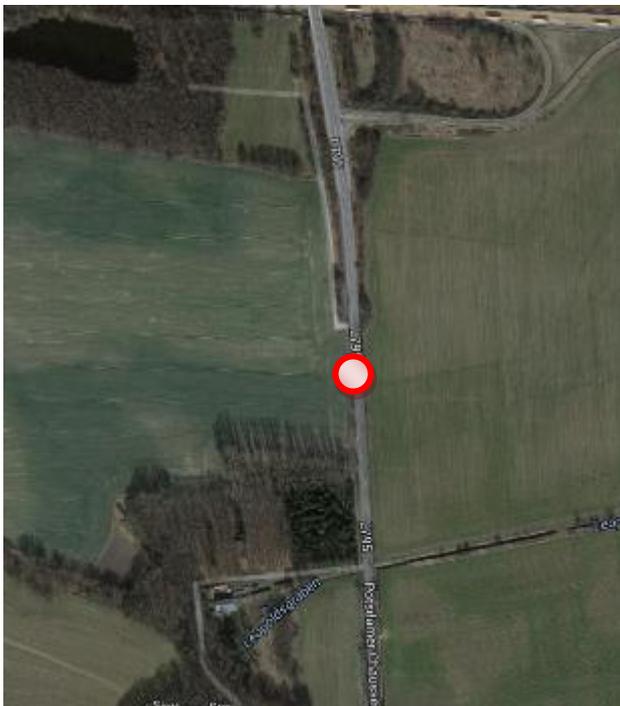


Abbildung 150: Informationen zu Bremspunkt 17



<b>Bremspunktnummer</b>	18
<b>Straße</b>	Jütchendorfer C. 6, 14974 Ludwigsfelde
<b>Bremspunkt-Name</b>	18 L793
<b>GPS Koordinaten</b>	52.281847, 13.196174
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30 - 95
<b>Straßentyp</b>	Landstraße
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (21,03 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (3,05 km)
<b>Sonstiges</b>	-

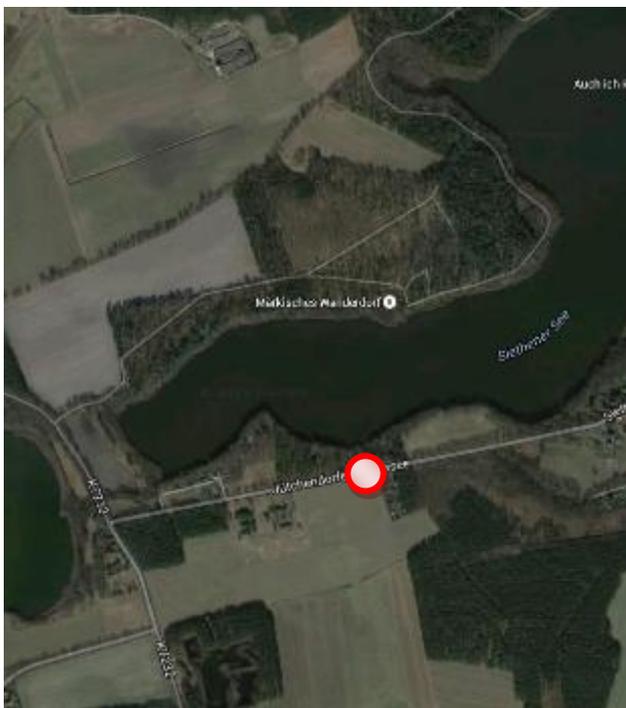


Abbildung 151: Informationen zu Bremspunkt 18



<b>Bremspunktnummer</b>	19
<b>Straße</b>	K6904, 14558 Nuthetal
<b>Bremspunkt-Name</b>	19 K6904 (GMA/vor)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.299988,13.163924
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30 - 100
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	gut
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (20,00 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (0,12 km)
<b>Sonstiges</b>	vor der Brücke

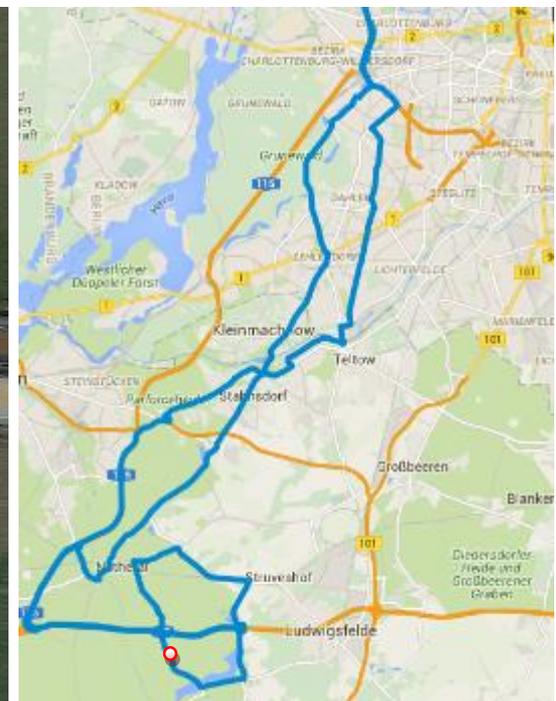
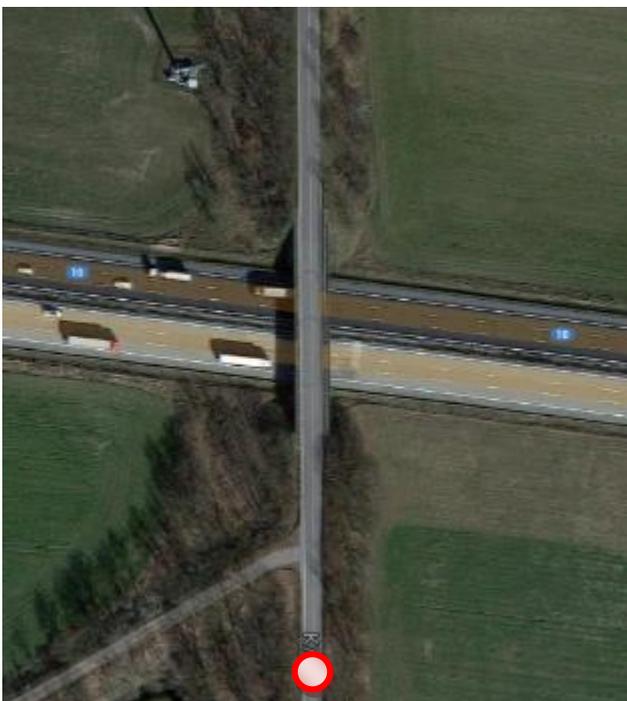


Abbildung 152: Informationen zu Bremspunkt 19



<b>Bremspunktnummer</b>	20
<b>Straße</b>	K6904, 14558 Nuthetal
<b>Bremspunkt-Name</b>	20 K6904 (GMA/Brücke)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.300412,13.163931
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	40 - 90
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	gut
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (20,00 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (0,08 km)
<b>Sonstiges</b>	Brücke über A10



Abbildung 153: Informationen zu Bremspunkt 20



<b>Bremspunktnummer</b>	21
<b>Straße</b>	Fahlhorster Dorfstraße, 14558 Nuthetal
<b>Bremspunkt-Name</b>	21 K6904 (GMA/nach)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.304505,13.164064
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	35 - 85
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	gut
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (20,00 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (0,34 km)
<b>Sonstiges</b>	hinter der Brücke

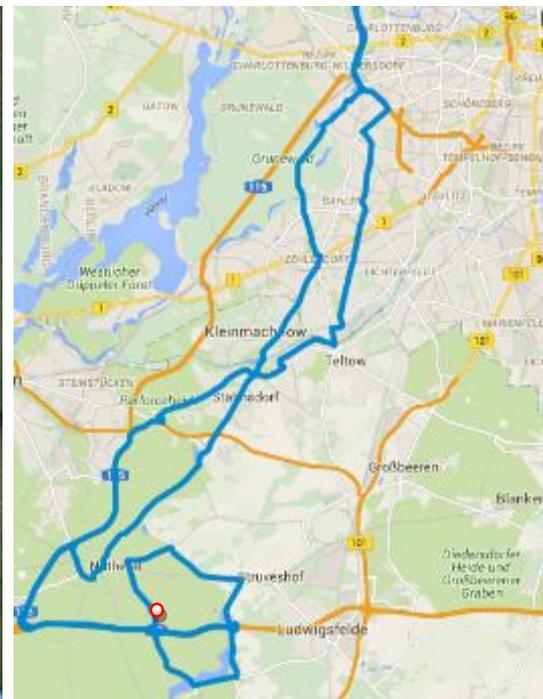
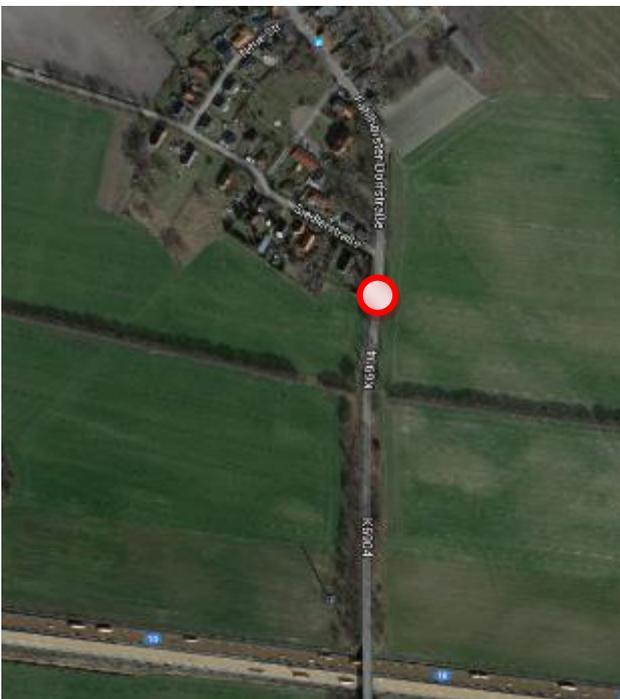


Abbildung 154: Informationen zu Bremspunkt 21



<b>Bremspunktnummer</b>	22
<b>Straße</b>	K6903, 14558 Nuthetal
<b>Bremspunkt-Name</b>	22 K6903
<b>GPS Koordinaten</b>	52.325521, 13.153606
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30 - 85
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (17,95 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (2,80 km)
<b>Sonstiges</b>	-

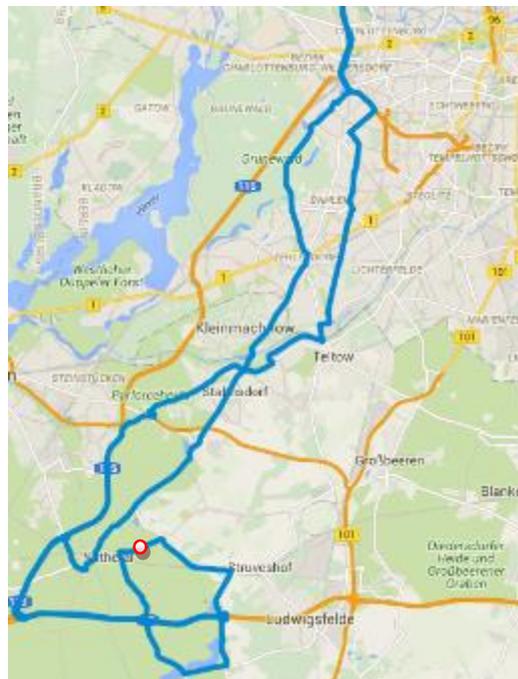
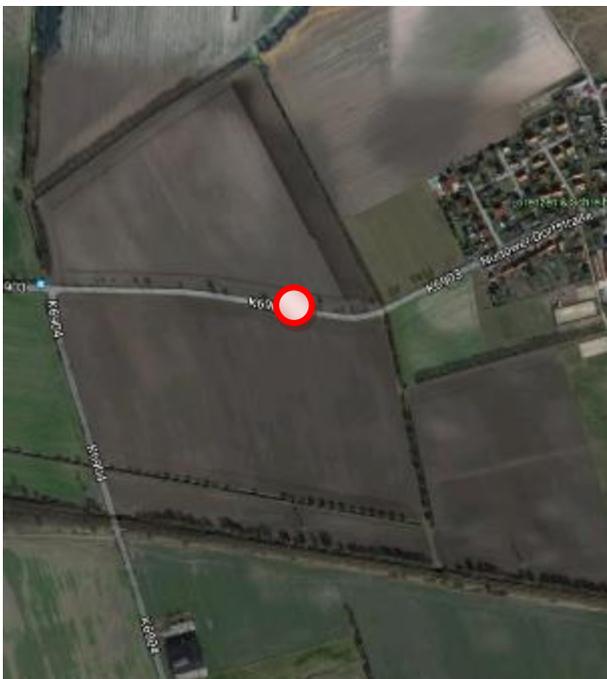


Abbildung 155: Informationen zu Bremspunkt 22



<b>Bremspunktnummer</b>	23
<b>Straße</b>	Nudower Dorfstraße, 14558 Nuthetal
<b>Bremspunkt-Name</b>	23 Nudower
<b>GPS Koordinaten</b>	52.327039, 13.160648
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30
<b>Straßentyp</b>	Dorfstraße
<b>Straßenbelag</b>	Kopfsteinpflaster
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (17,55 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (2,90 km)
<b>Sonstiges</b>	Messung vor Gasthaus

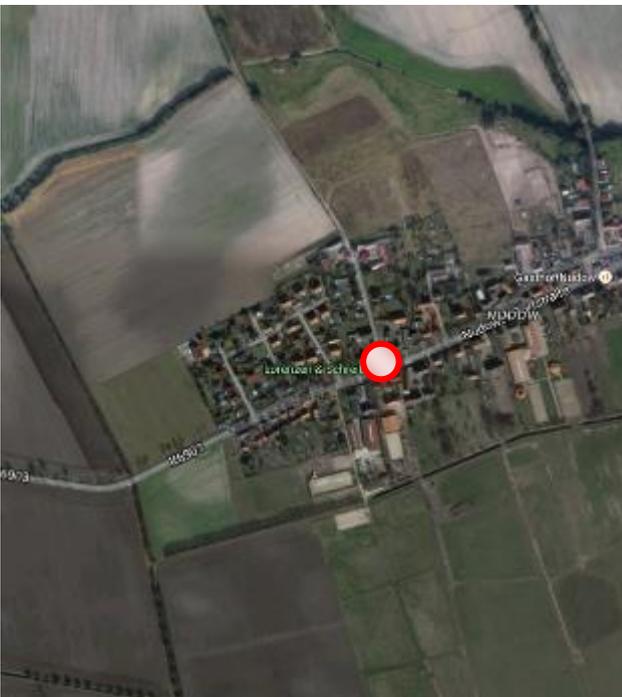


Abbildung 156: Informationen zu Bremspunkt 23



<b>Bremspunktnummer</b>	24
<b>Straße</b>	L795, 14974 Ludwigsfelde
<b>Bremspunkt-Name</b>	24 L795 (Ahrensdorf)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.313554, 13.210459
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	50 - 100
<b>Straßentyp</b>	Landstraße
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (17,38 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (3,46 km)
<b>Sonstiges</b>	freies Feld

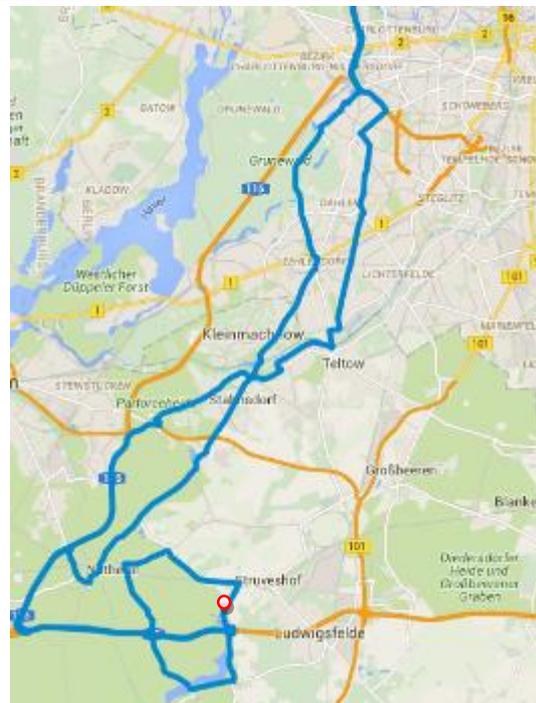


Abbildung 157: Informationen zu Bremspunkt 24



<b>Bremspunktnummer</b>	25
<b>Straße</b>	Berliner Ring, 14558 Nuthetal
<b>Bremspunkt-Name</b>	25 A10 (Ri. Nuthetal)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.300377,13.164282
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	120
<b>Straßentyp</b>	Autobahn
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (20,00 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (0,08 km)
<b>Sonstiges</b>	Messung nach Brücke in GMA-Nähe

