Prognose des Kraftschlusspotenzials bei schweren Güterkraftfahrzeugen (> 12 t zGG.)

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Fahrzeugtechnik Heft F 165

bast
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Prognose des Kraftschlusspotenzials bei schweren Güterkraftfahrzeugen (> 12 t zGG.)

von

Nils Büteröwe, Gerd Müller

Technische Universität Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme,
Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet Kraftfahrzeuge,
Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Fahrzeugtechnik Heft F 165

bast
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

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

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

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: https://bast.opus.hbz-nrw.de

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 82.0722
Prognose des Kraftschlusspotenzials bei schweren Güterkraftfahrzeugen (Gkfz) (>12t zGG)

Fachbetreuung:
Adrian Hellmann

Referat:
Aktive Fahrzeugsicherheit und Fahrerassistenzsysteme

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9307 | ISBN 978-3-95606-854-6 | https://doi.org/10.60850/bericht-f165

Bergisch Gladbach, Mai 2025

Kurzfassung – Abstract

Prognose des Kraftschlusspotenzials bei schweren Güterkraftfahrzeugen (> 12 t zGG.)

Erweiterte Fahrerassistenzsysteme (ADAS) gewinnen in der Fahrzeugentwicklung immer mehr an Bedeutung. Insbesondere bei Nutzfahrzeugen führt dies zu mehr Sicherheit, mehr Komfort für den Fahrer und geringeren Gesamtbetriebskosten. Die derzeit auf dem Markt befindlichen Systeme zielen auf SAE Level 2 mit teilautomatisierten Fahrfunktionen ab. Zukünftige Lkw-Designs werden höhere Automatisierungsgrade anstreben. In diesem Zusammenhang ist die Kenntnis des Reibwertpotenzials zwischen der Straßenoberfläche und den Fahrzeugreifen sowie die anschließende Anpassung automatisierter Fahrfunktionen von entscheidender Bedeutung für eine sichere Längs- und Querführung von Fahrzeugen im Allgemeinen. In vorangegangenen Forschungsprojekten wurde ein zuverlässiges und funktionales Verfahren zur ursachenbasierten Reibwertpotenzialschätzung für Pkw entwickelt (Müller et al., 2017; Müller et al., 2019). Unfälle, die durch Straßenglätte verursacht werden, machen einen erheblichen Anteil am Gesamtunfallgeschehen aus. Mit Hilfe einer detaillierten Analyse von Unfalldaten konnte gezeigt werden, dass das System ein großes Potenzial zur Unfallvermeidung hat. Dies gilt auch für Lkw-Unfälle (Müller et al., 2021). Die Methode selbst ist fahrzeugunabhängig, jedoch an Pkw und deren Fahrdynamik angepasst. Im Rahmen des von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) finanzierten Forschungsprojekts "Prognose des Reibungspotenzials bei schweren Nutzfahrzeugen (> 12 t)" wird die Abschätzung des Reibungspotenzials weiterentwickelt und für schwere Nutzfahrzeuge angepasst.

In diesem Bericht werden verschiedene Ergebnisse aus realen Fahrversuchen, die Methode der Reibwertpotenzialschätzung im Allgemeinen, sowie eine Betrachtung des möglichen Einsatzes für zukünftige Lkw-Fahrerassistenzfunktionen vorgestellt.

Das maximal nutzbare Reibwertpotenzial wird durch Bremsmanöver innerhalb des ABS-Regelbereichs bei Geradeausfahrten auf horizontalen Straßenabschnitten ermittelt. Alle Reibwertpotenzialmessungen werden parallel mit einem Sattelzug-Lkw und einem Pkw durchgeführt, um einen permanenten Vergleich zwischen beiden Fahrzeugen zu ermöglichen. Zusätzlich zu den fahrzeugeigenen Sensoren sind beide Versuchsfahrzeuge mit entsprechender Messtechnik zur Aufzeichnung der Beschleunigung und weiterer Umweltdaten ausgestattet. Zunächst werden erste Untersuchungen auf einer Teststrecke durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Beladungszustände und verschiedener Ausgangsgeschwindigkeiten auf das maximal nutzbare Reibwertpotenzial zu ermitteln. Weitere Messungen werden auf verschiedenen bewässerten Oberflächen durchgeführt. Anschließend werden Reibwertpotenzialmessungen unter realen Fahrbedingungen auf öffentlichen Straßen in Brandenburg durchgeführt. Über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr wird von der TU Berlin und der IAV eine umfangreiche Reibwertdatenbank aufgebaut. Das Ziel ist es dabei möglichst alle Witterungsbedingungen eines Jahres zu berücksichtigen. Vergleichbare Messungen zwischen Pkw und Lkw in einem solchen Umfang sind aus der aktuellen Literatur nicht bekannt.

Es wird daher ein ursachenbasierter Ansatz zur Reibwertpotenzialschätzung entwickelt, welcher zuverlässige Ergebnisse liefert und im Echtzeitbetrieb eingesetzt werden kann. Der Kern dieser Methode basiert auf der Abschätzung des

Straßenzustandes unter ausschließlicher Verwendung externer Wetterdaten, die eine Reibwertpotenzialvorhersage für den Bereich um das Ego-Fahrzeug gewährleisten. Spezifische Anpassungen des Algorithmus ermöglichen die Übertragbarkeit für die Anwendungen im Schwerlastverkehr. Die Ergebnisse umfassen verschiedene Analysen der Effektivität des Systems, wobei der Schwerpunkt auf der Quantifizierung seiner Zuverlässigkeit und Genauigkeit für den Versuchs-Lkw liegt.

Prognosis of the friction potential of heavy-duty vehicles (> 12 t)

Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS) are getting more and more important in vehicle development. Especially for commercial vehicles, this results in an increase in safety, more comfort for drivers, and reduced Total Cost of Ownership (TCO). Current systems on the market are targeting up to SAE Level 2 with partially automated driving features. The future truck design will potentially aim for higher levels of automation. In this context, the knowledge of the friction potential between the road surface and vehicle tires, as well as the subsequent adaption of the automated driving functions is essential for the safe longitudinal and lateral guidance of vehicles in general. In previous research projects, a reliable and functional cause-based friction potential estimation method for passenger cars was developed (Müller et al., 2017; Müller et al., 2019). Accidents caused by slippery roads account for a significant proportion of total accidents. With the help of a detailed analysis of accident data, it was possible to show that the system has great potential for accident avoidance. This also applies to truck accidents (Müller et al., 2021). The method is vehicle independent, however adapted to passenger cars and their vehicle dynamics. As part of the research project “Prognosis of the friction potential in heavy goods vehicles (> 12 t)”, financed by the Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), the estimation of the friction potential coefficient shall be further developed and adopted for heavy-duty vehicles.

This report shows results from real-driving experiments, the friction prediction method in general, and a consideration of its potential use for future truck driver assistance systems.

The maximum usable friction potential is determined by using braking maneuvers within the ABS control range while driving straight-ahead on horizontal road sections. All friction potential measurements are conducted in parallel with a heavy-duty long-haul truck and a passenger car to enable a permanent comparison between both vehicles. In addition to the vehicle's own sensors, both test vehicles are equipped with data acquisition systems to record acceleration as well as various environmental data. First of all, initial investigations are performed on a test track to determine the influence of varying loading conditions and different initial speeds on the maximum usable friction potential. Further measurements are accomplished with various irrigated surfaces. Subsequently, friction potential measurements are carried out under real driving conditions on public roads in Brandenburg. Over a period of more than a year, a substantial database is collected by TU Berlin and IAV. The aim is to reproduce all the weather conditions throughout the year to calibrate the algorithm and set up implementation scenarios for ADAS. Comparative measurements between passenger cars and trucks on such a scale are not yet known from the current literature.

In the project, a cause-based approach for friction potential estimation is developed, which provides reliable results and is capable of being implemented as a large-scale friction map. The core of this method is based on road condition estimation using only external weather data, which ensures a friction potential prediction for the area around the ego vehicle. Specific adaptations of the algorithm allow the transfer to heavy-duty truck applications. The results include various analyses of the system's effectiveness, with a focus on quantifying its reliability and accuracy for the test truck.

Summary

Prognosis of the friction potential of heavy-duty vehicles (> 12 t)

1 Introduction, aims and procedure

Currently available driver assistance systems are designed in such a way that consideration of the current road condition is not required (Ahrenhold et al., 2021; Heimlich, 2016; Lex, 2015). Therefore, estimating the friction potential remains the responsibility of the driver. Knowledge of the friction potential is crucial for safe longitudinal and lateral vehicle guidance. This applies to both human drivers and the further development of automated driving functions and is particularly essential for fully automated driving.

In previous research projects, a reliable and functional cause-based friction potential estimation method for passenger cars was developed (Müller et al., 2017; Müller et al., 2019). Additionally, significant accident prevention potential was demonstrated (Müller et al., 2021). The described estimation method is applicable independent of the respective vehicle. However, it is overall adapted for passenger cars and their driving dynamics. One of the most common causes of truck accidents is inappropriate speed and insufficient distance to preceding vehicles (Müller et al., 2017; Müller et al., 2019). In addition, a significant accident avoidance potential could be shown (Müller et al., 2021). The method is vehicle independent but however, adapted to passenger cars and their vehicle dynamics. One of the most common causes of accidents involving trucks is mismatched speeds and insufficient distance to vehicles in front (Müller et al., 2021; Statistisches Bundesamt Destatis, 2022). Consequently, the maximum transmissible tire forces for the respective driving situation are not correctly estimated by the driver in such situations. Especially on slightly moist road surfaces, there is already a large step in the available friction potential (Gnadler & Marwitz, 2004).

This project aims to further develop the estimation of the coefficient of friction potential and adapt it for heavy commercial vehicles. For this purpose, a test semi-truck will be constructed, with which corresponding measurement campaigns will be conducted. Based on the collected data, the estimation method will be adapted for a truck and tested in the field under the weather conditions of a year.

The following project steps will be carried out:

1. Literature research on measurement and estimation of the friction potential.
2. The fundamental transferability from passenger cars to trucks will be examined through literature research and vehicle dynamics simulations.
3. A test truck will be equipped with appropriate measurement technology. Extensive measurement campaigns will be carried out to investigate the coefficient of friction potential utilization of the truck, and friction database for the truck will be developed.
4. A new algorithm for friction potential estimation will be developed, which fully operates without data measured on the vehicle and enables the creation of a large-scale friction map that can be used in real-time operation.