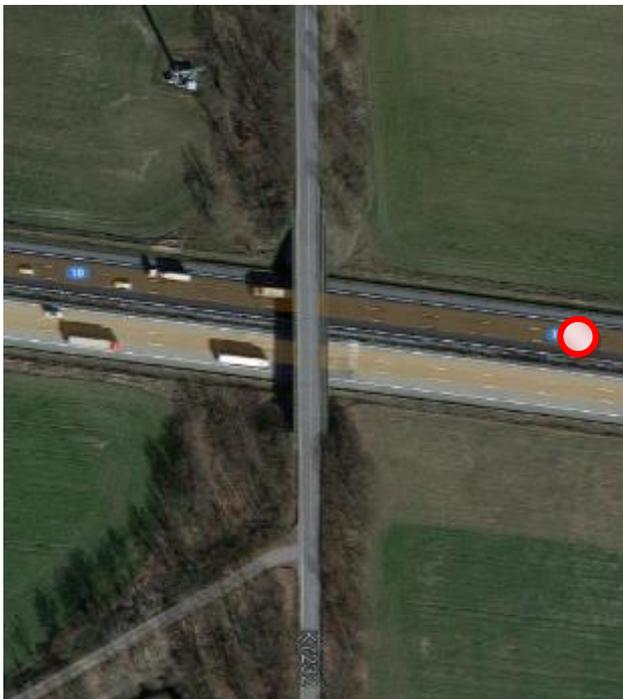


Abbildung 158: Informationen zu Bremspunkt 25



<b>Bremspunktnummer</b>	26
<b>Straße</b>	A115, 14558 Nuthetal
<b>Bremspunkt-Name</b>	26 A115 (Ri. Saarmund)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.317242,13.095088
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	70 - 140
<b>Straßentyp</b>	Autobahn
<b>Straßenbelag</b>	Beton
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (21,10 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (4,91 km)
<b>Sonstiges</b>	Irgendwo auf der 115

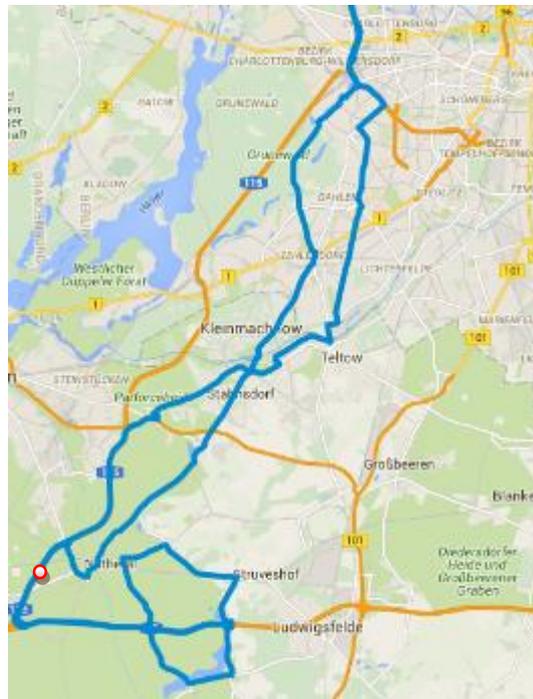
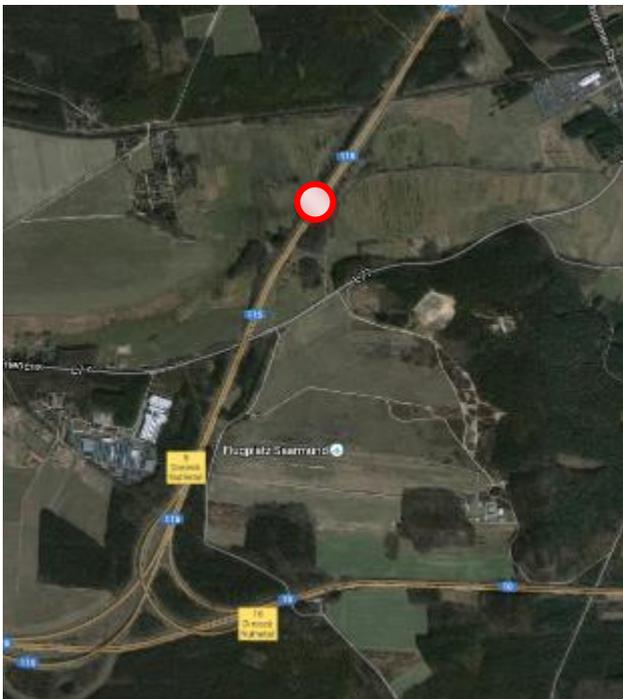


Abbildung 159: Informationen zu Bremspunkt 26



<b>Bremspunktnummer</b>	27
<b>Straße</b>	L77, 14558 Nuthetal
<b>Bremspunkt-Name</b>	27 L77 (n. Philippsthal)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.335119, 13.144948
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30 - 75
<b>Straßentyp</b>	Landstraße
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (17,42 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (4,07 km)
<b>Sonstiges</b>	Ortsausgang Philippsthal

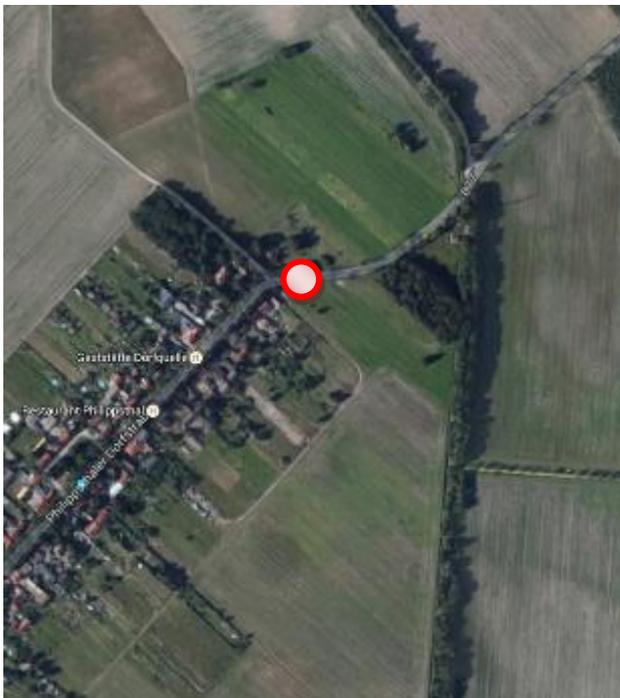


Abbildung 160: Informationen zu Bremspunkt 27



<b>Bremspunktnummer</b>	28
<b>Straße</b>	L77, 14532 Stahnsdorf
<b>Bremspunkt-Name</b>	28 L77 (Ri. Güterfelde)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.352327, 13.178027
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	50 - 100
<b>Straßentyp</b>	Landstraße
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (14,55 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (5,89 km)
<b>Sonstiges</b>	Wald

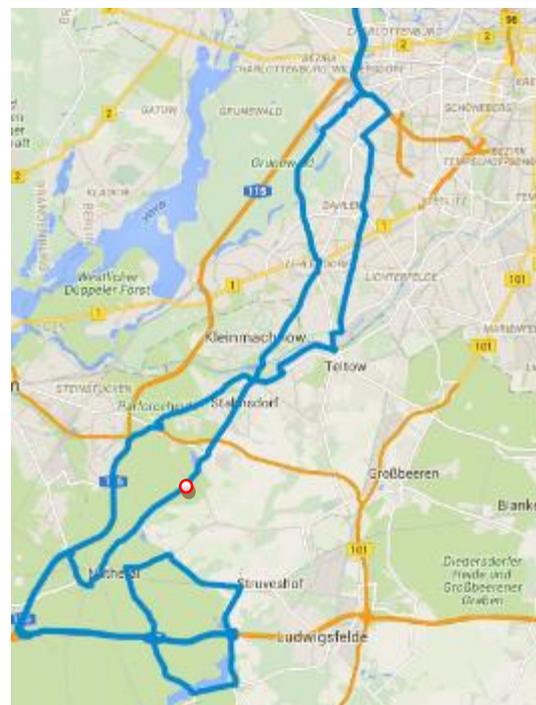
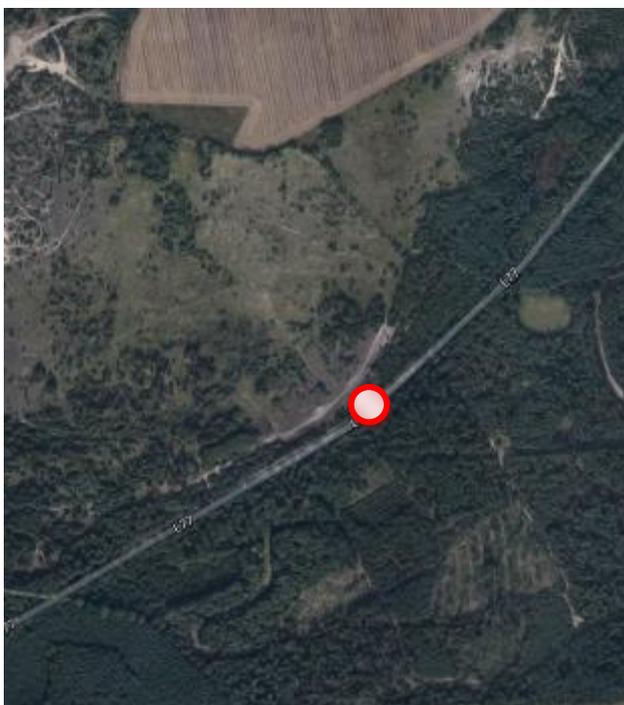


Abbildung 161: Informationen zu Bremspunkt 28



<b>Bremspunktnummer</b>	29
<b>Straße</b>	Wupperstraße, 14167 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	29 Wupperstr.
<b>GPS Koordinaten</b>	52.413102, 13.272192
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30 - 65
<b>Straßentyp</b>	Landstraße
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (5,55 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (14,55 km)
<b>Sonstiges</b>	Wald

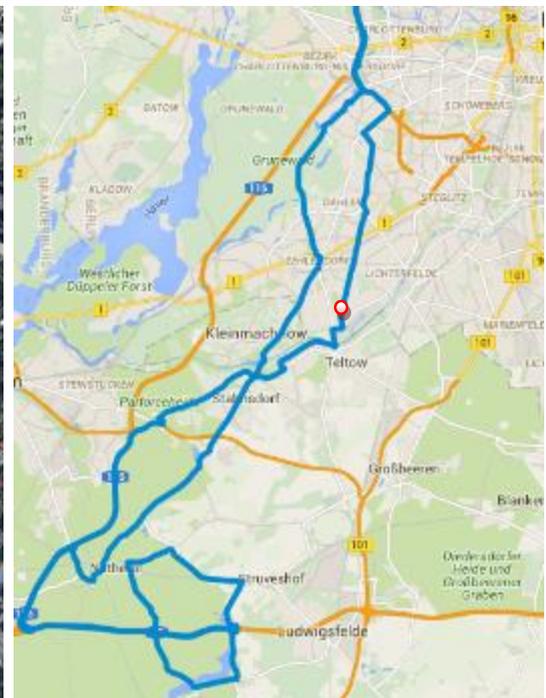
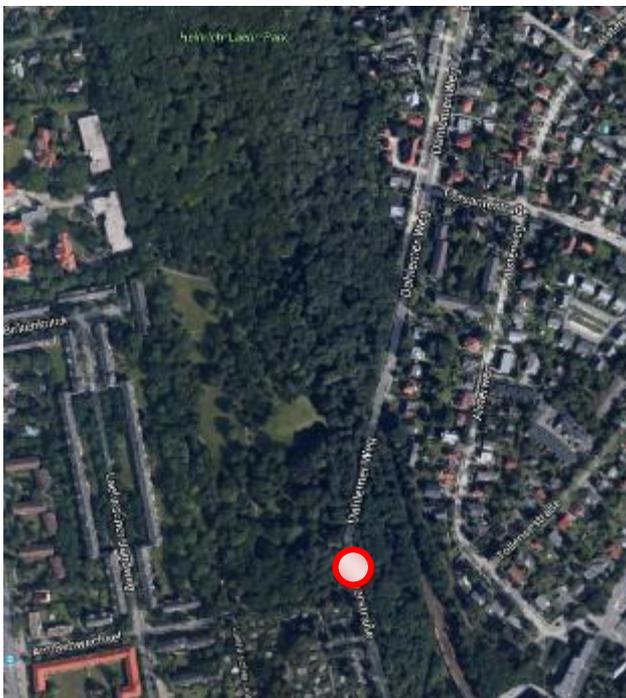


Abbildung 162: Informationen zu Bremspunkt 29



<b>Bremspunktnummer</b>	30
<b>Straße</b>	Dahlemer Weg, 14167 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	30 Dahlemer Weg
<b>GPS Koordinaten</b>	52.430772, 13.278875
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	50
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	-
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Dahlem (3,55 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (16,50 km)
<b>Sonstiges</b>	-

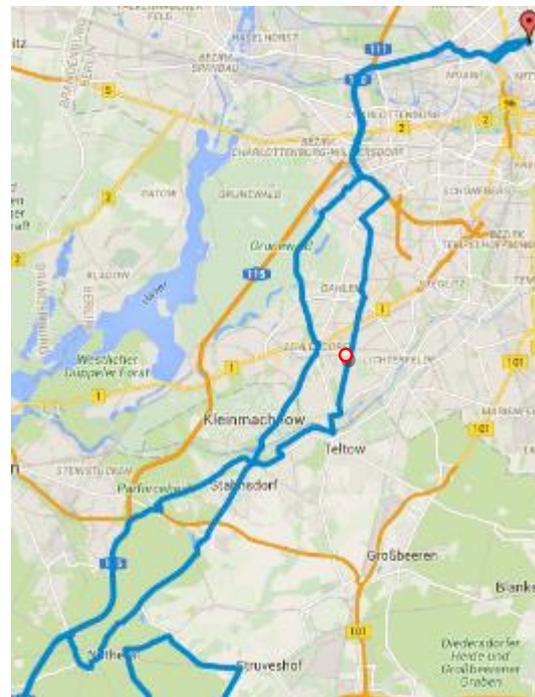
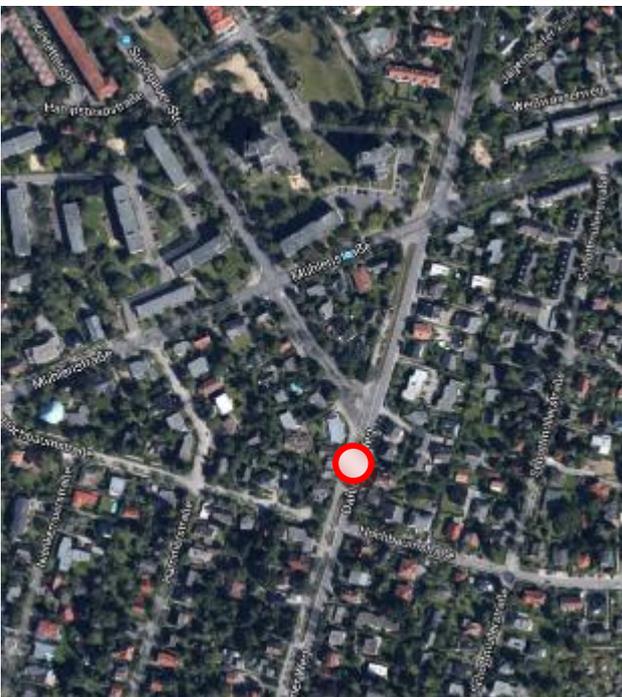


Abbildung 163: Informationen zu Bremspunkt 30



<b>Bremspunktnummer</b>	31
<b>Straße</b>	Grenzstraße, 13355 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	2 Grenzstr. (Brücke)
<b>GPS Koordinaten</b>	52.542495, 13.379089
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Asphalt
<b>Zustand</b>	gut
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Tegel (5,58 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (30,48 km)
<b>Sonstiges</b>	Brücke über Bahnstrecke

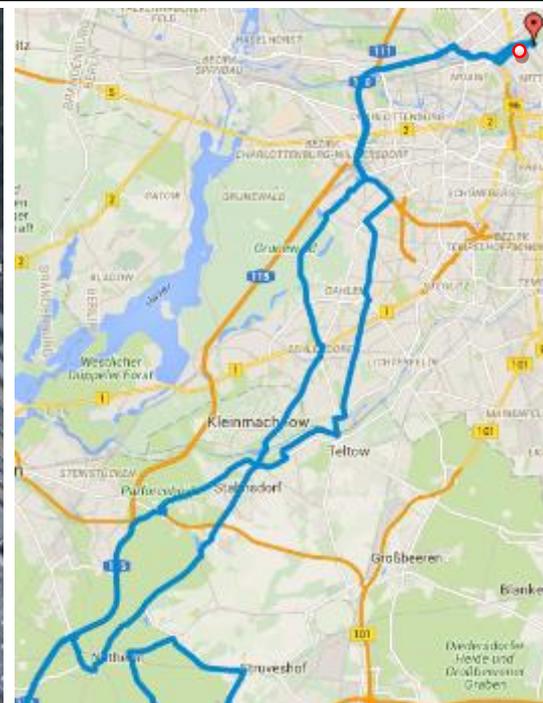
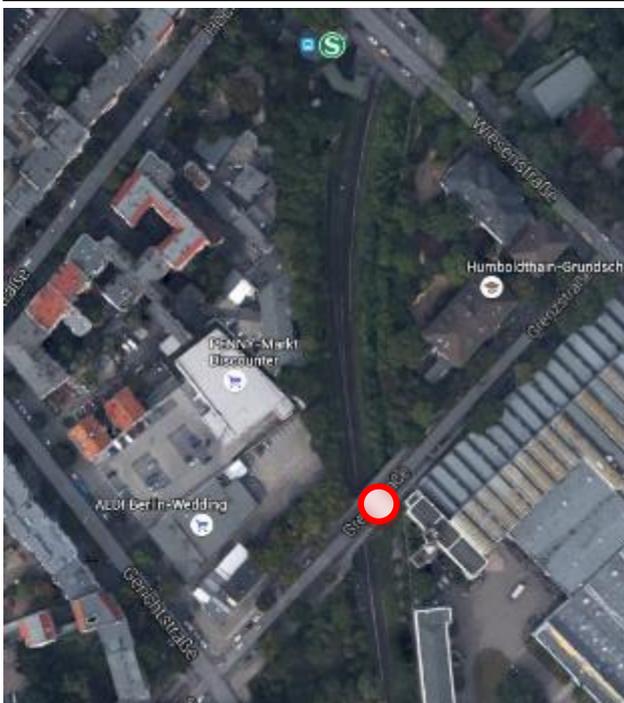


Abbildung 164: Informationen zu Bremspunkt 31



<b>Bremspunktnummer</b>	32
<b>Straße</b>	Grenzstraße, 13355 Berlin
<b>Bremspunkt-Name</b>	1 Grenzstr.
<b>GPS Koordinaten</b>	52.543219, 13.380167
<b>Geschwindigkeit (km/h)</b>	30
<b>Straßentyp</b>	Stadt
<b>Straßenbelag</b>	Kopfsteinpflaster
<b>Zustand</b>	gut
<b>Zugeordnete Wetterstation</b>	Tegel (5,60 km)
<b>Zugeordnete Glättemeldeanlage</b>	Fahlhorst (30,50 km)
<b>Sonstiges</b>	-

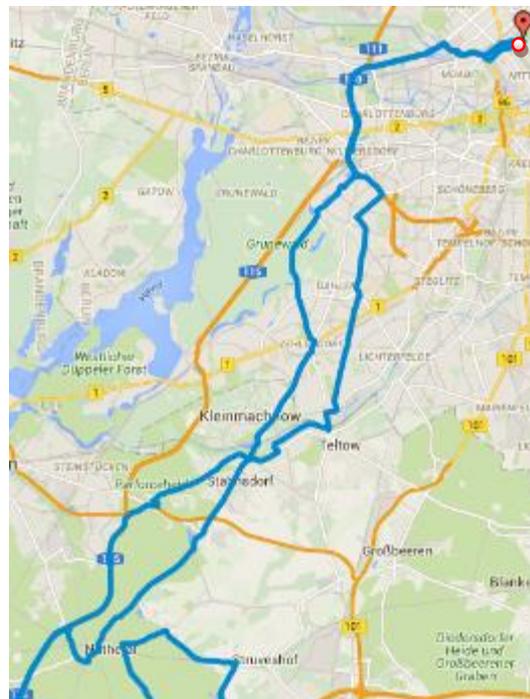
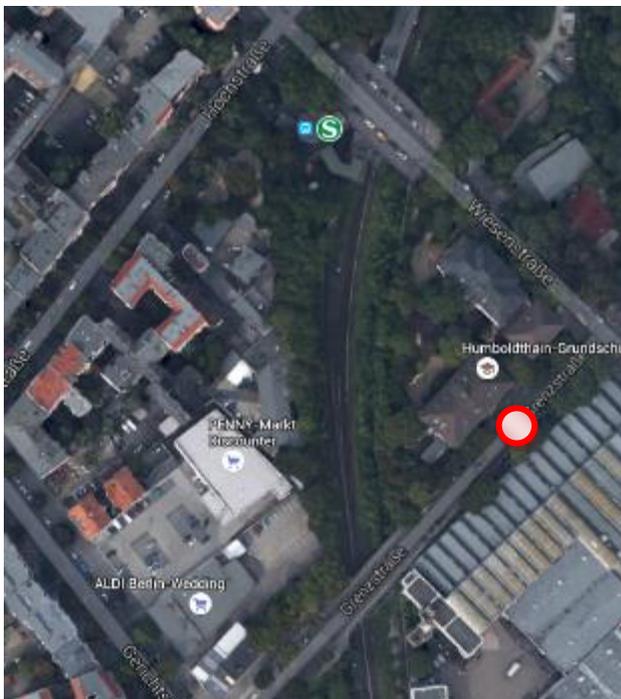


Abbildung 165: Informationen zu Bremspunkt 32

### 10.3 Darstellung der erhobenen Daten

Messtechnik	Datenbeschreibung	Einheit	Wertebereich
Adma G	Anzahl sichtbarer Satelliten		
	GPS-Status		1=KeinEmpfang 2=StandardEmpfang 3=DGPSgrob(40-120cm) 4=DGPSfein(2-10cm)
	GPS Genauigkeit	m	
	GPS Breitengrad	°	
	GPS Längengrad	°	
	Wanken	°	
	Nicken	°	
	Gieren	°	
	Drehrate um Y-Achse (Nicken)	°/s	
	Drehrate um Z-Achse (Gieren)	°/s	
	Drehrate (horizontal) um Y-Achse (Nicken)	°/s	
	Drehrate (horizontal) um Z-Achse (Gieren)	°/s	
	Beschleunigung Längsachse	g	
	Beschleunigung Längsachse	°/s	
	Beschleunigung Querachse	g	
	Beschleunigung Querachse	°/s	
	Zurückgelegter Weg	m	
	Zeit	ms	
CANBus	Zeit (Stunde)	h	0 ... 23
	Zeit (Minute)	min	0 ... 254
	Zeit (Sekunde)	s	0 ... 59
	Drehrate um Z-Achse korrigiert (Gieren)	°/s	-100 ... 100
	Drehrate um Z-Achse (Gieren)	°/s	-100 ... 100
	Beschleunigung Längsachse (ungefiltert)	m/s <sup>2</sup>	-51,2 ... 51,15
	Beschleunigung Längsachse (differenziert)	m/s <sup>2</sup>	-19,62 ... 19,62
	Beschleunigung Längsachse (Rohdaten)	m/s <sup>2</sup>	-20,47 ... 20,47
	Beschleunigung Querachse	m/s <sup>2</sup>	-19,62 ... 19,62
	Bremsdruck	bar	0 ... 254
	Bremsdruck hinten links	bar	0 ... 254
	Bremsdruck hinten rechts	bar	0 ... 254
	Bremsdruck vorne links	bar	0 ... 254
	Bremsdruck vorne rechts	bar	0 ... 254
	Geschwindigkeit	km/h	0 ... 300
	Geschwindigkeit Tacho	km/h	0 ... 409
	Geschwindigkeit hinten links	km/h	-320 ... 320
	Geschwindigkeit hinten rechts	km/h	-320 ... 320
	Geschwindigkeit vorne links	km/h	-320 ... 320
	Geschwindigkeit vorne rechts	km/h	-320 ... 320
	Wischergeschwindigkeit		33 ... 61
	Intensität Regensensor	%	0 ... 100
	Drehmoment	Nm	-1023,5 ... 1023,5
	Reifenfülldruck hinten links	bar	0 ... 5,3
	Reifenfülldruck hinten rechts	bar	0 ... 5,3
	Reifenfülldruck vorne links	bar	0 ... 5,3
	Reifenfülldruck vorne rechts	bar	0 ... 5,3
	Radmoment	Nm	-3200 ... 3200
	Temperatur	°C	-40 ... 85
	Bedienung Wischertaster		0=keine Aktion; 1=Automatik(Regensensor); 2=Stufe1; 3=Stufe2; 8=Tippwischen; 10=Frontwaschen; 40=Heckwischen; 80=Heckwaschen
Stufenvorwahl des Regensensors / Wischerintervallfunktion		0=Stufe1; 1=Stufe2; 2=Stufe3; 4=Stufe4; 7=Signal ungültig	
Trigger - Start der Aufnahme		0=keine Aktion; 1=gedrückt; 3=Signal ungültig	
Trigger - Beenden d. Aufnahme		0=keine Aktion; 1=gedrückt; 3=Signal ungültig	
VAISALA DSP211	Oberflächentemperatur	°C	-40 ... 71,1
	Taupunkt	°C	-40 ... 65,5
	Umgebungstemperatur	°C	-40 ... 71,1
	relative Luftfeuchtigkeit	%	0 ... 100
	Lufttemperatur	°C	

Glätte- melde-anlage	Taupunkttemperatur	°C	
	Sichtweite	m	
	Windrichtung	Dekagrad	
	Windgeschwindigkeit	m/s	
	Niederschlagsart		0 kein Niederschlag 1 bei alten Anlagen: Niederschlag ja bei neuen Anlagen: Regen 2 Schneeregen 3 Schnee
	Niederschlagshöhe	mm	
	Niederschlags- intensitätsklasse		1 leicht 2 mäßig 3 stark
	Belagtemperatur (Standardposition)	°C	
	Belagtemperatur (beliebige Position)	°C	
	Untergrundtemperatur (Standard: 30cm)	°C	
	Untergrundtemperatur (beliebig: 15cm, 7cm)	°C	
	Wasserfilmdicke		1 gering, 2 mittel, 3 hoch
	Hersteller Bodensonde		1 ANT/Bosch, 2 Boschung, 3 SSI/Scan (Micks), 4 Vaisala, 5 Vibrometer, 6 Malling
Funktionszustand		0 gesamte Messstelle in Ordnung 1 einige oder alle Luftsensoren defekt 2 einige oder alle Straßensensoren defekt 9 Messstelle teilweise oder ganz defekt	
Straßenzustand		0 trocken, 1 feucht, 2 nass, 3 Reif, 4 Schnee, 5 Eis	
Wetter-station	Luftdruck	hPa	
	Lufttemperatur	°C	
	Niederschlagsmenge	mm	
	Windrichtung	Dekagrad	
	Windgeschwindigkeit	km/h	
	Wetterzustand		
	relative Luftfeuchtigkeit	%	
	Sichtweite	m	
	Gesamtbedeckungsgrad		
	Niederschlagsart		
	Sonnenscheindauer		
	Bodendruck	hPa	
Einschätzung Fahrer	Niederschlagsform		kein, Regen, Schnee, Graupel, Eisregen
	Niederschlagsintensität		kein, leicht, mittel, stark
	Straßenzustand		trocken, feucht, nass, Schneedecke, Schneematsch, Wasser steht
	Reibwertschätzung		niedrig, mittel, hoch
Sonstiges	Pollenkonzentration	Pollen pro m <sup>3</sup> Luft	
	Pollenintensität		keine Belastung, geringe Belastung, mittlere Belastung, hohe Belastung
	Winterdienst (Streuart)		Salz, Solzugabe, Split
	Winterdienst (Streumenge)	g/m <sup>2</sup>	
	Winterdienst (GPS)		
	Straßenbelag		Alter, Dicke, Art

Abbildung 166: Vollständige Auflistung der erhobenen Parameter

### 10.4 Vollständiger Vergleich der Lufttemperatur

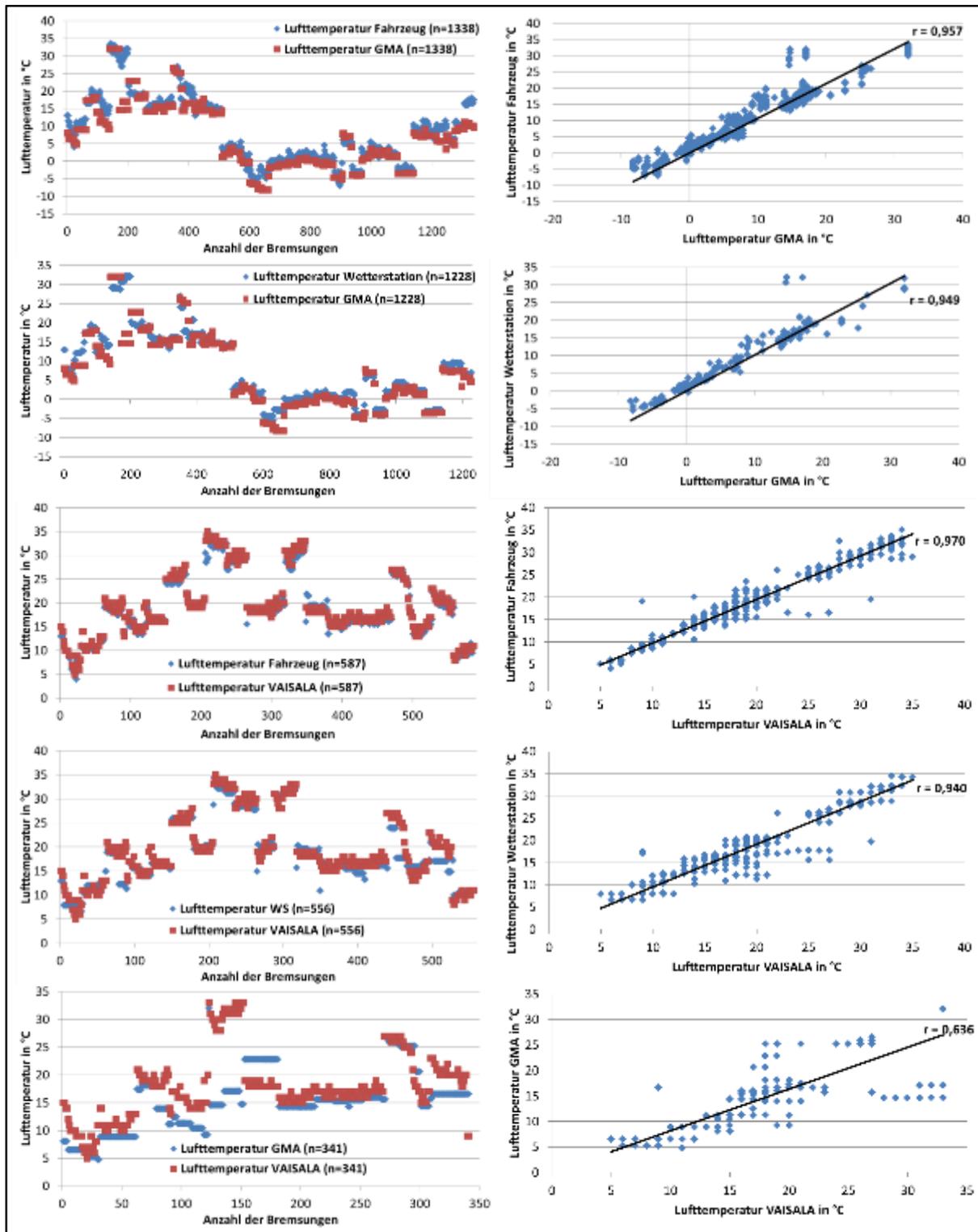


Abbildung 167: l.: Vergleich der Lufttemperatur von Fahrzeug und Wetterstation, r.: Korrelation der Lufttemperatur zwischen der Wetterstation und dem Fahrzeug