2 Analysis of the transferability from passenger cars to trucks

In order to ensure the transferability of the method to the truck, extensive literature research is carried out on the topic of truck tires, the vehicle dynamics of a truck, as well as the commercial vehicle braking system and commercial vehicle ABS. These searches are supported by corresponding vehicle dynamics simulations. A vehicle dynamics model is developed that can simulate longitudinal braking maneuvers of a semi-trailer under various conditions. The simulation model is parameterized with respect to the real test vehicle and validated using real measurement data. The simulation results make it possible to investigate the wheel contact force, tire longitudinal force, and coefficient of friction between the tire and road surface for emergency braking scenarios with different loading states of the semi-trailer and at different initial speeds.

3 Friction potential measurements

A test truck (Mercedes-Benz Actros 1851 LS 4X2 F 13, built in 2011) is equipped with measuring technology. Various measurement campaigns are carried out to investigate the friction potential utilization of the truck. The possible utilization of the friction potential is determined by means of longitudinal acceleration during braking in the ABS control range. The influence of speed and different loads are considered. In addition, tests are carried out on various irrigated surfaces of an ABS test track. With the findings from these tests, a one-year measurement campaign is carried out on a predetermined route on public roads with a half-loaded truck, covering the weather conditions of one year. In order to draw further conclusions about existing knowledge from previous research with a passenger car, all measurements are also carried out in parallel with a test car equipped with extensive measuring technology. Overall, a new friction potential database is created with over 500 valid measurements for the truck and the car, see **Figure 1**.

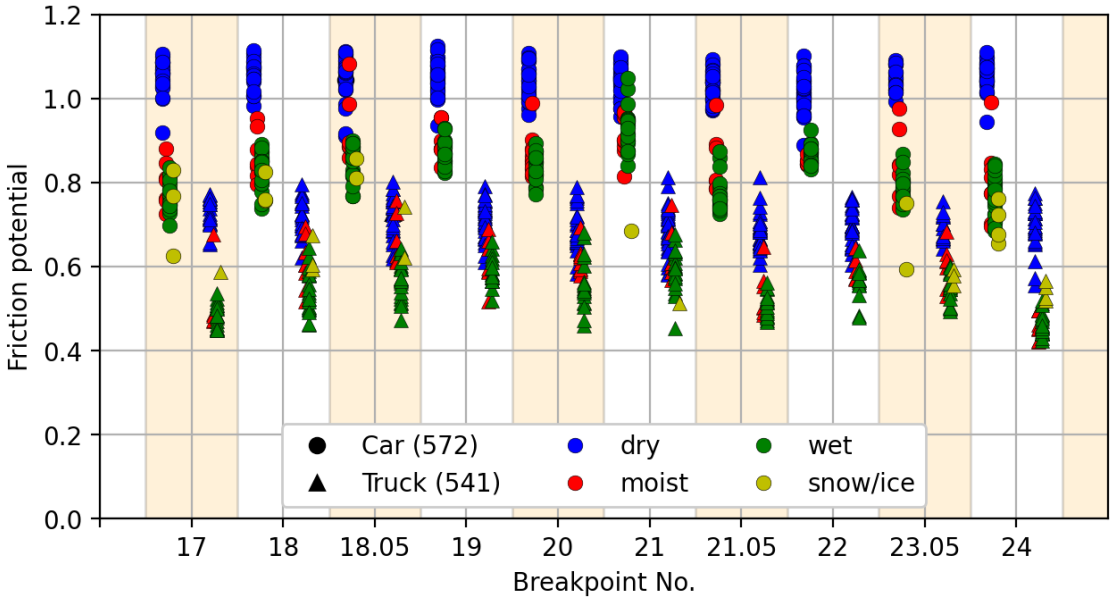

Figure 1: Friction database for the truck and passenger car; dry (truck: 269, car: 282), moist (truck: 71, car: 76), wet (truck: 187, car: 199), snow/ice (truck: 14, car: 15)

A comparison with the passenger car measurements shows in all tests that the truck is able to exploit the available coefficient of friction potential significantly less effectively than the passenger car. Particularly in non-dry conditions, surprisingly low values are achieved, which illustrates the need for a functional friction coefficient potential estimate.

4 Friction potential estimation

In the context of this project, a cause-based friction potential estimation method is being developed, considering the main influencing factors of the intermediate layer, road surface, tire type, and vehicle dynamics of a given vehicle. This method consists essentially of a vehicle-independent intermediate layer estimation and a subsequent vehicle-specific friction potential estimation. The intermediate layer state is estimated by the evaluation of various weather data. For the determined intermediate layer state, the usable friction potential is estimated based on knowledge of the road surface and the type of tire used, using the data of the friction potential database. The overarching goal is to develop a method that enables the creation of a large-scale friction map independent of the vehicle position and that it can be adapted for various vehicle types and classes. The algorithm for intermediate layer estimation is based on a simple artificial neural network (ANN) that is trained to classify the intermediate layer states dry, moist/wet, or snowy based on the input variables. The input variables include the air temperature at 2 m and 5 cm height, air pressure, relative humidity, and dew point temperature, which are measured by DWD climate stations and then interpolated to estimate the intermediate layer state for the respective position. In addition, data from the DWD precipitation radar for this position are evaluated in such a way that the time since the last rain and the duration of the last rain are considered as further input parameters. **Table 1** shows the confusion matrix for the test dataset, with an overall accuracy of 93.7 %.

Table 1: Confusion matrix of the neural network for the classification of three intermediate layer states when applied to the test data set with 1672 data points; green: true positive, red: false negative, yellow: false positive

labeled \ prediction	dry	moist/wet	snow/ice
dry	1019 (94.18 %)	63 (5.82 %)	0 (0.0 %)
moist/wet	40 (7.56 %)	489 (92.44 %)	0 (0.0 %)
snow/ice	0 (0.0 %)	8 (13.11 %)	53 (86.89 %)

Digital maps such as Open Street Map (OSM) allow access to digital road data with embedded information about the road surface. In combination with the estimated intermediate layer condition, a prediction of the present friction potential can be made using a corresponding friction database. The merging and corresponding visualization of this data enables the visualization as a friction map. **Figure 2** shows a friction map with estimated friction potential for the truck on February 2, 2023 at 12:15 pm. In addition, the results of corresponding friction potential measurements performed at that time are displayed. The color-coded estimated friction potential for the various road segments corresponds to the mean value of the assigned friction class and shows a high correlation with the measured friction potentials at the corresponding locations.

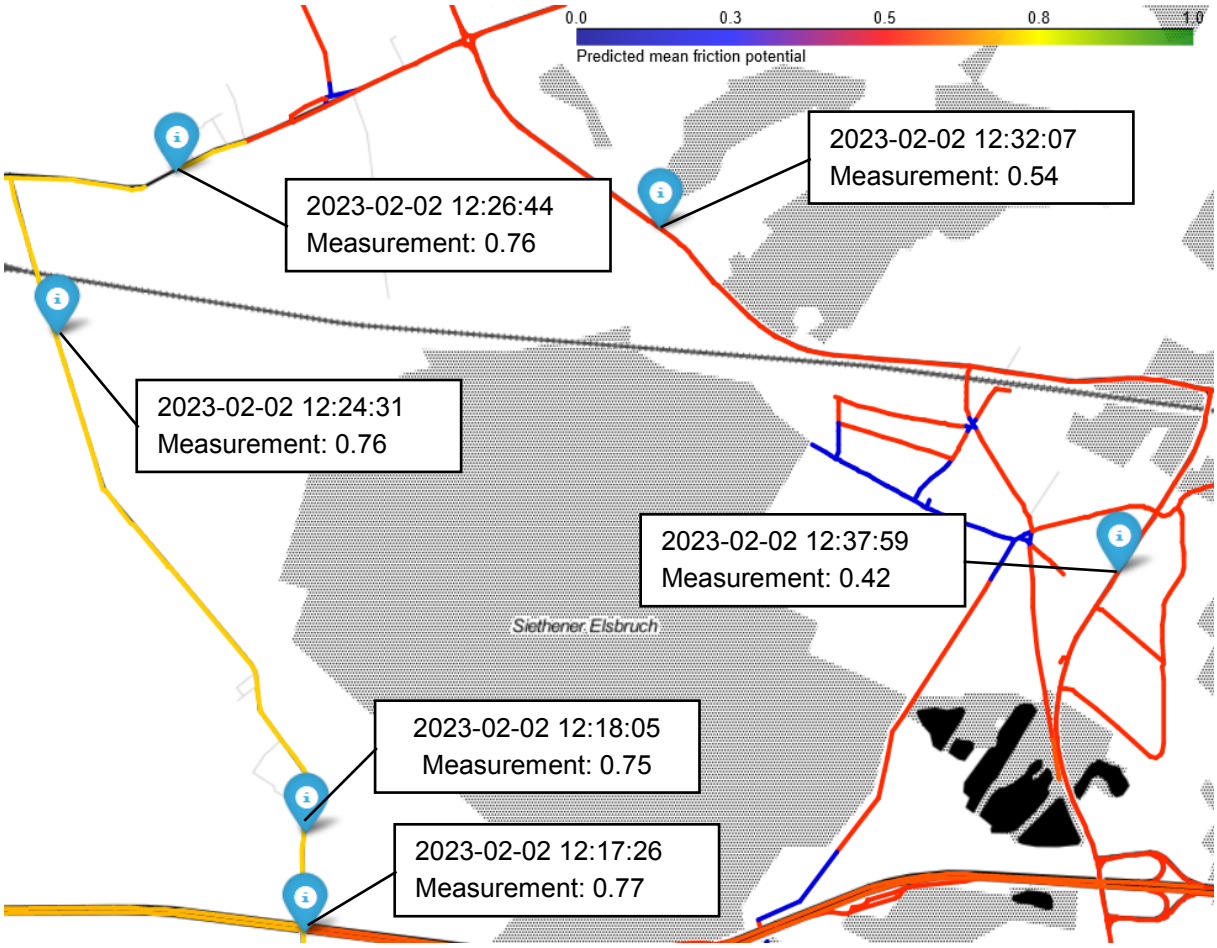

Figure 2: Friction map for the truck (02.02.2023 at 12:15) including measurement results collected at that time, © OpenStreetMap

To analyze the effectiveness of the overall system, the estimated friction potential for the truck is compared with the corresponding friction potential measurements of the truck. **Figure 3** illustrates, for each measurement (Measurement No.), the estimated upper and lower friction potential. In 95.6 % of cases, the measured friction potential falls within the estimated range. Challenges arise during the transition from non-dry to dry conditions, and it should be noted that only dry and non-dry asphalt roads were considered for the measurements. Extensive measurements for snow or ice, as well as the consideration of concrete or cobblestone surfaces, were not be taken into account and should be considered for further analysis of the described method.