## 10.5 Regressionskurven

### Logistische Regression und Güte für die relative Luftfeuchtigkeit der Wetterstation

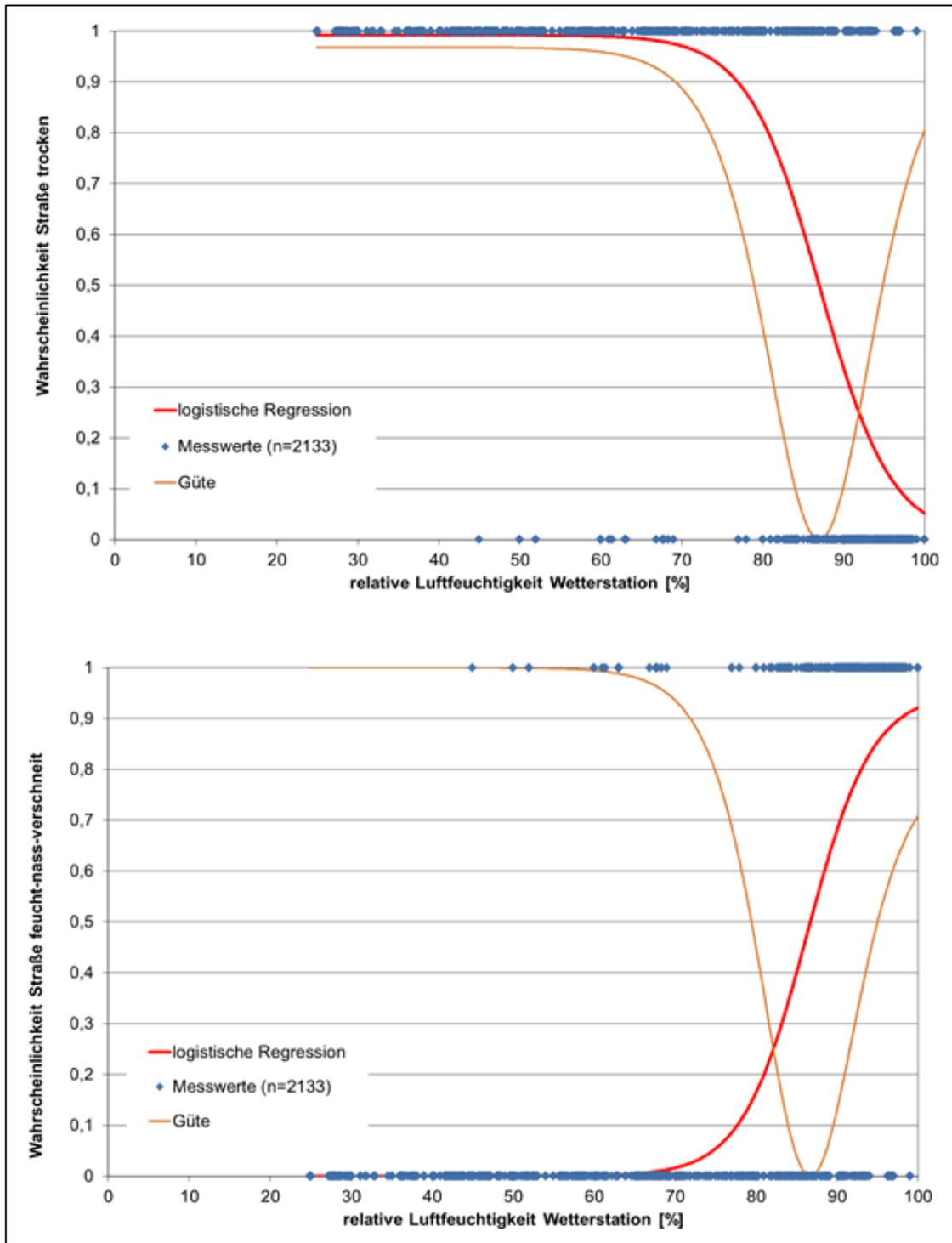


Abbildung 168: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „trocken“ (oben) und „feucht-nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit der nächstgelegenen Wetterstation

## Logistische Regression und Güte für die Taupunktdifferenz von Fahrzeug und Wetterstation

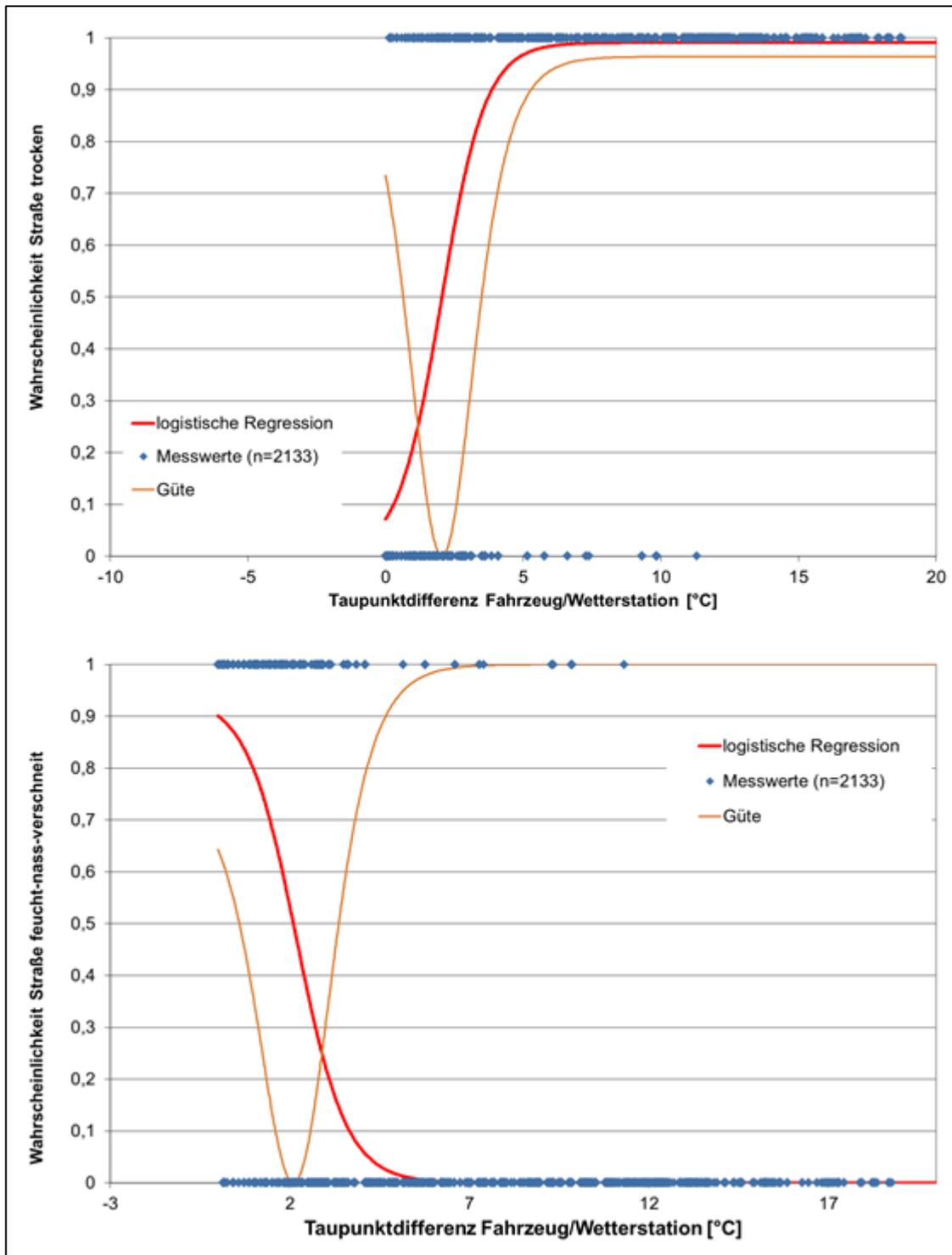


Abbildung 169: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „trocken“ (oben) und „feucht-nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Taupunktdifferenz von Fahrzeug (Temperatur) und Wetterstation (berechneter Taupunkt)

Logistische Regression und Güte für die Wischergeschwindigkeit

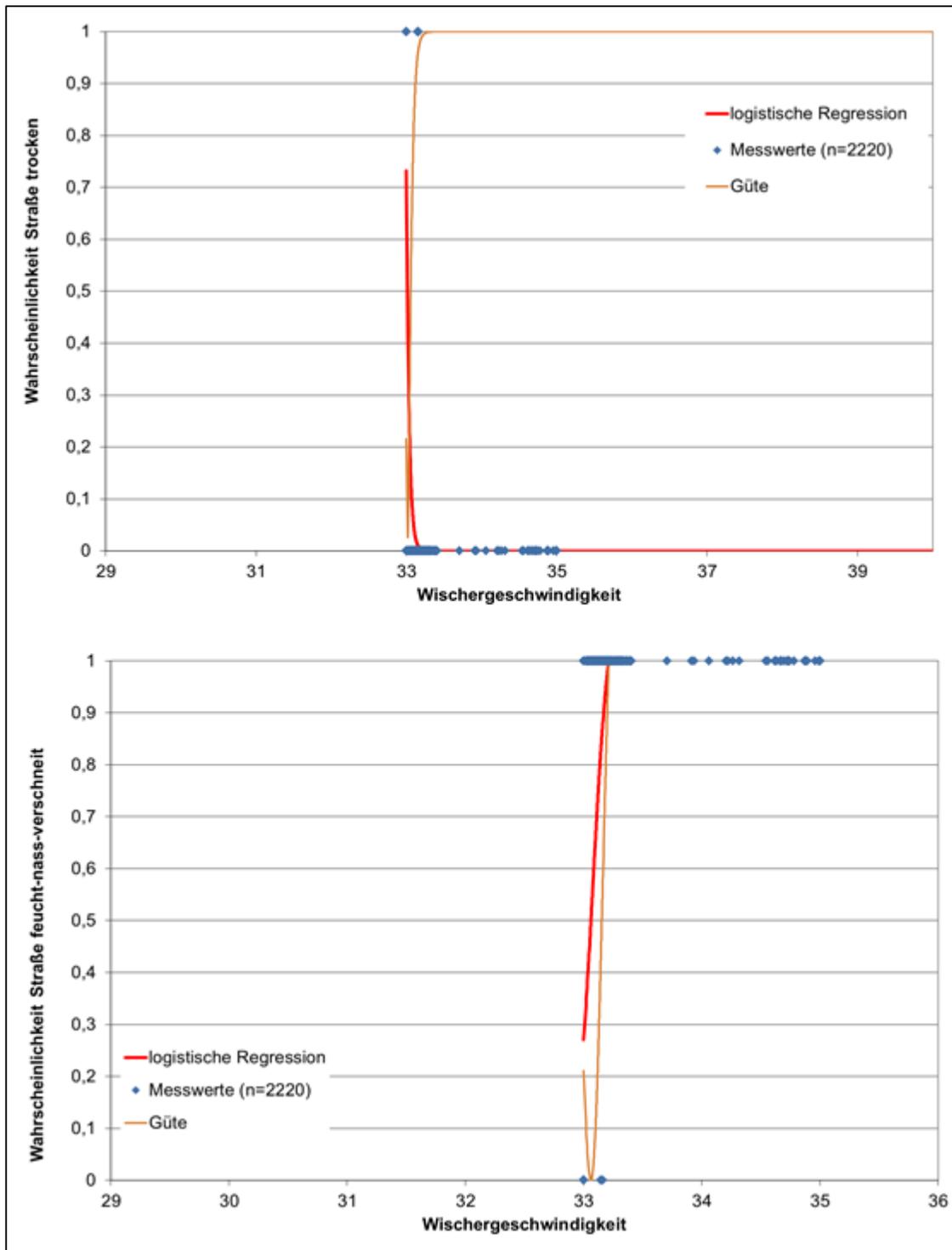


Abbildung 170: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „trocken“ (oben) und „feucht-nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Wischergeschwindigkeit

## Logistische Regression und Güte für die Wischergeschwindigkeit (30s)

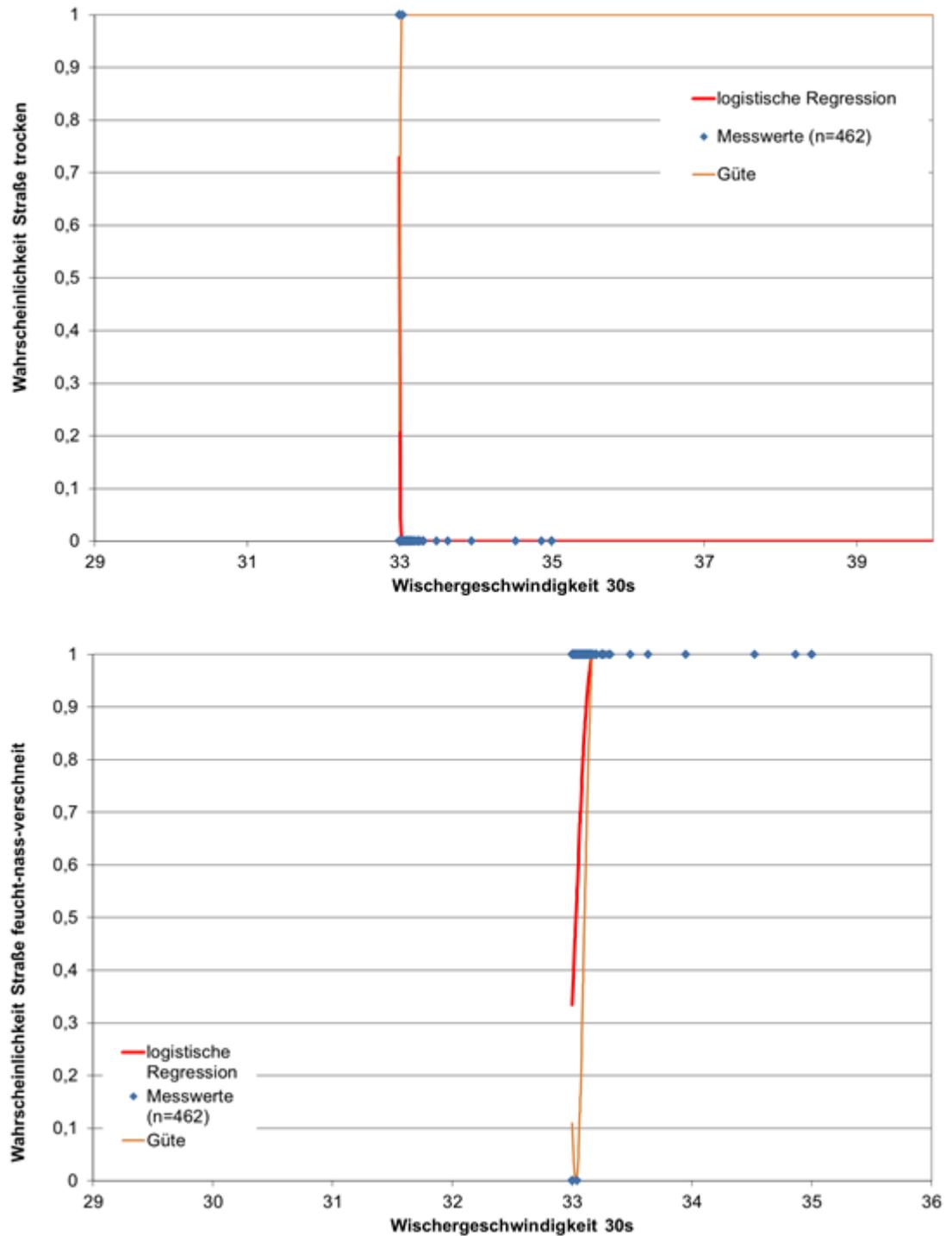


Abbildung 171: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „trocken“ (oben) und „feucht-nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Wischergeschwindigkeit (30s)