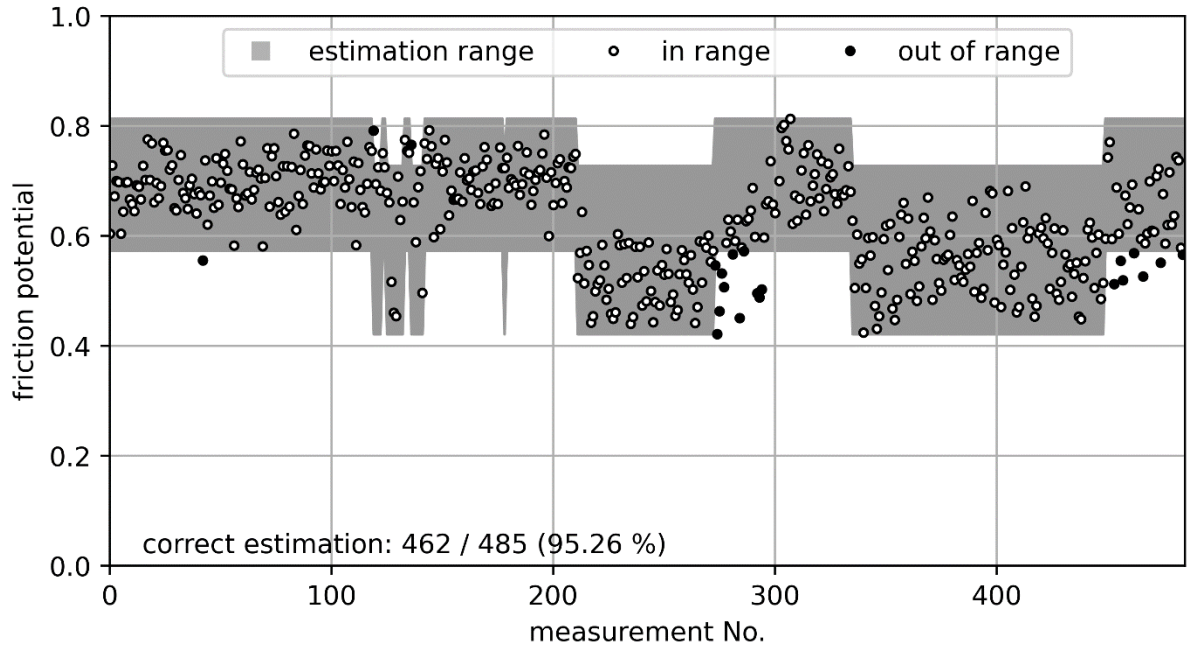

Figure 3: Friction potential estimation considering the 3 intermediate layer classes dry, damp/wet, snowy/icy for the location and time of all measurements performed with the test truck

5 Conclusion

A reliable cause-based friction potential estimation method is developed and adapted for a heavy-duty long-haul truck. A high reliability of the predicted friction potential can be demonstrated for both dry and non-dry asphalt roads. The method is based on a vehicle-independent intermediate layer estimation and thus enables the predictive estimation of the friction potential, for example, for the area in front of a vehicle. This allows the method to be integrated into vehicles for the creation of a real-time friction coefficient map, which overall has a high potential for friction coefficient-based improvements in Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS), for road conditions adapted dynamics in automated driving, or as a warning system for human drivers. A particular advantage of the method presented here is that it works without additional vehicle sensors.

Bibliography

Ahrenhold, T., Iatropoulos, J., Pethe, C. & Henze, R. (2021). Anforderungen an die Güte, Verfügbarkeit und Vorausschau einer Reibwertschätzung aus Funktionssicht: FAT Schriftenreihe 355.

Gnadler, R. & Marwitz, H. (2004). Neues System zur Ermittlung des Kraftschlusspotenzials im Fahrbetrieb.

Heimlich, E. (2016). *Untersuchung von fahrdynamischen Einflussgrößen auf die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn in alltäglichen Fahrsituationen.*

Lex, C. (2015). *Maximum tire-road friction coefficient estimation.* https://doi.org/10.3217/978-3-85125-422-8

Müller, G., Bräsemann, C., Joao, N., Sodoudi, S. & Müller, S. (2017). Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen: FAT 299.

Müller, G., Leschik, C., Gregull, V., Sieron, N. & Müller, S. (2019). Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen – Umsetzung und Anwendung: FAT 322.

Müller, G., Thüring, M., Jänsch, M., Epple, S., Kretschmer, F., Gottwald, Y. L., Oehring, F. & Winkenbach, A. (2021). Analyse von glättebedingten Güterkraftfahrzeuge - Unfällen (>12 t zulässiges Gesamtgewicht).

Statistisches Bundesamt Destatis (2022). Verkehrsunfälle - Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr 2020.

Inhalt

Abkürzungen 14

1 Einleitung 16

2 Literaturrecherche und Stand der Wissenschaft 17

2.1 Messung des Reibwertpotenzials 17

2.2 Schätzung des Reibwertpotenzials 18

2.2.1 Effektbasierte Ansätze 19

2.2.2 Ursachenbasierte Ansätze 20

2.2.3 Reibwertpotenzialschätzung für Lkw 22

3 Analyse der Übertragbarkeit von Pkw auf Lkw 24

3.1 Lkw-Reifen 24

3.2 Elektronisches Bremssystem und Anti-Blockier-System im Lkw 26

3.3 Lkw-Fahrdynamik 33

3.4 Fahrdynamiksimulation von Lkw-Längsbremsungen 35

4 Reibwertpotenzialmessungen 40

4.1 Messtechnik 40

4.2 Erprobung des Messfahrzeugs 44

4.3 Aufbau einer Lkw-Reibwertdatenbank 51

4.4 Vergleich mit standardisierten Messverfahren 54

5 Reibwertpotenzialschätzung 59

5.1 Methoden zur Zwischenschichtschätzung 59

5.1.1 Multinomiale logistische Regression 59

5.1.2 Künstliche Neuronale Netze 60

5.2 Wetterdaten 62

5.2.1 Verarbeitung der Wetterdaten 64

5.2.2 Verfügbarkeit und Qualität der Wetterdaten 66

5.3 Umsetzung der Zwischenschichtschätzung 68

5.4 Erarbeitung einer großflächigen Reibwertkarte ____ 70
5.5 Echtzeitschätzung im Demofahrzeug ____ 72
5.6 Analyse der Effektivität des Systems ____ 74

6 Zusammenfassung ____ 76

Literatur ____ 78

Bilder ____ 85

Tabellen ____ 87

Anhang ____ 88

Abkürzungen

ABS	Anti-Blockier-System
ADAS	Advanced Driver-Assistance Systems
ALB	Automatisch-lastabhängigen Bremskraftregler
API	Application Programming Interface (Programmierschnittstelle)
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
ASR	Antriebsschlupfregelung
ATC	Automatische Traktionskontrolle
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMW	Bayerische Motoren Werke
BP	Bremspunkt
CAN	Controller Area Network
CDC	Climate-Data-Center
CNN	Convolutional Neural Network
DWD	Deutscher Wetterdienst
EBS	Elektronisches Bremssystem
ECE	Economic Commission for Europe
ECU	Electronic Control Unit (Steuergerät)
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EU	Europäische Union
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
FU	Freie Universität
GMA	Glättemeldeanlage
GPS	Global Positioning System
GT	Grip Tester
IAV	Ingenieurgesellschaft Auto und Verkeh
IDW	Inverse Distance Weighting
IMU	Inertial Measurement Unit
IR	Individuelle Regelung
ISO	International Organization for Standardization
KNN	Künstliches neuronales Netz
LiDAR	Light Detection and Ranging
Lkw	Lastkraftwagen
MARWIS	Mobile Advanced Runway Weather Information Sensor
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MIR	Modifizierte individuelle Regelung
MSR	Motorschleppmomentregelung
Nfz	Nutzfahrzeug
OSM	Open Street Map
PFT	Portable Friction Tester
PID	Proportional-Integral-Derivative

Pkw	Personenkraftwagen
RADAR	Radio Detection and Ranging
ReLU	Rectified Linear Unit
RNN	Recurrent neural network
ROS	Robot Operating System
SAE	Society of Automotive Engineers
SCRIM	Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine
SKM	Seitenkraftmessverfahren
SL	Select-Low Regelung
SMR	Schleppmomentregelung
SRT	Skid Resistance Tester
tanh	Tangens hyperbolicus
TCO	Total Cost of Ownership
TU	Technische Universität
WSE	Wasser - Schnee - Eis
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

Gender Disclaimer

In diesem Bericht wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Dabei werden weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

1 Einleitung

Der Güterverkehr wird nach Schätzungen der EU-Kommission bis 2050 um 60 % zunehmen. Das deutsche Verkehrsministerium geht bis 2030 von einer Zunahme um 18 % aus, wobei die Transportleistung sogar um 38 % steigen könnte. Für den innerdeutschen Straßengüterverkehr wird bis 2030 mit einem Anstieg der durchschnittlichen Transportweite auf 167 km gerechnet, was einer Zunahme von 19 % im Vergleich zum Jahr 2010 entspricht. Immer mehr Waren werden online bestellt, auch die Bestellungen durch Einzelhändler nehmen zu, die Bestellung erfolgen häufig flexibel und kleinteilig anstatt in festen Zeitfenstern und mit immer länger werdenden Transportwegen. (Continental, 2020)

Derzeit verfügbare teilautomatisierte Fahrerassistenzsysteme sind so ausgelegt, dass eine Berücksichtigung des aktuellen Straßenzustands nicht erforderlich ist (T. Ahrenhold et al., 2021; Heimlich, 2016; Lex, 2015). Eine Schätzung des Reibwerts bleibt daher in der Verantwortung des Fahrers. Die Kenntnis des Reibwertpotenzials ist für eine sichere Längs- und Querführung eines Fahrzeugs von grundlegender Bedeutung. Das gilt sowohl für menschliche Fahrer als auch für die Weiterentwicklung automatisierter Fahrfunktionen und ist insbesondere beim vollautomatisierten Fahren unumgänglich. Für die allgemeine Sicherheit im Straßenverkehr und auch hinsichtlich der gesellschaftlichen Akzeptanz der fortschreitenden Automatisierung des Kraftfahrzeugs ist es von entscheidender Bedeutung die Unfallwahrscheinlichkeiten automatisierter Fahrzeuge gegenüber der von Personen gesteuerten Fahrzeugen durch eine automatische und zuverlässige Reibwertpotenzialschätzung zu reduzieren.

Im FAT-Projekt „Unfallvermeidung durch Reibwertprognose“ konnte bereits ein verlässliches und funktionierendes Verfahren zur Schätzung des Reibwertpotenzials für Pkw entwickelt werden (Müller et al., 2017; Müller et al., 2019). Zudem konnte ein erhebliches Unfallvermeidungspotenzial gezeigt werden (Müller et al., 2021). Das beschriebene Schätzverfahren ist unabhängig vom jeweiligen Fahrzeug anwendbar. Allerdings ist es insgesamt für Pkw und deren Fahrdynamik angepasst. Eine der häufigsten Unfallursachen von Lkw sind nicht angepasste Geschwindigkeiten und ungenügender Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen (Müller et al., 2021; Statistisches Bundesamt Destatis, 2022). Folglich werden die maximal übertragbaren Reifenkräfte für die jeweilige Fahrsituation vom Fahrer in derartigen Situationen falsch eingeschätzt. Besonders bei leicht feuchten Straßenoberflächen findet bereits ein großer Reibwertsprung statt (Gnadler & Marwitz, 2004).

Daher wird in diesem Projekt auf den bisherigen Erkenntnissen eine Methode zur Reibwertpotenzialschätzung entwickelt, die auch für schwere Güterkraftfahrzeuge vergleichbar genaue Ergebnisse erzielt. Dazu wird ein Versuchs-Lkw aufgebaut, mit dem entsprechende Messkampagnen durchgeführt werden. Basierend auf den erhobenen Daten wird das Schätzverfahren für den Lkw adaptiert und unter den Witterungsbedingungen eines Jahres im Feld erprobt.

2 Literaturrecherche und Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse einer eingehenden Literaturreche zum Stand der Technik bei der Messung und Schätzung des Reibwertpotenzials dargelegt. Da im Bereich der Pkw deutlich mehr Forschungsarbeiten durchgeführt werden, erfolgt zunächst ein allgemeiner Einstieg und anschließend eine spezifische Ausweitung für Lkw.

2.1 Messung des Reibwertpotenzials

Der Reibwertkoeffizient zwischen Reifen und Fahrbahn ist nach **Gleichung (1)** definiert als die normalisierte resultierende Horizontalkraft zwischen Reifen und Fahrbahn.

$$\mu = \frac{\sqrt{{F_X}^2 + {F_Y}^2}}{N_Z} \quad (1)$$

Der maximal nutzbare Kraftschluss μ_{max} wird als Reibwertpotenzial bezeichnet (Koskinen & Peussa, 2009). Das Reibwertpotenzial wird von zahlreichen verschiedenen Faktoren beeinflusst. Diese Einflussfaktoren lassen sich im Wesentlichen in die Hauptkategorien Reifen, Fahrbahn, Zwischenmedium und Fahrzeug unterteilen (Bachmann, 1998; Weber et al., 2002). Der nutzbare Kraftschluss ist zudem unmittelbar abhängig vom Radschlupf. Diese Abhängigkeit lässt sich in Form von sogenannten Reibwert-Schlupf-Diagrammen veranschaulichen, vgl. **Abbildung 1**. Der maximale Reibwert wird in Abhängigkeit der Straßenoberfläche und der vorliegenden Zwischenschicht für Schlupfwerte von ca. 5 bis 20 % erreicht. Ein Anti-Blockier-System (ABS) nutzt genau diese Eigenschaft und hat die Aufgabe den jeweiligen radindividuellen Radschlupf so zu regeln, dass das maximale Reibwertpotenzial zwischen Reifen und Fahrbahn genutzt wird und somit eine optimale Längsverzögerung erzielt wird (Reif, 2015). Links in Abbildung 1 sind verschiedene Reibwert-Schlupfkurven mit dem jeweiligen ABS Regelbereich für unterschiedliche Gegebenheiten dargestellt. Weiterhin ist zu beachten, dass sich mit zunehmendem Schräglaufwinkel der Seitenkraftbeiwert erhöht, wodurch sich das maximale Reibwertpotenzial verringert, vgl. Abbildung 1 rechts.

In Anbetracht dieser Eigenschaften kann das maximal nutzbare Reibwertpotenzial eines Fahrzeugs ermittelt werden, indem die Längsbeschleunigung während einer Vollbremsung mit maximalem ABS-Eingriff bei einer Geradeausfahrt auf einer waagerechten Straßenoberfläche gemessen wird. Nach (Müller et al., 2019) hat es sich erwiesen die Längsbeschleunigung einer derartigen ABS-Bremsung für ein Zeitfenster von 0,5 s auszuwerten, da die Bremsmanöver mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 30 km/h bei trockenen Bedingungen nicht wesentlich länger andauern. Dabei ist zu beachten, dass ABS in der Lage sind, den Radschlupf bei Geschwindigkeiten von mehr als ca. 5 km/h zuverlässig regeln zu können. Moderne ABS-Systeme sind sogar für den Geschwindigkeitsbereich von mehr als 2,5 km/h ausgelegt (Reif, 2015). Außerdem benötigt ein Fahrzeug während einer Vollbremsung zunächst einen kurzen Moment, bis die maximal mögliche Verzögerung erreicht wird (Lajewski et al., 2016). Neuere ABS-Generationen können die entsprechenden Zustandsgrößen zunehmend schneller korrekt identifizieren und sind

somit in der Lage den optimalen radindividuellen Radschlupf schneller einregeln. Eine allgemeingültige, fahrzeugunabhängige Auswertung des maximal nutzbaren Reibwertpotenzials erfolgt daher als Mittelwert der Längsbeschleunigung im 0,5 s langen Zeitintervall bevor das Fahrzeug eine Geschwindigkeit von 5 km/h unterschreitet nach **Gleichung (2)** (Müller et al., 2019).

$$\mu_{max} = \left|\frac{\overline{a_X}}{g}\right| \qquad \textbf{(2)}$$

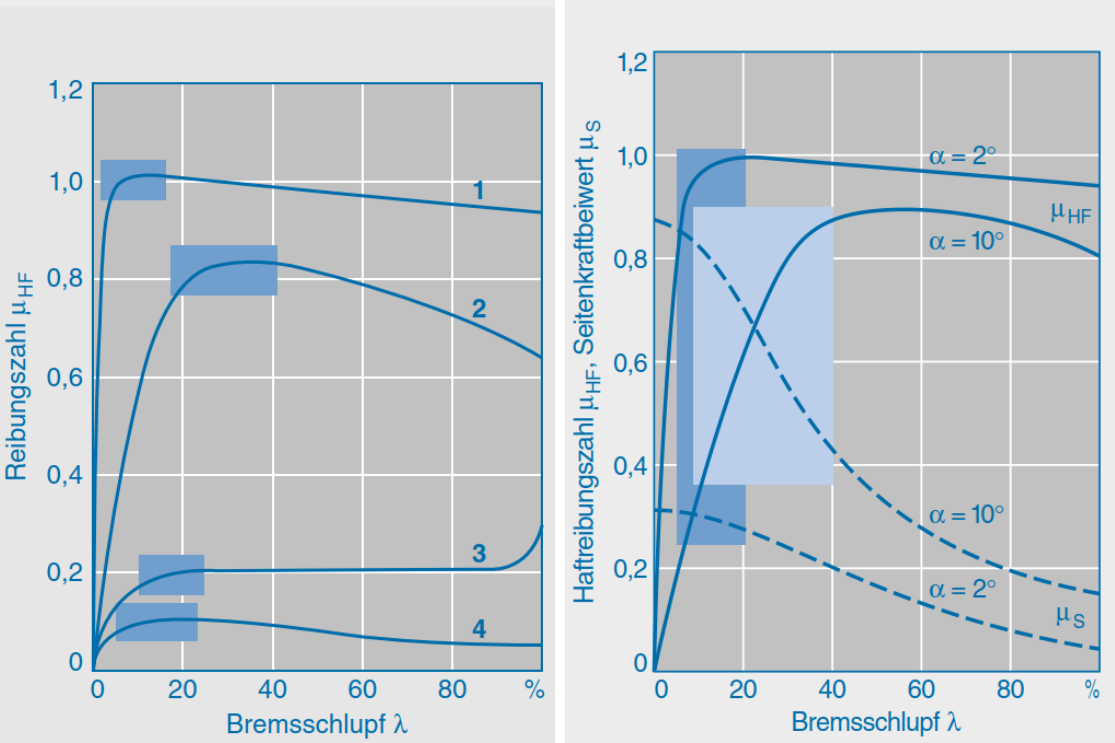

Abbildung 1: Reibwert-Schlupf-Diagramm (Reif, 2010),
links: 1) trockener Beton, 2) nasser Asphalt, 3) lockerer Schnee, 4) nasses Glatteis,
rechts: Haftreibungszahl und Seitenkraftbeiwert in Abhängigkeit von Bremsschlupf und Schräglaufwinkel *α*
blaue Fläche: ABS Regelbereiche

2.2 Schätzung des Reibwertpotenzials

Bestehende Methoden zur Schätzung des Reibwertpotenzials lassen sich im Wesentlichen in „ursachenbasierte“ und „effektbasierte“ Ansätze unterteilen. Ursachenbasierte Ansätze messen die Parameter, die den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn beeinflussen bzw. verändern und schätzen anhand dessen das vorliegende Reibwertpotenzial ab. Die Basis einer derartigen ursachenbasierten Reibwertpotenzialschätzung bilden Erfahrungswerte vergangener Reibwertpotenzialmessungen oder entsprechende Reibwertmodelle. Effektbasierte Ansätze messen die Effekte, die während der Fahrt durch Reibung auftreten und extrapolieren anhand dessen das aktuelle Reibwertpotenzial. (Müller et al., 2017)

Ahrenhold et al. untersuchen simulativ in welchem Maß der Fahrbahnreibwert die Funktionsweise verschiedener Funktionen der Stabilitäts- und Bahnführungsebene

beeinflusst. Konkret wird dabei die automatische Notbremse, der Abstandstempomat sowie Ausweich- und Spurhalteassistenten berücksichtigt und derart angepasst, dass sich das Funktionsverhalten in Abhängigkeit des vorliegenden Fahrbahnreibwerts verändert. Durch eine Variation des tatsächlich vorliegenden und des geschätzten Reibwerts werden die Anforderungen an die Güte und die Vorausschau von reibwertschätzenden Sensorsystemen abgeleitet. **Abbildung 2** zeigt die im Rahmen der Untersuchungen verwendeten Reibwertklassen. Zudem erfolgt eine ASIL-Klassifikation für die automatische Notbremse, den Abstandsregeltempomanten und den aktiven Spurhalteassistenten. Damit die ASIL-Klassifikation der trockenen Fahrbahn auch für niedrige Reibwerte beibehalten werden kann, wird anschließend abgeschätzt, inwieweit der Fahrbahnreibwert dazu bekannt sein muss. (T. Ahrenhold et al., 2021; Tim Ahrenhold et al., 2022)