Logistische Regression und Güte für den Straßenzustand der Glättemeldeanlage

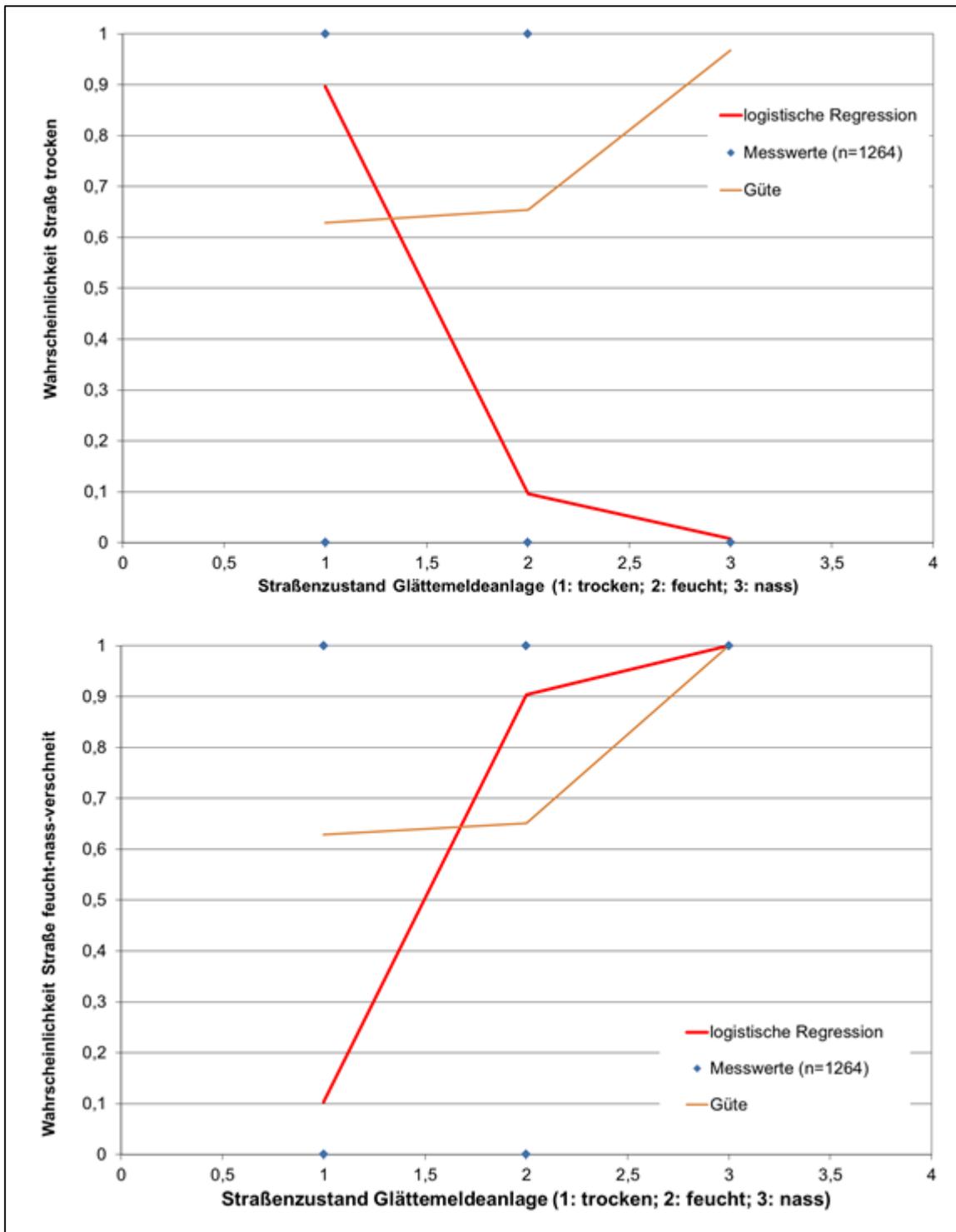


Abbildung 172: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „trocken“ (oben) und „feucht-nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit vom Straßenzustand der Glättemeldeanlage (1: trocken, 2: feucht, 3: nass)

## Logistische Regression und Güte für die Umgebungstemperatur des Fahrzeugs

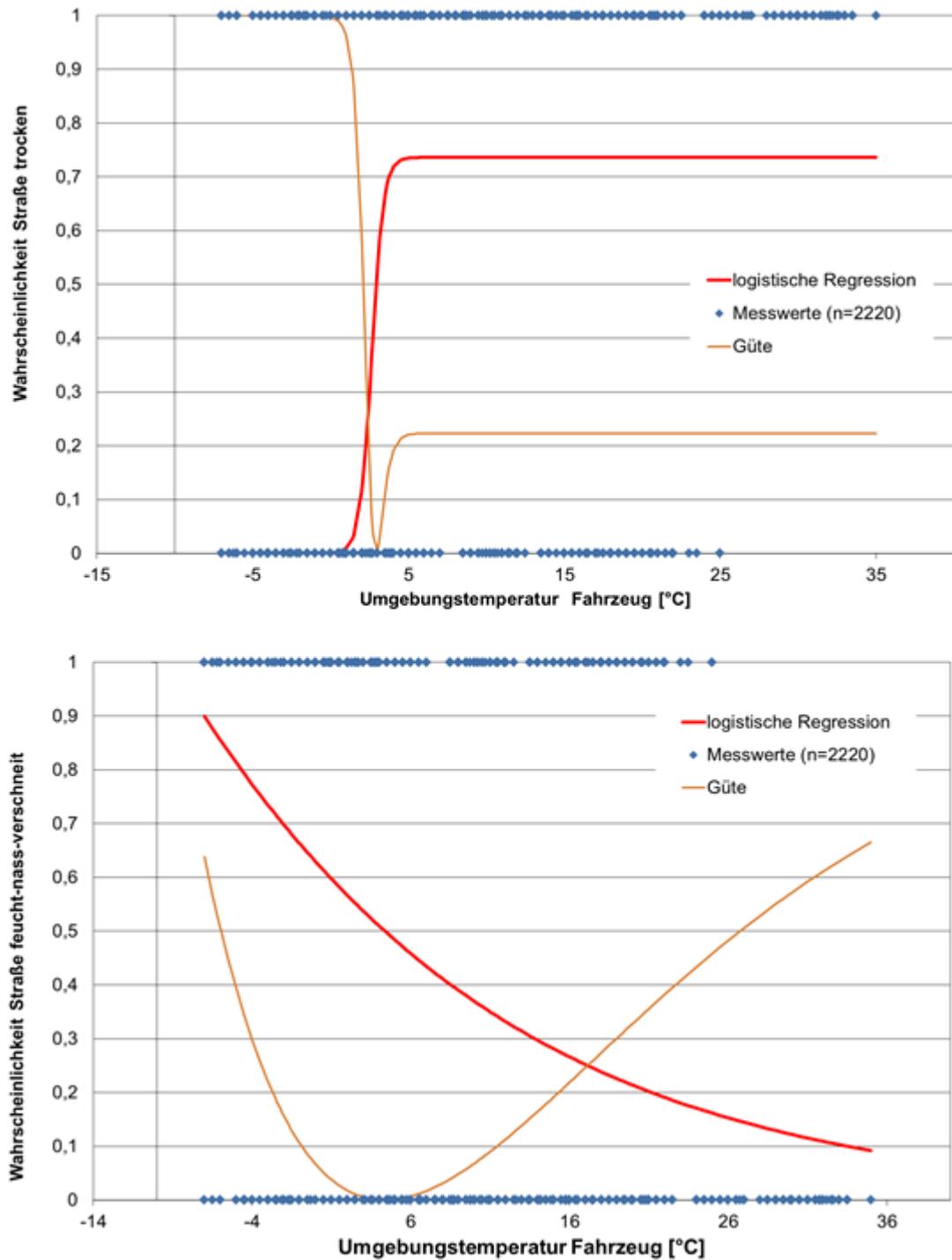


Abbildung 173: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „trocken“ (oben) und „feucht-nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur des Fahrzeugs

Logistische Regression und Güte für die Oberflächentemperatur gemessen vom Vaisala

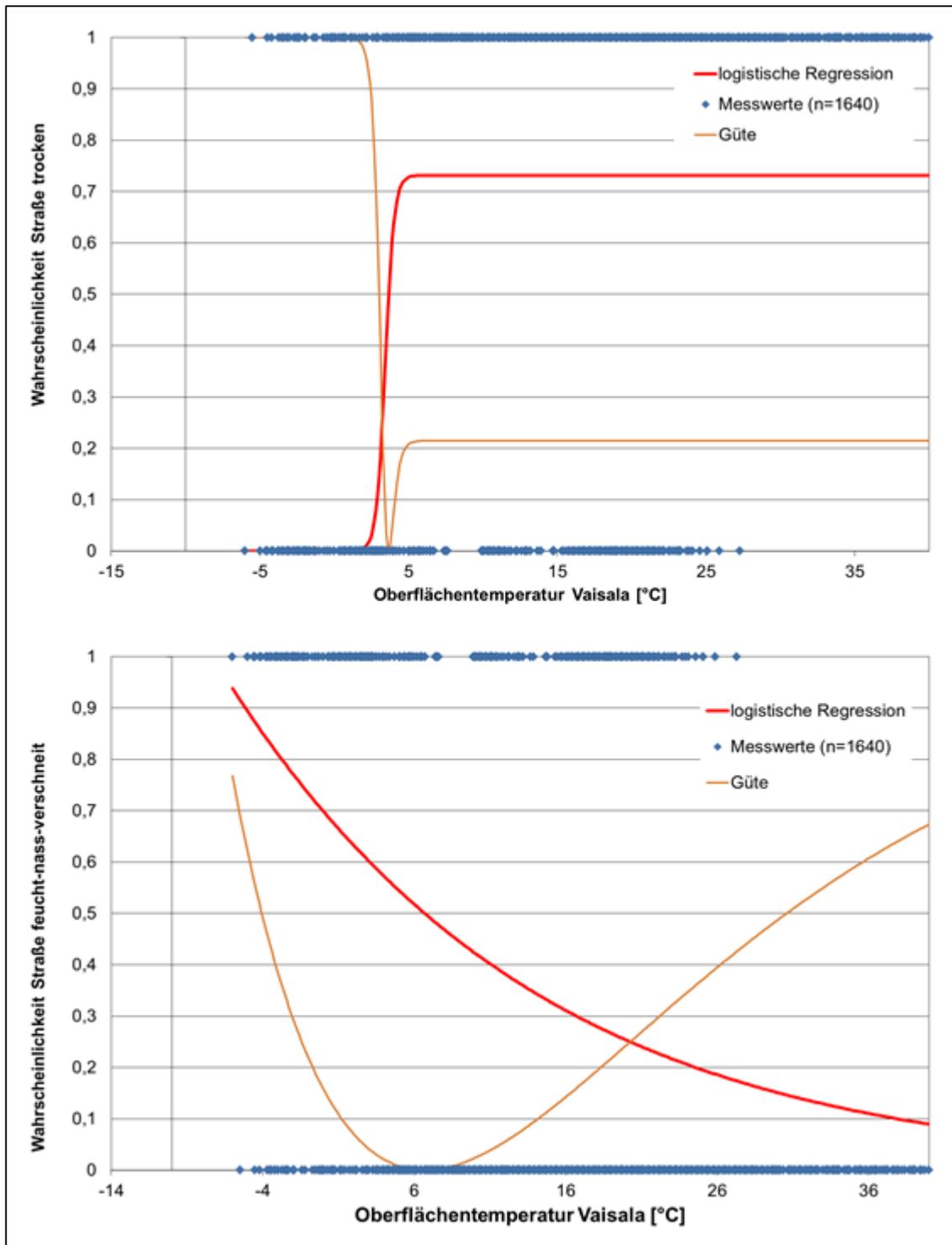


Abbildung 174: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „trocken“ (oben) und „feucht-nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur gemessen vom Vaisala

## Logistische Regression und Güte für die relative Luftfeuchtigkeit der Wetterstation

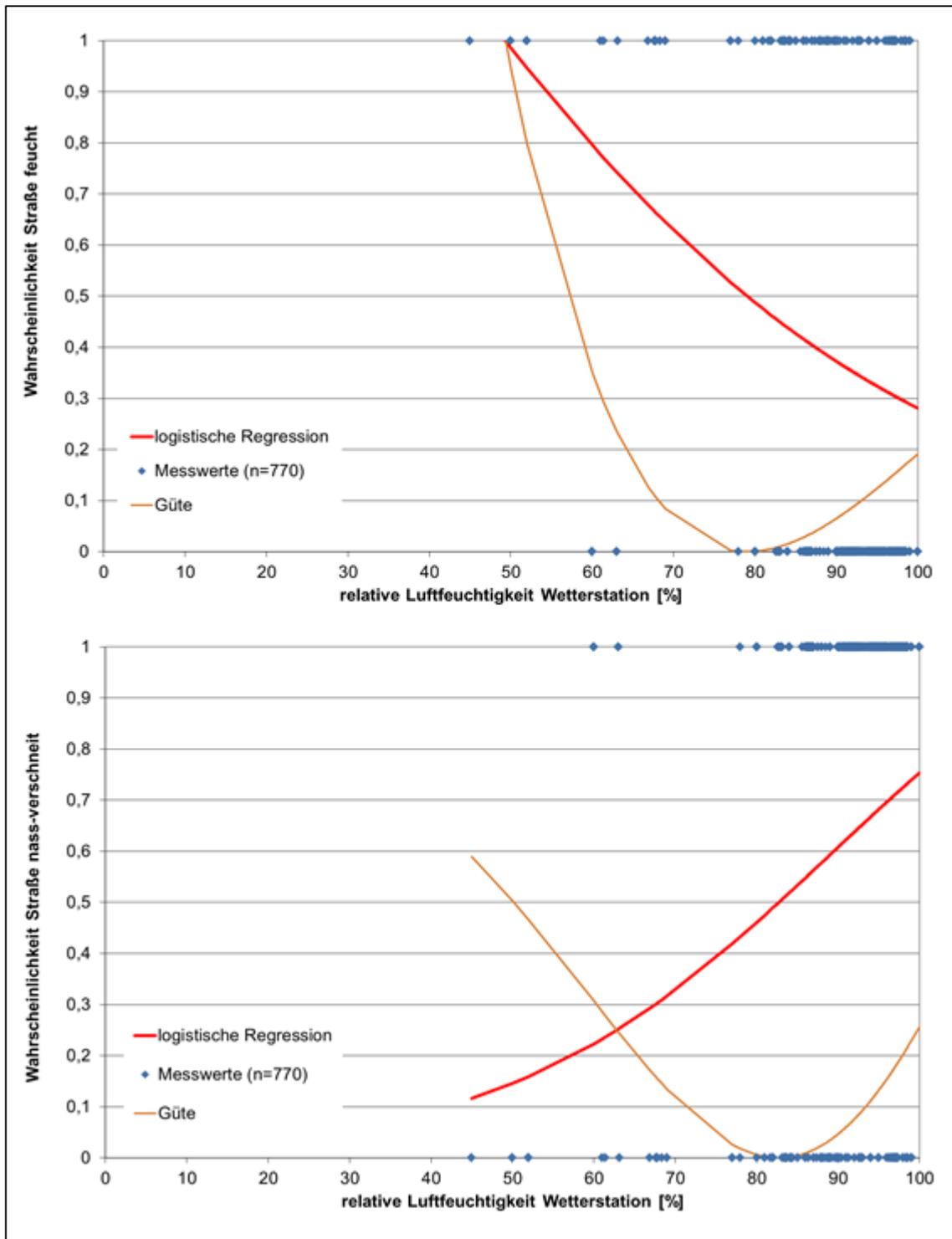


Abbildung 175: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „feucht“ (oben) und „nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit der nächstgelegenen Wetterstation