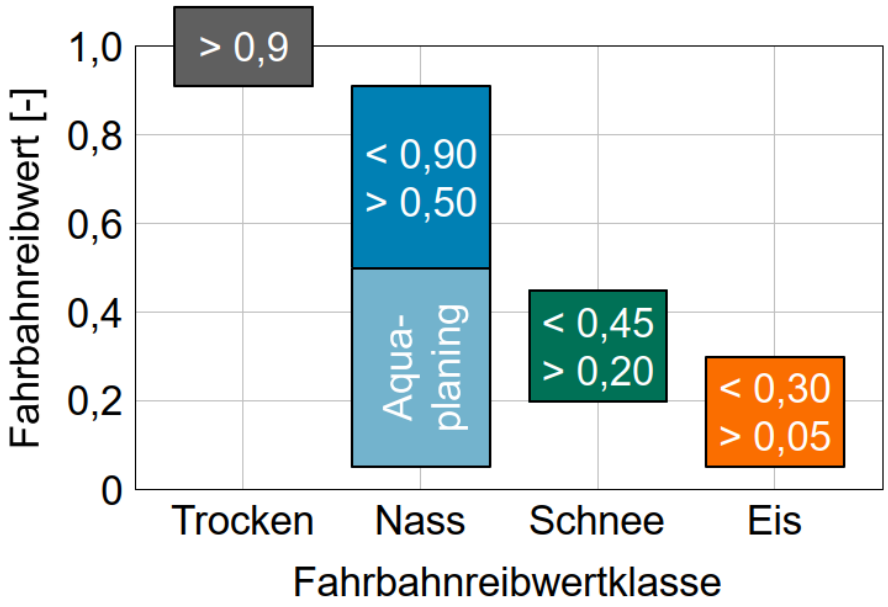

Abbildung 2: Fahrbahnreibwertbereiche einer trockenen, nassen, schnee- und eisbedeckten Fahrbahn (T. Ahrenhold et al., 2021)

2.2.1 Effektbasierte Ansätze

(Padarthy & Heyns, 2019) entwickeln ein System, welches winterliche Straßenzustände erkennt und den jeweiligen Zustand in die Klassen Eis, Schnee und Schneematsch einstuft. Dabei werden ausschließlich die herkömmlich an einem Fahrzeug verfügbaren Größen des Längsschlupfs, der Längsbeschleunigung und der Umgebungstemperatur berücksichtigt und von einem Fuzzy-Interferenzsystem verarbeitet.

(Weber et al., 2002) befassen sich simulativ mit dem Potenzial einer Reibwertinformation, die vor dem Beginn von ABS-Regeleingriffen vorliegt und passen bestehende ABS-Regelstrategien dementsprechend an. Unterschieden wird dabei zwischen einem sogenannten µ-Schätzer und einem µ-Erkenner. Der µ-Schätzer basiert auf der genauen Kenntnis der reifenbezogenen „Reibwertellipse“, dessen Größe in Abhängigkeit von Straßen- und Witterungsbedingungen variiert. Das Schätzkonzept basiert darauf, dass der resultierende Kraftvektor aus Längs- und

Querkraft bei schwachen Bremseingriffen innerhalb der Ellipse liegt und die ABS-Regelung nicht aktiv wird. Bei starken Bremsungen hingegen erreicht der resultierende Kraftvektor den Ellipsenrand, wobei die Reibwertausnutzung gleich dem Reibwertpotenzial ist. In diesem Fall wird die ABS-Regelung inklusive des Schätzers aktiviert. Dabei wird die aktuelle Reibwertausnutzung über das Momentengleichgewicht am Rad, dem effektiven Reifenhalbmesser und der Radlast errechnet. Die Ergebnisse des µ-Schätzers werden mit denen eines µ-Erkenners gegenübergestellt. Die Funktionsweise des µ-Erkenners wird nicht genauer erläutert, allerdings wird davon ausgegangen, dass dieser den Reibwert mittels Sensorik (akustisch, optisch, elektrisch, …) erfasst und demzufolge der radindividuelle Vordruck im Bremskreislauf vorkonditioniert wird. Bezogen auf den erzielten Bremsweg werden mit dem Ansatz des µ-Erkenners insgesamt bessere Ergebnisse erzielt als mit dem µ-Schätzer. Es wird das hohe Potenzial einer Reibwertvorhersage für die Funktionsweise eines ABS verdeutlicht und entsprechende Anforderungen an die Vorhersage dargelegt.

(Umeno & TOYOTA, 2002) bestimmen das Reibwertpotenzial anhand der Charakteristik der Vibration der Radgeschwindigkeit, wozu ausschließlich herkömmliche Raddrehzahlsensoren benötigt werden. Die Reibwertschätzung kann mit dieser Methode erfolgen, wenn sich das Fahrzeug in einem konstanten Fahrzustand befindet und keine nennenswerten dynamischen Vorgänge oder Manöver erfolgen.

(Gao et al., 2019) entwickeln basierend auf einem modifizierten Bürstenmodell des Reifens einen nichtlinearen Beobachter, welcher mit Hilfe von Informationen über die seitlichen Fahrzeugverschiebung beim Lenken das Reibwertpotenzial schätzt.

(Abdic et al., 2016) trainieren ein rekurrentes neuronales Netz (RNN) mit Audio Daten von Reifenfahrbahngeräuschen, sodass eine Erkennung von Nässe unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit mit einer Gesamtgenauigkeit von 93,2 % ermöglicht wird.

(M. Kalliris et al., 2019) zeigen ebenfalls eine Akustik-basierte Methode zur Erkennung nasser Fahrbahnen im Stadt- und Autobahnverkehr, wobei die Audio Daten eines im Radkasten befestigten Mikrophons mittels Frequenzanalysen verarbeitet werden. Die anschließende Klassifizierung erfolgt mittels einer Kombination aus Support Vector Maschinen und der logistischen Regression und erzielt hohe Genauigkeiten.

2.2.2 Ursachenbasierte Ansätze

(Teke & Duran, 2019) entwickeln ein Straßenzustands-Warnsystem für Fahrzeuge. Der Fokus liegt dabei auf der Erkennung von vereisten Fahrbahnen. Als Eingangsgrößen des Systems wird die Temperatur in 10 cm Höhe über der Fahrbahn, die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, der Luftdruck und die Wärmeleitfähigkeit genutzt. Die Daten werden stationär ermittelt und mit einem k-nearest-neighbor Algorithmus verarbeitet und an das Fahrzeug gesendet. Es erfolgt eine Unterscheidung der Klassen vereist, trocken, nass und salzig-nass, wobei eine Gesamtgenauigkeit von 99,71 % erzielt wird.

Das Unternehmen Continental entwickelt und erprobt einen Road Condition Observer, welcher typische Merkmale verschiedener Straßenzustände (trocken, nass, verschneit, vereist) erkennt. Das System nutzt die im Fahrzeug verfügbare Sensorik um Hinweise auf den Straßenzustand zu erfassen. Dabei werden Kamerabilder, Fahrdynamikdaten des ESP, lokale und regionale Wetterdaten (Temperatur, Wischeraktivität und Daten aus der Cloud) sowie das Reifenverhalten berücksichtigt. Im Folgeschritt wird eine Reibwertklasse abgeleitet. Ein Entwicklungsziel besteht darin, dass das System mit bestehender Fahrzeugsensorik auskommt. Insgesamt soll ein Fahrdynamikmodell in das ESP-Steuergerät integriert werden, welches die ESP-Aktivität bei Niedrigreibwerten optimieren kann. Außerdem sollen die Erkenntnisse des Systems in ein erweitertes 360°-Umfeldmodell einfließen, welches die Datenbasis für die sichere automatisierte Fahrzeugführung bei allen Witterungsbedingungen darstellt. (eMove360, 2017)

Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojekts mit der Firma Continental bestimmen (Amthor et al., 2015) den Straßenzustand mittels eines Mono-Kamera Systems und unterscheiden dabei zwischen trocken, nass und schneebedeckten Zuständen. Dabei werden anstelle von einzelnen Bildern Sequenzen zusammenhängender Bilder berücksichtigt, was ermöglicht, dass verschiedene Reflektionen erkannt werden können. Mit Hilfe eines physikalischen Modelles werden die Bilder in eine Draufsicht transformiert und anschließend weiterverarbeitet. Besondere Merkmale zur Klassifizierung des Straßenzustands werden dabei mit den Methoden der sogenannten Spiegelreflexionskarten und durch die Analyse von Texturmerkmalen herausgearbeitet. Ersteres ermöglicht es die Reflexionen der Straßenoberfläche in Folge von Nässe oder Schnee zu quantifizieren, letzteres ermöglicht es charakteristische Merkmale wie Reifenspuren auf nassen oder schneebedeckten Oberflächen zu extrahieren. Insgesamt wird dabei eine gegenüber äußeren Störungen robuste Methode mit niedrigen Rechenzeiten ermöglicht, was gleichzeitig eine hohe Klassifikationsgenauigkeit erzielt.

(Šabanovič et al., 2020) entwickeln ein Kamera-basiertes Convolutional Neural Network (CNN) welches eine Klassifikation für trockene und nasse Zustände auf den Fahrbahnoberflächen Asphalt, Kopfsteinpflaster und Schotter mit einer hohen Genauigkeit erkennen kann.

(Roychowdhury et al., 2018) bestimmen den Fahrbahnreibwert in einem zweistufigen Verfahren mittels Kamera Bildern. In der ersten Stufe erfolgt eine Straßenzustandsklassifikation, wobei Merkmale aus der Oberfläche, dem Himmel und der Umgebung berücksichtigt werden, um zwischen den Klassen trocken, nass, matschig und schneebedeckt zu unterscheiden. Die zweite Stufe umfasst ein regelbasiertes Modell, welches den befahrbaren Bereich vor dem Fahrzeug in ein 5x3-Raster unterteilt und anschließend zwischen einem hohen, mittleren und niedrigem Reibwert unterscheidet. Die erzielten Genauigkeiten liegen für die Straßenzustandsklassifikation bei 97 % und für die Reibwertbestimmung bei 89 %.

2.2.3 Reibwertpotenzialschätzung für Lkw

Im Nutzfahrzeugbereich erfolgt im Vergleich zum Pkw-Bereich deutlich weniger Forschungsarbeit zur Reibwertschätzung. In diesem Abschnitt werden vielversprechende aus der Literatur bekannte Lkw-Verfahren vorgestellt.

Im Jahr 2004 stellen Gnadler und Marwitz im Rahmen einer Kooperation der Universität Karlsruhe und der damaligen Daimler-Chrysler AG ein System zur Reibwertschätzung für Lkw vor, welches sich aus fünf verschiedenen Sensoren zusammensetzt. Ein Akustiksensor im Kotflügelbereich kann Spritzwasser, Schotter, Kopfsteinpflaster oder Asphalt ermitteln. Ein Beschleunigungssensor misst vertikale Achsbeschleunigungen. Ein sogenannter Wasser-Schnee-Eis-Sensor (WSE-Sensor) misst Oberflächenspannungen im Bereich des Spritzlappens und hilft dabei aus Reifenspray Wasser-, Schnee- oder Eispartikel zu identifizieren. Ein Sensor zur Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur unterstützt die Oberflächenzustandserkennung, indem bspw. bei Temperaturen deutlich oberhalb des Gefrierpunkts die Zustände „vereist“ oder „verschneit“ ausgeschlossen werden können. Ein Regensensor im Bereich der Windschutzscheibe dient der Erkennung von nassen Fahrbahnen. Die Informationen aller Sensorsignale werden jeweils nach den Gesichtspunkten ja, nein oder mehrdeutig ausgewertet. Aus den sich daraus ergebenden möglichen Kombinationen wird ein „Entscheidungsvektor“ gebildet, welcher die anschließende Klassifizierung zu einer von sechs Reibwertklasse vornimmt. Das Verfahren wird erfolgreich in einem Mercedes-Benz Artego umgesetzt und kann beispielsweise genutzt werden, um Assistenzsysteme oder Stabilisierungsysteme wie ABS oder ESP besser anzusteuern. (Gnadler & Marwitz, 2004)

Henderson und Cebon vom Cambridge University Engineering Department zeigen 2015 ein System, welches die Notbremsleistung eines Dreiachs-Aufliegers mit einem neuartigen pneumatischen Bremsschlupfregelsystem erhöht. Vergleichsmessungen gegenüber einem herkömmlichen Trailer zeigen bei Bremsversuchen aus 40 km/h eine Bremswegreduzierung von 15 % und einen um 22 % geringeren Druckluftverbrauch. Besonders gute Ergebnisse werden bei sehr niedrigen Reibwerten auf nassem Basalt erzielt. Als weitere Bewertungsmetrik wird der mittlere absolute Fehler bei der Erfassung des zu regelnden Bremsschlupfs eingeführt. Gegenüber einem herkömmlichen Trailer-ABS-System kann die korrekte Bremsschlupferfassung um 62 % erhöht werden, wodurch eine genauere Regelung bei extremen Fahrmanövern ermöglicht wird und sich ein hohes Potenzial für die Weiterentwicklung von Stabilisierungssystemen ergibt. (Henderson & Cebon, 2016)

Kalakos und Westerhof veröffentlichen 2017 in Kooperation mit Volvo Trucks ein System, welches eine Erhöhung der Bremsleistung von Lkw durch eine verbesserte Bremsschlupfregelung und neuartige schnell agierende Bremsventile erzielt. Die verbesserte Bremsschlupfregelung wird durch die Integration eines auf Schlupf-Steigungskurven basierenden Reibwertschätzalgorithmus erreicht. Insgesamt kann bei der prototypischen Implementierung des Verfahrens gegenüber einem Serienfahrzeug auf den meisten Straßenoberflächen eine Verkürzung des

Bremsweges um bis zu 20 % bei ebenfalls geringerem Druckluftverbrauch festgestellt werden. (Kalakos & Westerhof, 2017)

3 Analyse der Übertragbarkeit von Pkw auf Lkw

In diesem Kapitel wird die Thematik der Lkw-Reifen und dessen Besonderheiten gegenüber Pkw-Reifen adressiert. Zudem wird ein Fokus auf das Lkw-Bremssystem und die resultierenden Besonderheiten eines Lkw-ABS-Systems gelegt. Es werden Fahrdynamik beeinflussende Faktoren des Lkw analysiert. Mit entsprechenden Fahrdynamiksimulationen wird dargelegt, inwieweit sich das vorhandene Reibwertpotenzial bei einem Sattelzug tatsächlich ausnutzen lässt. Insgesamt wird dabei untersucht, inwiefern sich bestehende Erkenntnisse hinsichtlich der Reibwertpotenzialschätzung auf ein schweres Güterkraftfahrzeug übertragen lassen.

3.1 Lkw-Reifen

Wie Pkw-Reifen haben auch Lkw-Reifen die übergeordnete Aufgabe, als Bindeglied zwischen Fahrzeug und Fahrbahn die gesamte Radlast zu tragen und sowohl beim Anfahren und Bremsen als auch in Kurvenfahrten eine sichere Fahrzeugführung zu gewährleisten. Dennoch unterscheiden sich Lkw-Reifen in verschiedenen Punkten von Pkw-Reifen. Offensichtlich ist, dass ein Nutzfahrzeugreifen deutlich höhere Lasten bei einer deutlich höheren Laufleistung tragen können muss. Die durchschnittliche Tragfähigkeit eines Nutzfahrzeugreifens beträgt demnach bis zu 6 t, wohingegen ein durchschnittlicher Pkw-Reifen über eine maximale Tragfähigkeit von 400 bis 800 kg verfügt (Bussgeldkataloge.de, 2022). Demzufolge sind Lkw-Reifen gegenüber Pkw-Reifen deutlich größer und breiter. Sie haben einen größeren Reifenquerschnitt und somit eine breitere Reifenaufstandsfläche. Dennoch ergibt sich für einen Sattelzug mit zwölf Rädern eine Gesamtaufstandsfläche von nur ca. einem Quadratmeter. Um die hohen Lasten bei der verhältnismäßig geringen Aufstandsfläche tragen zu können werden Nutzfahrzeugreifen mit Reifenfülldrücken von bis zu 9 bar betrieben, wohingegen Pkw-Reifenfülldrücke im Bereich von 2-3 bar liegen. Der Reifenfülldruck wird stets auf das beladene Fahrzeug abgestimmt. Dabei ist zu beachten, dass sich die Reifenaufstandsfläche bei einem leeren Fahrzeug dementsprechend verringert, weshalb das Reifenprofil auf diese Lastschwankungen abgestimmt sein muss, um eine lastunabhängige Bodenhaftung zu gewährleisten. Ein weiterer Aspekt ist die Achsabhängigkeit von Lkw-Reifen. Demnach wird nach Lkw-Reifen für Lenk-, Antriebs- und Anhängerachsen unterschieden. Darüber hinaus wird stark nach dem jeweiligen Einsatzgebiet differenziert. Im Güterverkehr wird zwischen Reifen für Zugmaschine und Anhänger im Fern-, Regional- und Straßen-/Gelände-Verkehr unterschieden. Im Personenverkehr mit Bussen wird zwischen speziellen Reifen für den Reise-, Überland- oder Stadtverkehr differenziert. Für jedes Fahrzeug gibt es zusätzlich entsprechende Winterreifen. Im Bereich von Baumaschinen existieren weitere Spezialreifen, die für den Transport schwerer Lasten auf unterschiedlichen Untergründen ausgelegt sind. Darüber hinaus liegen die Laufleistungen, die ein Nutzfahrzeugreifen erbringen soll, bei über 100.000 km und somit deutlich über den Anforderungen eines Pkw-Reifens. Um derartige Laufleistungen erzielen zu können ist zum einen eine an die entsprechenden Einsatzbedingungen angepasste Reifenauswahl sowie eine korrekte Anpassung des Reifenfülldrucks, der Bremseinstellung, der Achs- und Radeinstellung sowie eine entsprechende Fahrweise erforderlich. Zudem lässt sich ein hochwertiger Nutzfahrzeugreifen nachschneiden

und runderneuern, wodurch sich die Lebensdauer erheblich erhöhen lässt. (Continental, 2020; Orgeldinger, 2007)

Insgesamt lassen sich die Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften eines Lkw-Reifens wie folgt zusammenfassen: (Hoepke & Breuer, 2016)

- Fahrsicherheit: Kraftschluss bzw. Traktionsvermögen, Sitz auf der Felge, Wintertauglichkeit
- Haltbarkeit: Strukturelle Dauerhaltbarkeit, Platzdruck, Durchschlagfestigkeit, Geschwindigkeitstüchtigkeit
- Wirtschaftlichkeit: Rollwiderstand, Lebenserwartung (km-Leistung), Abnutzungsbild, Tragfähigkeit und Eigengewicht, Seitenwandabrieb, Runderneuerbarkeit, Nachschneidbarkeit
- Fahr- und Lenkstabilität: Geradeausstabilität, Kurvenstabilität, Lenkpräzision
- Fahrkomfort: Federungskomfort, Geräuschkomfort, Laufruhe

Wie beim Pkw ist die verbreitetste Bauart von Nutzfahrzeugreifen der schlauchlose Radialreifen. Die Karkasse besteht aus radial verlaufenden Lagen von gummiertem Stahlcord, welche um die Wulst herumgelegt sind, vgl. **Abbildung 3**. Die axiale Steifigkeit wird über einen Gürtel aus zwei bis fünf Lagen Stahlcord realisiert, welcher die Karkasse von außen umschließt. (Continental, 2020; Hoepke & Breuer, 2016; Orgeldinger, 2007)

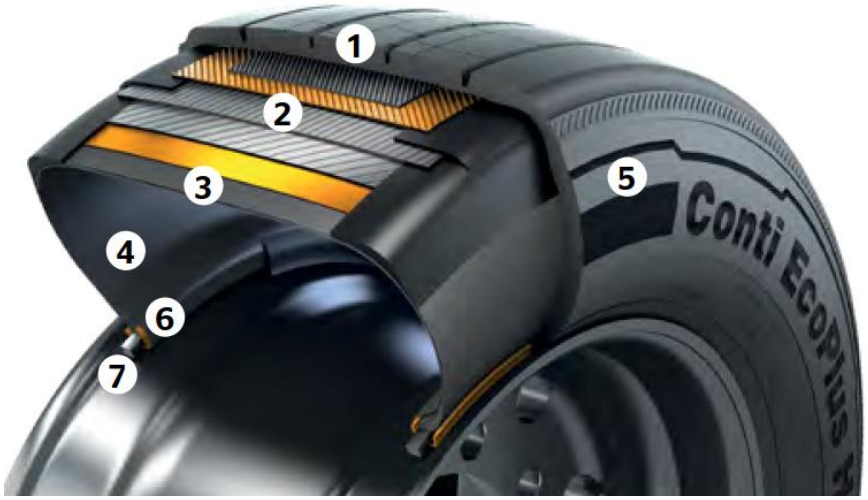

Abbildung 3: Aufbau des Radialreifens (Continental, 2020), 1) Lauffläche, 2) Mehrlagenstahlgürtel, 3) Stahlkarkasse, 4) Innenseele, 5) Seitenwand, 6) Wulstverstärker, 7) Wulstkern

Die Materialien eines Nutzfahrzeugreifens setzen sich aus sieben Materialanteilen zusammen. Bezogen auf das Gesamtreifenmaterial umfasst die Kautschukmischung ca. 30 % Naturkautschuk, ca. 5 % Synthesekautschuk, ca. 4 % Halogenbutylkautschuk und 37 % Chemikalien. Die Materialien, die zu den