Logistische Regression und Güte für die Taupunktdifferenz von Fahrzeug und Wetterstation

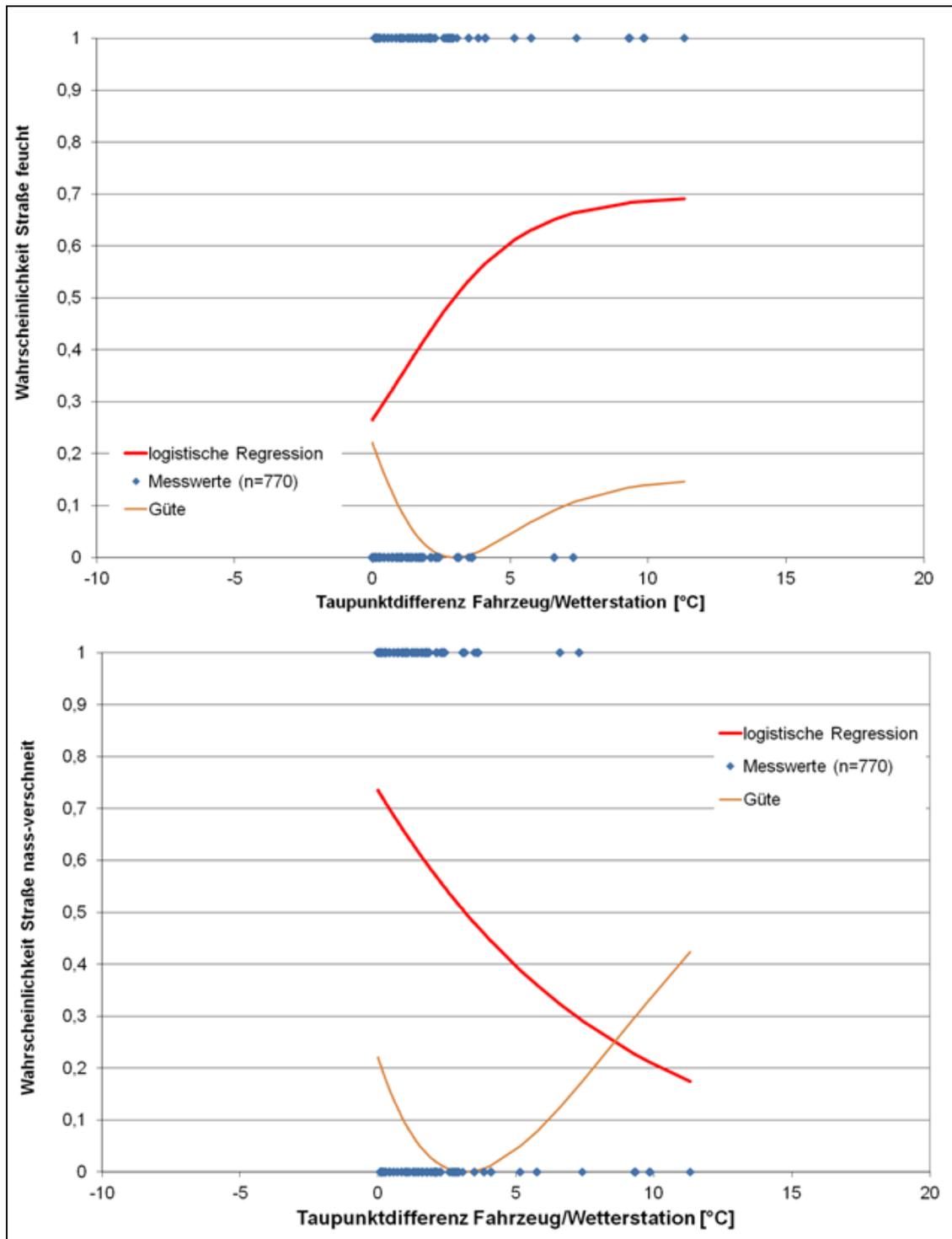


Abbildung 176: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „feucht“ (oben) und „nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Taupunktdifferenz von Fahrzeug (Temperatur) und Wetterstation (berechneter Taupunkt)

## Logistische Regression und Güte für die Wischergeschwindigkeit

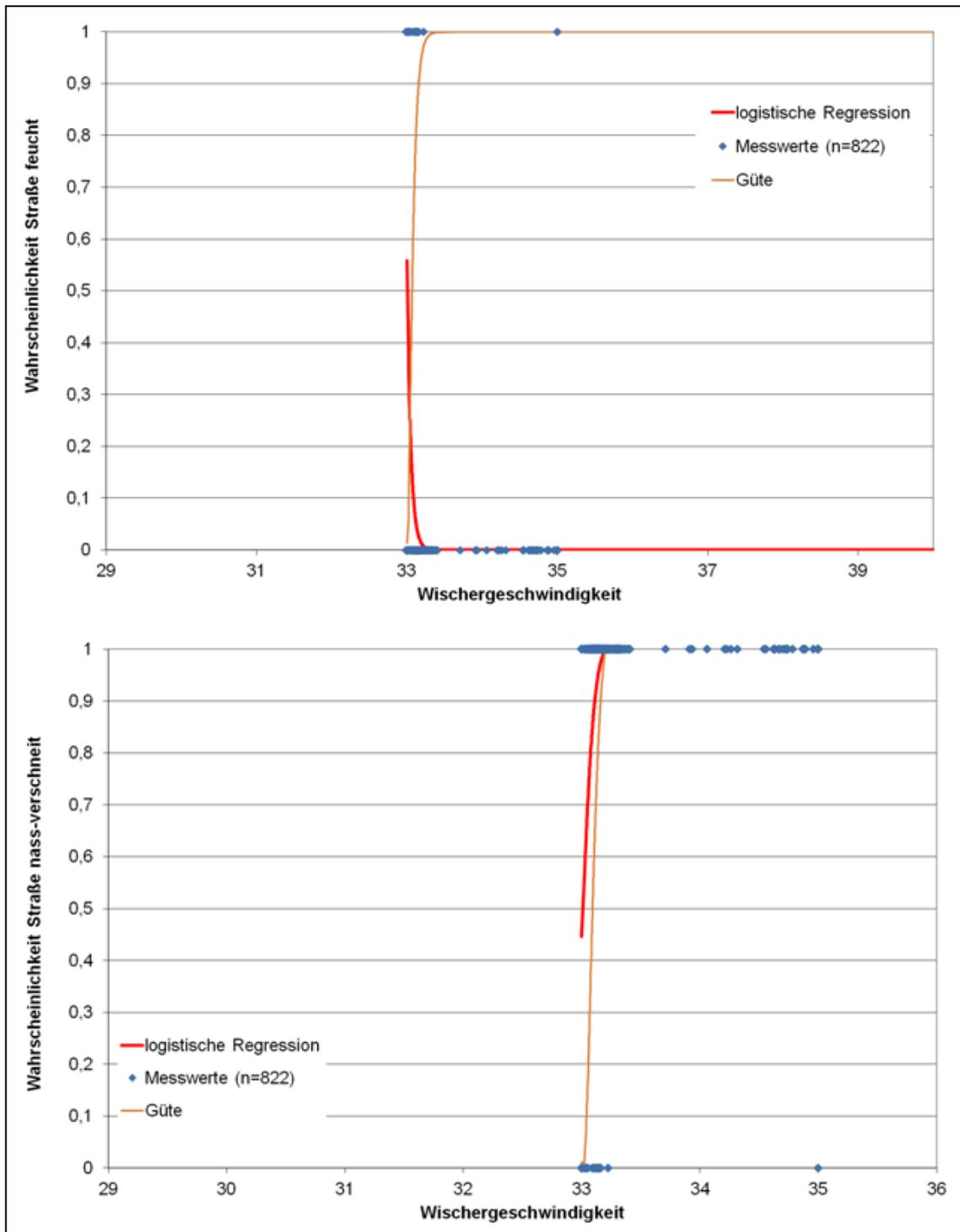


Abbildung 177: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „feucht“ (oben) und „nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Wischergeschwindigkeit

Logistische Regression und Güte für den Straßenzustand der Glättemeldeanlage

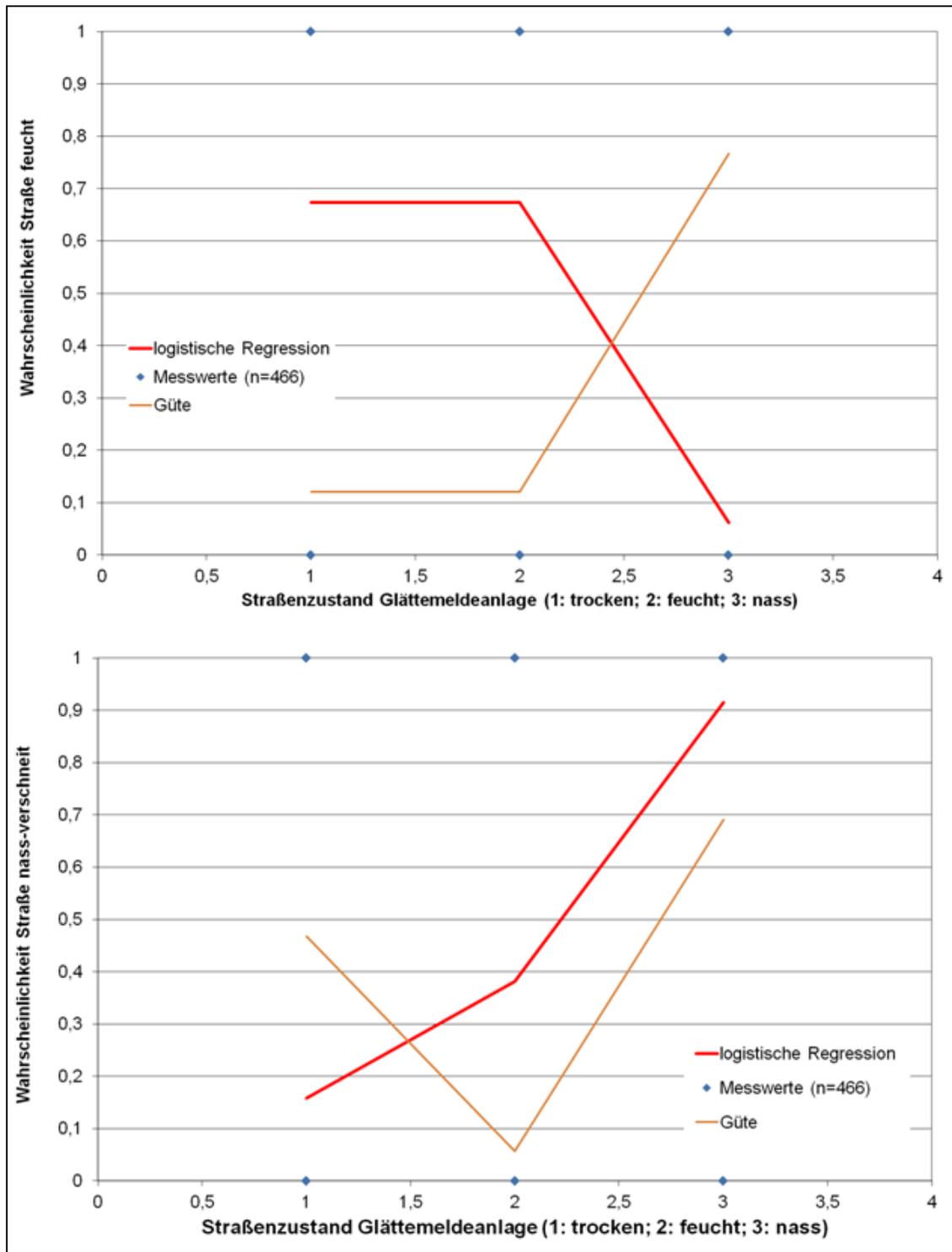


Abbildung 178: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „feucht“ (oben) und „nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit vom Straßenzustand der Glättemeldeanlage (1: trocken, 2: feucht, 3: nass)

## Logistische Regression und Güte für die Umgebungstemperatur des Fahrzeugs

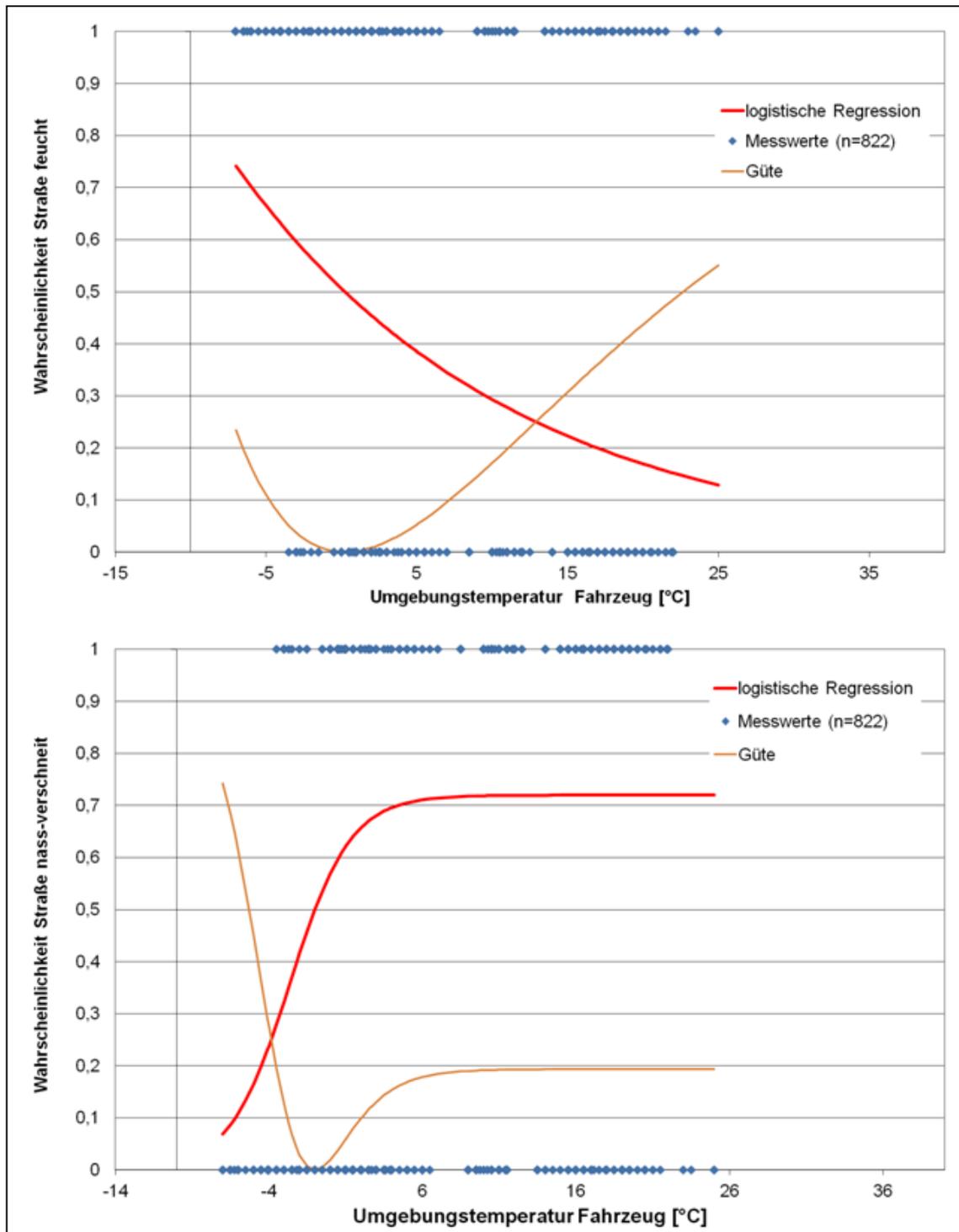


Abbildung 179: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „feucht“ (oben) und „nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur des Fahrzeugs