Festigkeitsträgern gehören sind ca. 15 % Stahlcord, ca. 6 % Kerndraht und ca. 1 % Nylongewebe. (Continental, 2020)

In Abhängigkeit des Einsatzzwecks werden unterschiedliche Profilierungen und Gummimischungen verwendet, da diese die Traktionsfähigkeit des Reifens entscheidend beeinflussen (Hoepke & Breuer, 2016). Mischungen, die aufgrund ihrer Eigenschaften sowohl Temperaturen oberhalb als auch unterhalb des Gefrierpunkts gleichzeitig optimal gerecht werden, existieren nicht (Continental, 2020). Bei trockenen Bedingungen wird der Kraftschluss durch eine entsprechende Gummimischung ermöglicht, die Profilform ist dabei zunächst zweitrangig (Continental, 2020). Auf nassen Fahrbahnen verhält es sich exakt umgekehrt, dort ist ein entsprechend geformtes Profil entscheidend (Continental, 2020). Bei Fahrten auf Schnee ist ebenfalls die Profilform ausschlaggebend, wohingegen bei Eis die Zutaten der Gummimischung den entscheidenden Einfluss bringen (Continental, 2020). Auf gut befestigten Straßen eigenen sich für die Reifen nicht angetriebener Räder Längsprofile mit Lamellen zum Durchtrennen von Schmierschichten, was auch als Feinschnitt bezeichnet wird, vgl. **Abbildung 4a** (Hoepke & Breuer, 2016). Für den ganzjährigen Straßeneinsatz von angetriebenen Rädern eignen sich aufgrund von häufig vorkommenden Beschleunigungs- und Bremsvorgängen Reifenprofile mit schräg laufenden, an den Schultern quer orientierten größeren Einzelelementen, wie sie beispielsweise in Abbildung 4b dargestellt sind (Hoepke & Breuer, 2016; Hoever et al., 2014). Das Profil eines neuen Lkw-Reifens ist ca. 14 mm tief und bis zu 4 mm nachschneidbar (Hoepke & Breuer, 2016). Eine Runderneuerung ermöglicht es dem Reifen eine neue Lauffläche aufzubringen, wodurch dieser wieder eine Originalqualität einschließlich Nachschneidefähigkeit erhält (Continental, 2020; Hoepke & Breuer, 2016). Die nach StVZO geforderte Mindestprofiltiefe beträgt 1,6 mm (Continental, 2020; Hoepke & Breuer, 2016).

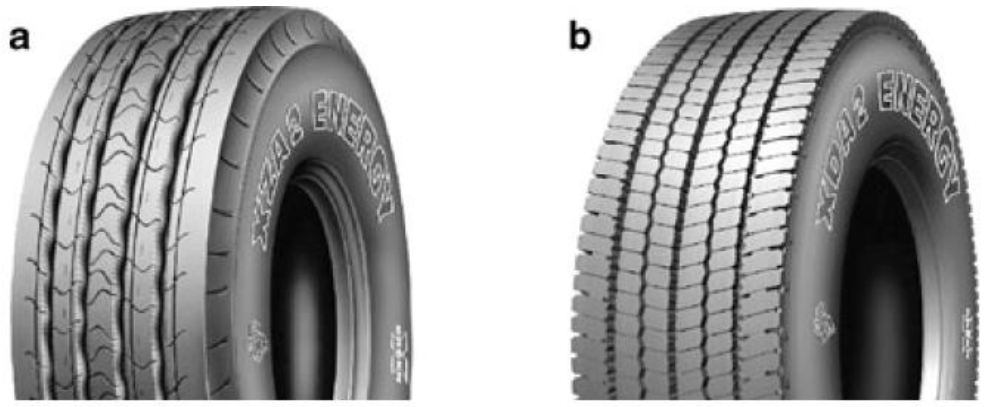

Abbildung 4: Profile von Nutzfahrzeugreifen (Hoepke & Breuer, 2016), a) für nicht angetriebene Räder, b) für angetriebene Räder

3.2 Elektronisches Bremssystem und Anti-Blockier-System im Lkw

Im Gegensatz zum Pkw wird das Bremssystem von mittleren und schweren Nutzfahrzeugen (>6 t zGG.) pneumatisch betrieben. Schwere Nutzfahrzeuge verfügen über ein elektronisches Bremssystem (EBS), wobei dem pneumatischen Bremssystem eine elektronische Regelung überlagert wird (Hoepke & Breuer, 2016; Winner et al., 2015). Der vom Fahrer über das Bremspedal vorgegebene

Verzögerungswunsch wird vom EBS elektronisch an alle Komponenten der Bremsanlage weitergegeben (WABCO, 2016). Die elektronische Ansteuerung ermöglicht dabei kürzere Ansprech- und Schwellzeiten an den Bremszylindern, ein feinfühliges Dosieren der Bremsanlage und dass das System jederzeit mit den einzelnen Bauteilen kommunizieren kann (WABCO, 2016). Gegenüber einem rein pneumatisch arbeitenden Bremssystem ermöglicht das EBS zahlreiche vorteilhafte Funktionen, die die Sicherheit, den Komfort und die Wirtschaftlichkeit verbessern (Hoepke & Breuer, 2016). Derartige EBS-Funktionen gewährleisten ein komfortableres Bremsgefühl, vom Beladungszustand unabhängige Bremsleistungen und einen deutlich reduzierten Bremsweg, wobei gleichzeitig die Fahrstabilität und Lenkfähigkeit des Fahrzeugs während einer Bremsung erhalten bleibt (WABCO, 2016).

Im EBS integrierte Bremsenmanagementfunktionen erkennen Abweichungen vom normalen Fahrzustand und sind in der Lage bei Gefährdungen gezielt in das Fahrgeschehen einzugreifen. Das Bremsenmanagement umfasst Funktionen wie die Verzögerungsregelung, Bremskraftverteilung, Bremsbelagsverschleißregelung, Dauerbremsintegration, Bremsassistenten, Rollsperren, Berganfahrhilfe, Haltestellenbremse und Anhängersteuerung. Die Verzögerungsregelung dient der Anpassung des Bremdruckniveaus an den Verzögerungswunsch des Fahrers und sorgt bei gleicher Pedalbetätigung dafür, dass das Fahrzeug unabhängig vom Beladungszustand immer gleichstark abbremst. Wenn der Reibwert allerdings zu gering ist werden die Grenzen des Systems erreicht und es beendet die Verzögerungsregelung. Die Funktion der Bremskraftverteilung überwacht den Schlupf und damit auch die Bremsleistung an jeder Achse und regelt mittels der Differenzschlupfregelung den Druck an jeder Achse, sodass eine optimale Bremskraftverteilung ermöglicht wird. Die Belagsverschleißregelung sensiert den Belagsverschleiß mit entsprechenden Belagsverschleißsensoren. Bei einem erfassten Belagsunterschied greift die Regelung bei unkritischen Bremsungen regulierend in die Bremskraftverteilung ein, wobei der Druck einer höher verschlissenen Bremse geringfügig zurückgenommen wird und der Druck einer weniger verschlissenen Bremse entsprechend erhöht wird. Die Dauerbremsintegration stellt sicher, dass die verfügbaren Dauerbremsen in allen Bremsanwendungen optimal eingesetzt werden und der Verschleiß an den Bremsbelägen und Bremsscheiben somit reduziert wird. Der Bremsassistent unterstützt den Fahrer bei Vollbremsungen, indem eine starke Bremsung erkannt wird und unabhängig von der Betätigung des Bremspedals den vollen Bremsdruck in die Bremszylinder leitet. Rollsperren und Berganfahrhilfen ermöglichen ein komfortables Anfahren an Steigungen indem ein ungewolltes Wegrollen des Fahrzeugs verhindert wird. Die Funktion der Haltestellenbremse wird besonders bei Bussen oder Sonderfahrzeugen eingesetzt und ermöglichen ein Anhalten des Fahrzeugs durch eine Schaltereingabe des Fahrers. Die Druckniveaus dieser Bremsungen sind mit entsprechenden Parametern einstellbar. Außerdem kann die Funktion mit externen Funktionen wie beispielsweise der Türsteuerung verknüpft werden. Die Anhängersteuerung erfolgt sowohl pneumatisch über das elektropneumatische Anhängersteuerventil als auch elektronisch über die Anhängerschnittstelle nach ISO 11992. Die Anhängersteuerung und die Bremskraftregelung sind so aufeinander abgestimmt, dass Koppelkräfte reduziert werden obwohl diese nicht direkt sensiert werden. Wird aufgrund von geringen

Inkompatibilitäten zwischen Zugfahrzeug und Anhänger eine nicht ausreichende Verzögerung des gesamten Zuges festgestellt, kann der Steuerdruck des Anhängers mit einem konstanten Druck-Offset erhöht oder verringert werden. Die Reaktion der Anhängerbremse wird verbessert, indem zu Beginn des Bremsvorgangs ein kurzer Druckeinschuss in die Steuerleitung des Anhängers erfolgt, wodurch die Bremssteuergeräte des Anhängers für eine schnelle Reaktion auf die Bremsanforderung vorbereitet werden. Eine herkömmliche Anhängersteuerung erfolgt entweder über einen automatisch-lastabhängigen Bremskraftregler (ALB) oder ein eigenes Anhänger EBS. Für Märkte in denen die Anhänger größtenteils ohne Bremskraftregler ausgestattet sind regelt das Zugfahrzeug den Anhängersteuerdruck basierend auf dem erkannten Bruttogesamtgewicht des Zuges. Insgesamt erfolgt die Kompatibilitätsregelung stets so, dass eine negative Beeinflussung der Stabilität des gesamten Zuges ausgeschlossen werden kann. Entsprechende gesetzlich festgelegte Grenzen sind innerhalb der ECE-R13 definiert. Zusätzlich umfasst das EBS-System Stabilitätsregelfunktionen wie die Schleppmomentregelung (SMR), das Anti-Blockier-System (ABS), die automatische Traktionskontrolle (ATC) und die elektronische Stabilitätsregelung (ESP). Die Schleppmomentregelung verhindert Bremsmomente, welche durch Schaltvorgänge oder Gaswechsel entstehen und so zu Fahrzeuginstabilitäten führen können. Bei der Überschreitung eines definierten Schlupfzustands wird abhängig von den Radgeschwindigkeiten der Antriebsräder das Motormoment erhöht, wodurch die auftretenden Schleppmomente reduziert werden. Das integrierte ABS sensiert die Raddrehzahlen der einzelnen Räder und erkennt somit frühzeitig eine Blockierneigung und kann den radindividuellen Bremsdruck entsprechend regeln, sodass ein Blockieren der Räder verhindert wird und somit die Fahrstabilität während der Bremsung verbessert wird. Das ATC erkennt die Tendenz zum Durchdrehen eines Rads beim Beschleunigen und passt das Antriebsmoment über die Motorsteuerung dementsprechend an. Wenn nur ein Rad zum Durchdrehen neigt kann auch die ATC-Differenzialbremsung darauf angewendet werden. Diese Funktion wird bei höheren Geschwindigkeiten allerdings beendet, um ein Überhitzen der Bremsen zu vermeiden. Das ESP ist für die Fahrstabilität beim Fahren und Bremsen in Längsrichtung verantwortlich und hat die Aufgabe das Fahrzeug zu stabilisieren. Besonders bei Nutzfahrzeugen kann es aufgrund des hohen Schwerpunkts und Gewichts bei Kurvenfahrten oder Spurwechseln zu einem Kippen, Rollen, Schleudern oder Einknicken kommen. Das ESP erkennt derartige Situationen mit entsprechenden Sensoren und greift korrigierend in die Motor- und Bremsleistung ein. (B. Breuer & Bill, 2012a; WABCO, 2016)