Logistische Regression und Güte für die Oberflächentemperatur gemessen vom Vaisala

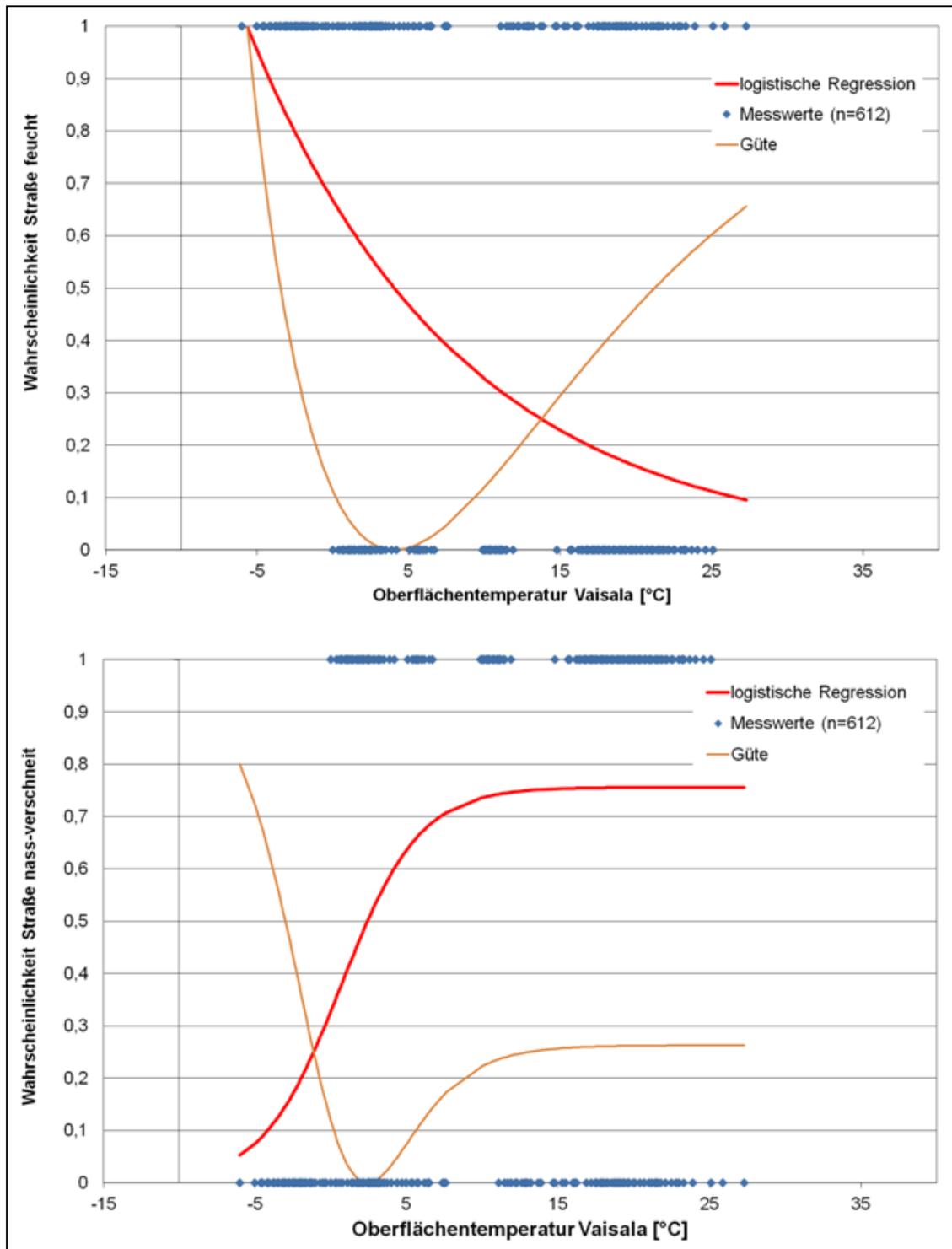


Abbildung 180: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „feucht“ (oben) und „nass-verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur gemessen vom Vaisala

## Logistische Regression und Güte für die relative Luftfeuchtigkeit der Wetterstation

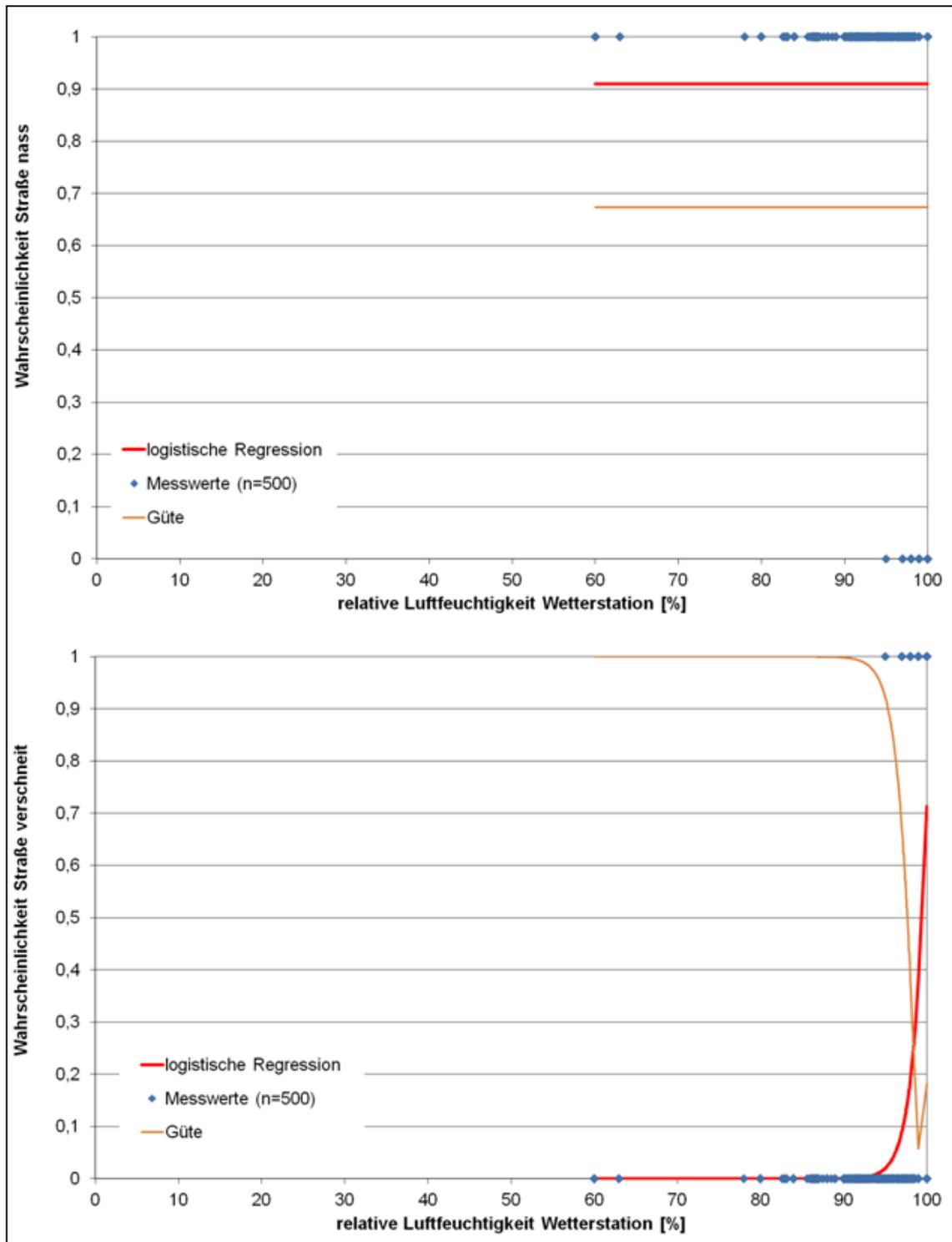


Abbildung 181: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „nass“ (oben) und „verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit der nächstgelegenen Wetterstation

Logistische Regression und Güte für die Taupunktdifferenz von Fahrzeug und Wetterstation

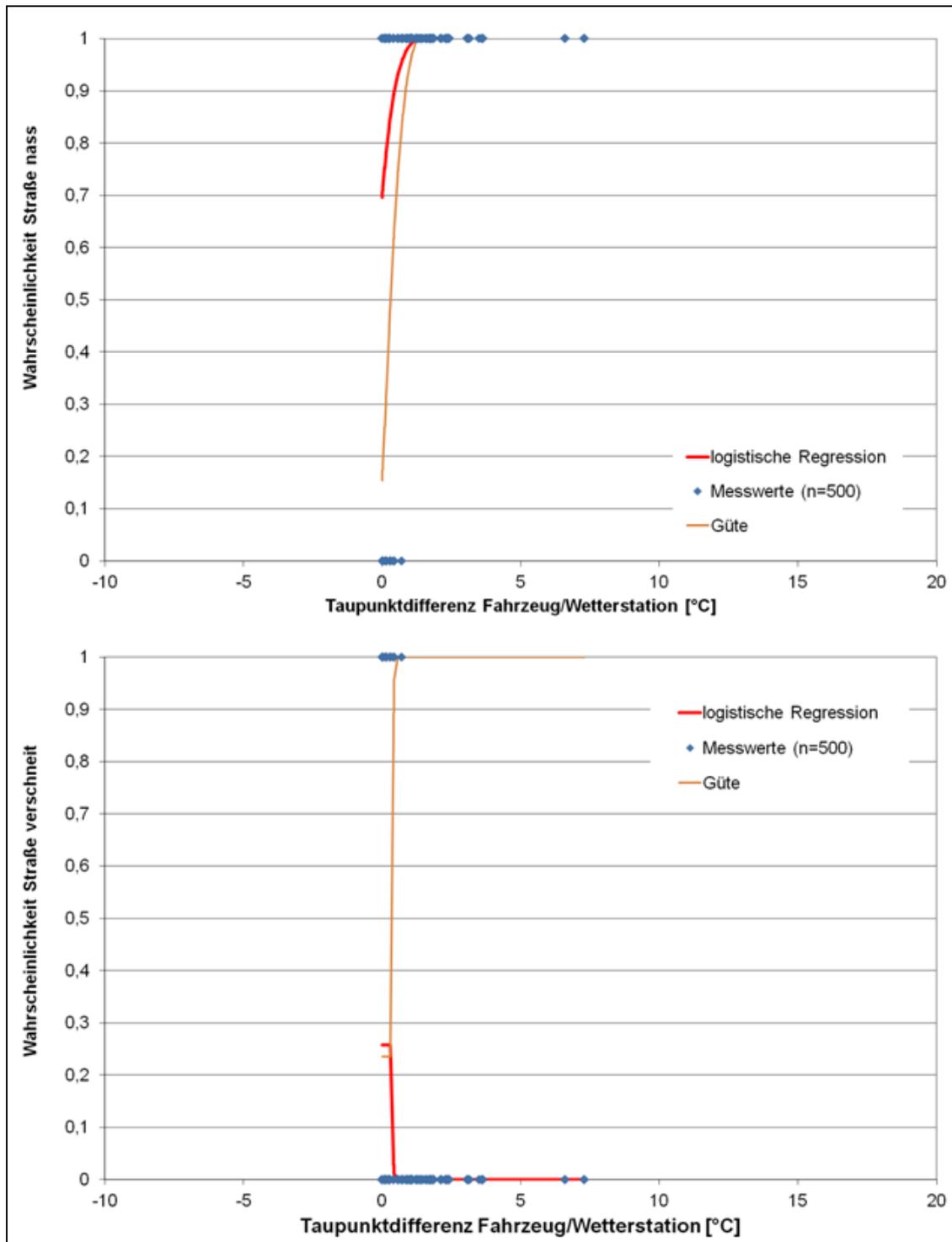


Abbildung 182: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „nass“ (oben) und „verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Taupunktdifferenz von Fahrzeug (Temperatur) und Wetterstation (berechneter Taupunkt)

## Logistische Regression und Güte für die Wischergeschwindigkeit

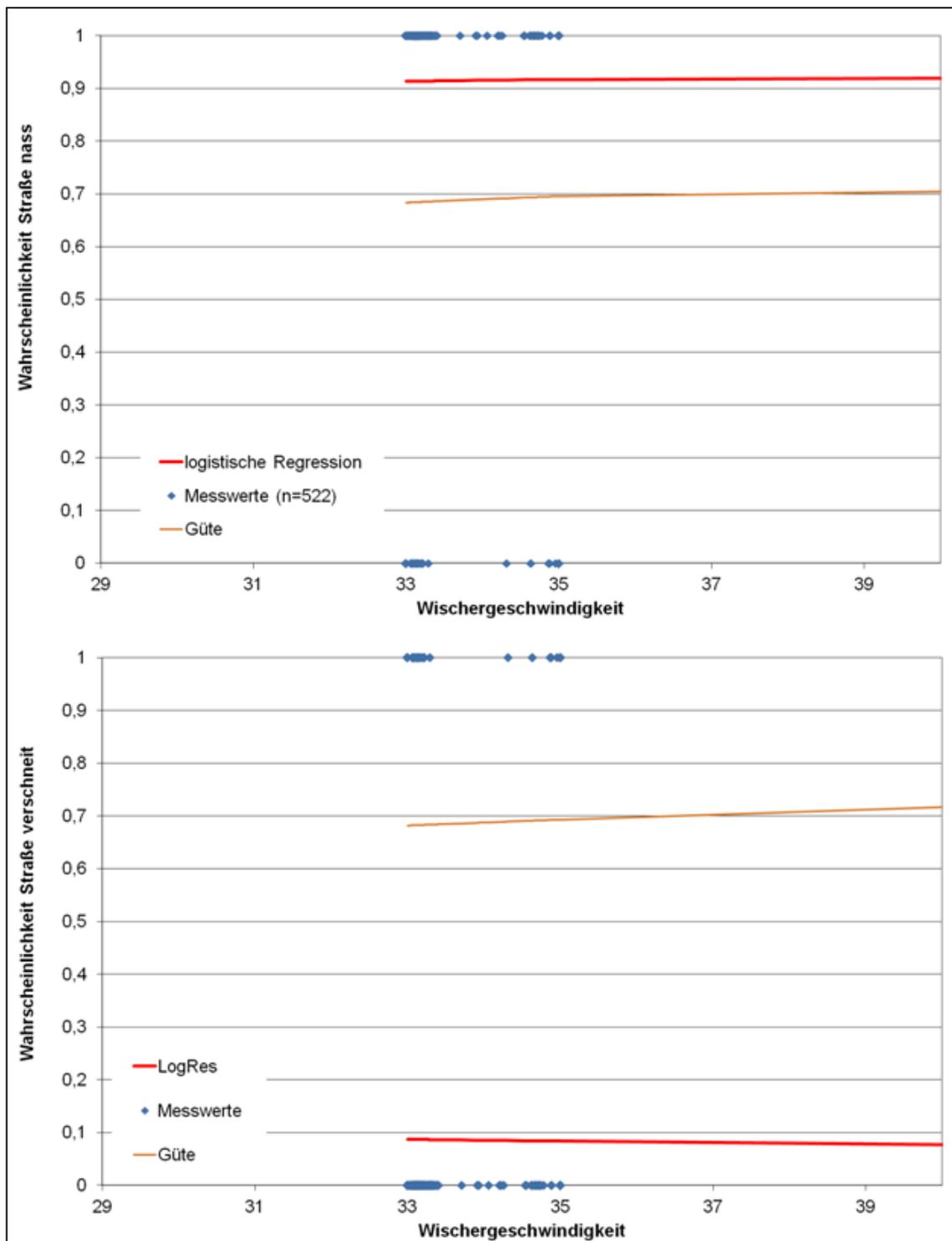


Abbildung 183: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „nass“ (oben) und „verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Wischergeschwindigkeit

Logistische Regression und Güte für den Straßenzustand der Glättemeldeanlage

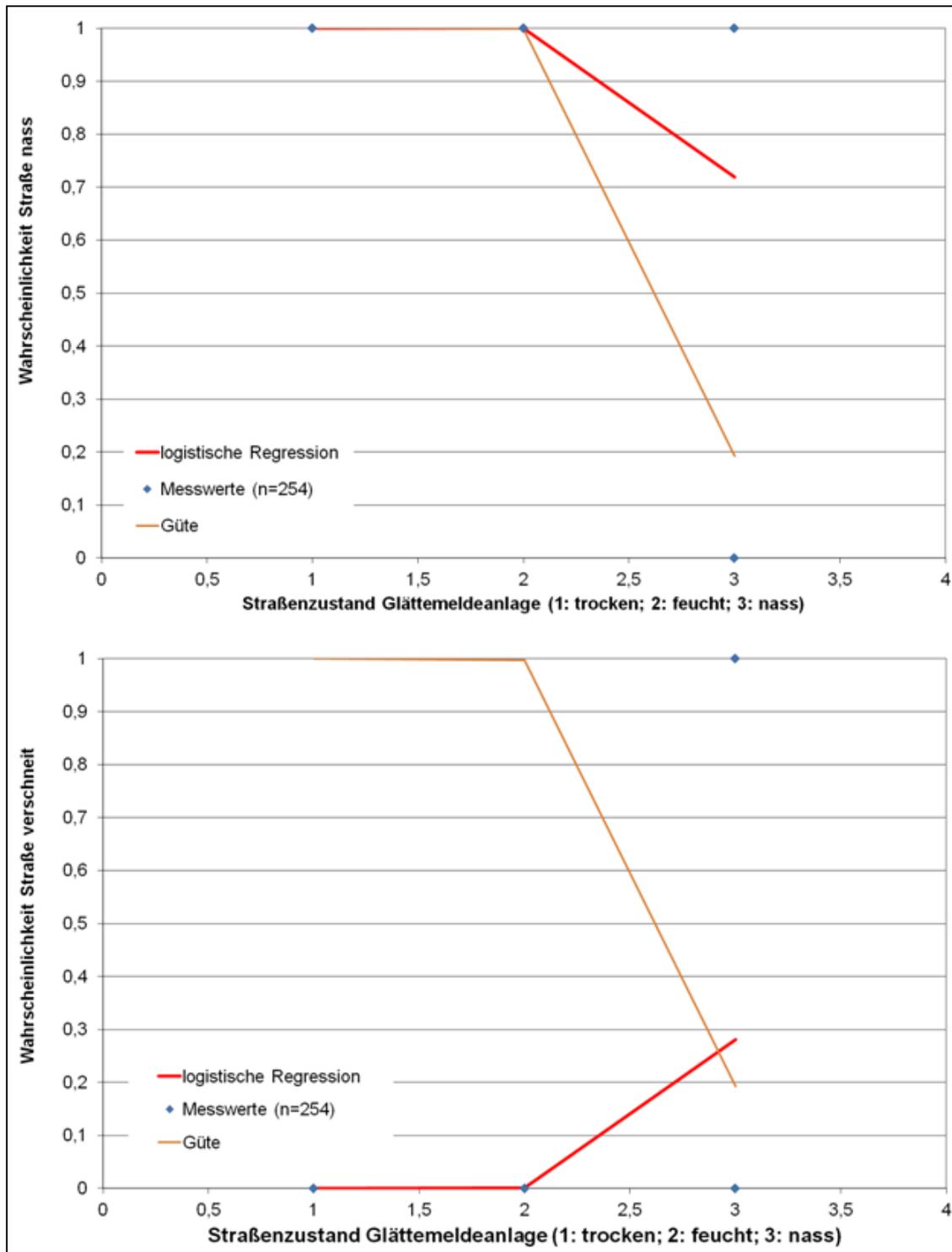


Abbildung 184: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „nass“ (oben) und „verschneit“ (unten) in Abhängigkeit vom Straßenzustand der Glättemeldeanlage (1: trocken, 2: feucht, 3: nass)

## Logistische Regression und Güte für die Umgebungstemperatur des Fahrzeugs

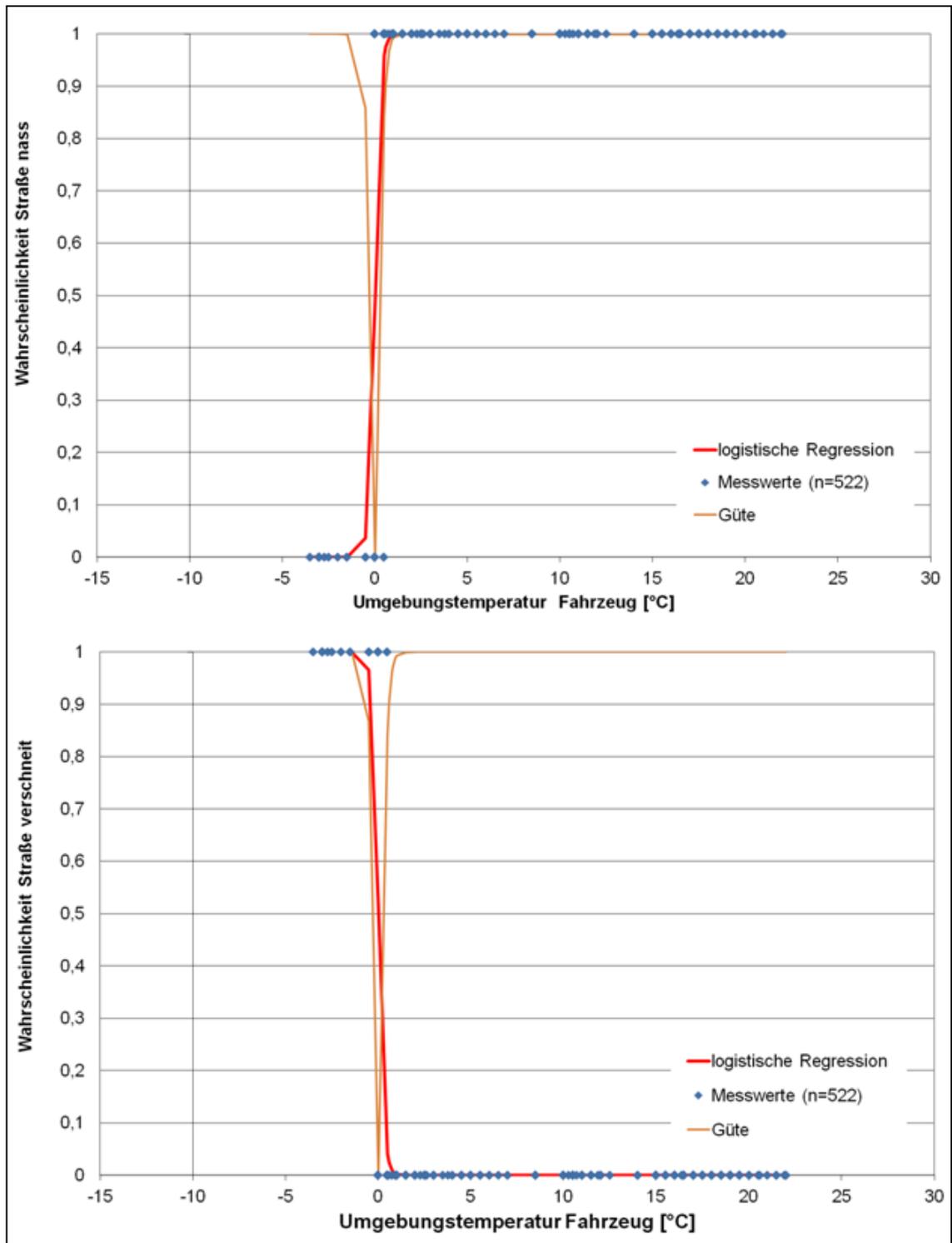


Abbildung 185: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „nass“ (oben) und „verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur des Fahrzeugs

Logistische Regression und Güte für die Oberflächentemperatur gemessen vom Vaisala

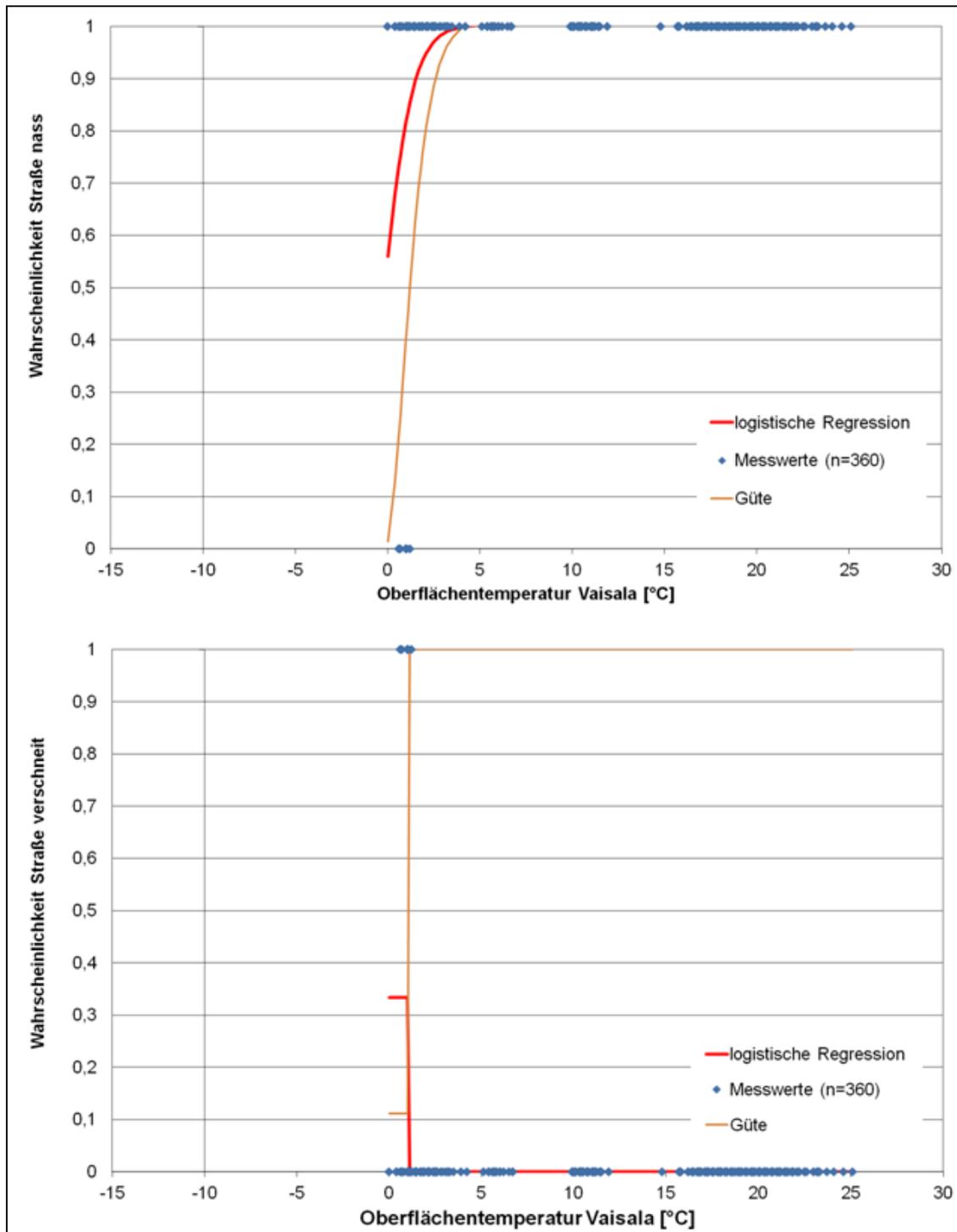


Abbildung 186: Wahrscheinlichkeit für den Straßenzustand „nass“ (oben) und „verschneit“ (unten) in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur gemessen vom Vaisala







## Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2010)

Nr.	Titel
227	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünnbleche aus Stahl, 2010
228	Systemmodellierung für Komponenten von Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung von Funktions- und EMV-Gesichtspunkten, 2010
229	Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, 2010
230	Analyse der sekundären Gewichtseinsparung, 2010
231	Zuverlässigkeit von automotive embedded Systems, 2011
232	Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung, 2011
233	Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge, 2011
234	Konsistentes Materialmodell für Umwandlung und mechanische Eigenschaften beim Schweißen hochfester Mehrphasen-Stähle, 2011
235	Makrostrukturelle Änderungen des Straßenverkehrslärms, Auswirkung auf Lästigkeit und Leistung, 2011
236	Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden von Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation, 2011
237	Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen, 2011
238	Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln, 2012
239	Überlasten und ihre Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit widerstandspunktgeschweißter Feinblechstrukturen, 2012
240	Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte, 2012
241	Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens, 2012
242	Nutzung des Leichtbaupotentials von höchstfesten Stahlfeinblechen durch die Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen auf die Festigkeitseigenschaften, 2012
243	Aluminiumschaum für den Automobileinsatz, 2012
244	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch belastungsgerechte Gestaltung und innovative Lösungen für lokale Verstärkungen von Fahrzeugstrukturen in Mischbauweise, 2012
245	Verkehrssicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit dem geringen Geräuschniveau von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, 2012
246	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch die Entwicklung von Crashabsorbern aus textilverstärkten Kunststoffen auf Basis geflochtener Preforms und deren Abbildung in der Simulation, 2013
247	Zuverlässige Wiederverwendung und abgesicherte Integration von Softwarekomponenten im Automobil, 2013
248	Modellierung des dynamischen Verhaltens von Komponenten im Bordnetz unter Berücksichtigung des EMV-Verhaltens im Hochvoltbereich, 2013
249	Hochspannungsverkopplung in elektronischen Komponenten und Steuergeräten, 2013
250	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter Schubbeanspruchung, 2013

- 251 Parametrischer Bauraum – synchronisierter Fahrzeugentwurf, 2013
- 252 Reifenentwicklung unter aerodynamischen Aspekten, 2013
- 253 Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte – Phase 2, 2013
- 254 Qualifizierung von Aluminiumwerkstoffen für korrosiv beanspruchte Fahrwerksbauteile unter zyklischer Belastung (Salzkorrosion), 2013
- 255 Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen, 2013
- 256 Naturalistic Driving Data, Re-Analyse von Daten aus dem EU-Projekt euroFOT, 2013
- 257 Ableitung eines messbaren Klimasummenmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge, 2013
- 258 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen, Teile 1 und 2, 2013
- 259 Erweiterung des Kerbspannungskonzepts auf Nahtübergänge von Linienschweißnähten an dünnen Blechen, 2013
- 260 Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindeinfluss, 2013
- 261 Rechnerische und probandengestützte Untersuchung des Einflusses der Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen auf die thermische Behaglichkeit, 2013
- 262 Modellierung der Auswirkungen verkehrsbedingter Partikelanzahl-Emissionen auf die Luftqualität für eine typische Hauptverkehrsstraße, 2013
- 263 Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
- 264 Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
- 265 Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
- 266 Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crash-simulation von Punktschweißverbindungen, 2014
- 267 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
- 268 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
- 269 Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
- 270 Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
- 271 Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
- 272 Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
- 273 UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
- 274 Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
- 275 Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
- 276 Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
- 277 Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015

- 278 Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
- 279 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
- 280 PCM from iGLAD database, 2015
- 281 Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
- 282 Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
- 283 Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
- 284 Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
- 285 Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016
- 286  $\chi$ MCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
- 287 Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
- 288 Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
- 289 Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
- 290 Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
- 291 Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
- 292 Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017
- 293 Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
- 294 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feibleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
- 295 Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
- 296 Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
- 297 Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
- 298 Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
- 299 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017

## Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 <a href="http://www.vda-fat.de">www.vda-fat.de</a>
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2017

**VDA**

Verband der  
Automobilindustrie

**FAT**

Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik

Behrenstraße 35  
10117 Berlin  
[www.vda.de](http://www.vda.de)  
[www.vda-fat.de](http://www.vda-fat.de)