Die wesentlichen Systemkomponenten eines EBS-Systems sind in **Abbildung 5** dargestellt und umfassen einen Bremspedalsensor bzw. Bremswertgeber, ein EBS-Steuergerät (EBS-ECU), Druckregelmodule bzw. Achsmodulatoren, ein Anhängersteuerventil und ein ABS-Magnetventil. Das elektronische Steuersignal der Bremspedalsensoren wird vom EBS-Steuergerät verarbeitet und praktisch ohne Zeitverzögerung an die Druckregelmodule übertragen. Der erforderliche Bremsdruck in den Radbremszylindern wird in den Druckregelmodulen pneumatisch eingestellt. Gleichzeitig melden diese die Sensorsignale aus den Radbereichen an die EBS-ECU. Die pneumatischen Arbeitskreise zur Betätigung der Bremszylinder von Zugfahrzeug und Anhänger sind wie die Zweikreis-Zweileitungsbremsanlage aufgebaut. Kommt es

zu einer Störung agiert das EBS als reine Druckluftbremsanlage mit zwei Druckluftkreisen. (MAN, 2022)

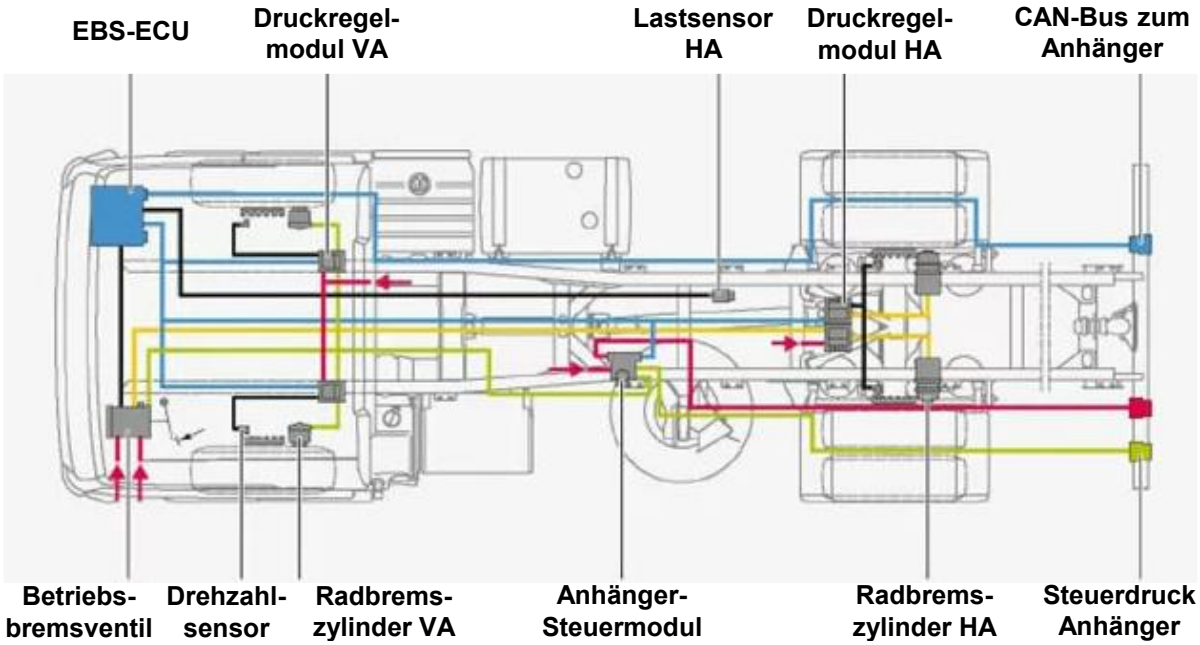

Abbildung 5: EBS-Systemskomponenten (MAN, 2022)

Das ABS regelt den mittleren Schlupf der einzelnen Räder beim Bremsen. Das Ziel dabei ist es, einen möglichst guten Kompromiss zwischen Lenkbarkeit, Stabilität und Verzögerung zu ermöglichen. Sinnvolle Kompromisse werden bei einem Radschlupf im Bereich von 8 bis 20 % erzielt, vgl. Abbildung 1. Im Nutzfahrzeug-ABS werden neben klassischen PID-Reglern auch Matrixregler eingesetzt, welche sich automatisch an unterschiedliche Reibwertkurven anpassen. Zusätzlich zu den Eingriffen in die Betriebsbremse werden beim Anlaufen des ABS die vorhandenen Retarder an der Antriebsachse abgeschaltet. Die Fahrzeugreferenzgeschwindigkeit, welche zur Schlupfregelung erforderlich ist, wird aus den einzelnen Radgeschwindigkeiten ermittelt. Bestimmte Auswahlalgorithmen stellen dabei sicher, dass die Fahrzeugreferenzgeschwindigkeit unter allen Umständen gut mit der wahren Fahrzeuggeschwindigkeit übereinstimmt. (Winner et al., 2015)

Die grundsätzliche Funktionsweise eines ABS-Regelkreises für Pkw-Systeme gilt ebenfalls beim Nutzfahrzeug-ABS (Robert Bosch GmbH, 2002). Aufgrund der langsameren pneumatischen Bremsbetätigung liegt die maximal erreichbare Regelfrequenz von Lkw-ABS-Systeme allerdings im Bereich von 3-5 Hz (B. Breuer & Bill, 2012b; WABCO, 2011), wohingegen Pkw-Systeme im Bereich von 8-12 Hz arbeiten (Treffs, 2021). Im Anhängerbetrieb hat das Lkw-ABS zusätzlich die Aufgabe ein Einknicken des Lkw zu verhindern (Robert Bosch GmbH, 2002; WABCO, 2016).

Ein ABS für Nutzfahrzeuge besteht im Wesentlichen aus Raddrehzahlsensoren, einem ABS-Steuergerät und Druckregelventilen (Robert Bosch GmbH, 2002; WABCO, 2006). Wie das Pkw-ABS regelt das Nfz-ABS den Bremsdruck in jedem Bremszylinder durch Reduzieren, Halten oder stufenweises Erhöhen des Bremsdrucks (WABCO, 2006). Im Pkw-Bereich ist die ABS-Logik von Bosch weit verbreitet (Reif, 2015). Die

Regelung berücksichtigt dabei einen Schwellwert für den Radschlupf (λ) und drei Schwellwerte für die Radbeschleunigung (*-a, +a, +A*) (Reif, 2015). Im Bereich der Lkw-ABS sind die Systeme von WABCO und Knorr-Bremse sehr weit verbreitet (Challa et al., 2020). Im Gegensatz zum Pkw-ABS berücksichtigt der ABS-Algorithmus von WABCO zwei Radschlupf Schwellwerte (λ_1 *und* λ_2) und zwei Schwellwerte für die Radbeschleunigung *(-b und +b*) (WABCO, 2006). (Challa et al., 2020) verdeutlichen die Relevanz der einzelnen Schwellwerte in ihrem Paper.

Die ABS-Regelstrategien im Nutzfahrzeug lassen sich unterscheiden in eine individuelle Regelung (IR), ein Select-Low- Regelung (SL) und eine modifizierte individuelle Regelung (MIR) (Robert Bosch GmbH, 2002).

Bei der individuellen Regelung wird für jedes Rad einzeln der individuelle Bremsdruck eingestellt und geregelt, wodurch die kürzesten Bremswege ermöglicht werden. Unter µ-Split-Bedingungen führt eine Bremsung allerdings zu einem hohen Giermoment um die Fahrzeughochachse, was die Beherrschbarkeit von Fahrzeugen mit kurzen Radständen deutlich erschwert. Zudem wird aufgrund der positiven Lenkrollradien von Nutzfahrzeugen ein hohes Lenkmoment erzeugt. (Robert Bosch GmbH, 2002; WABCO, 2016)

Die Select-Low-Regelung reduziert die Gier- und Lenkmomente auf null, indem beide Räder einer Achse mit dem gleichen Bremsdruck beaufschlagt werden. Dazu ist ausschließlich ein Druckregelventil pro Achse erforderlich, wobei der Bremsdruck passend zum Rad mit der geringeren Griffigkeit gewählt wird (Select-Low). Im Vergleich zur individuellen Regelung wird das Rad mit dem höheren Grip dabei weniger stark abgebremst. Unter µ-Split-Bedingungen werden dabei längere Bremswege erzielt. Dafür werden allerdings eine bessere Lenkkontrolle und Richtungsstabilität des Fahrzeugs ermöglicht. Wenn beidseitig identische Reibwerte vorliegen sind Bremsweg, Lenkkontrolle und Richtungsstabilität nahezu identisch zur individuellen Regelung. Bei ähnliche Regelstrategien mit einem höheren Druckniveau als bei der reinen Select-Low-Regelung wird das Rad mit dem niedrigeren Reibwert gezwungen, mit einem höheren Radschlupf zu laufen, bis es blockiert. Unter µ-Split-Bedingungen ermöglicht dies kürzere Bremswege als mit einem reinen Select-Low-System. Die Lenkkontrolle und Richtungsstabilität des Fahrzeugs können dabei aber geringfügig schlechter sein. Am blockierenden Rad entstehen aufgrund des geringeren Reibwerts normalerweise keine Schäden. (Robert Bosch GmbH, 2002)

Die modifizierte individuelle Regelung erfordert ein Druckmodulationsventil für jedes Rad einer Achse. Die Strategie reduziert Gier- und Lenkmomente nur so weit wie nötig und begrenzt die Bremsdruckdifferenz zwischen linker und rechter Seite auf ein zulässiges Maß, wodurch das Rad mit dem höheren Reibwert weniger stark abgebremst wird. Gegenüber der individuellen Regelung führt dieser Kompromiss zu einer minimal längeren Bremszeit, gewährleistet dabei aber eine sichere Beherrschbarkeit von Fahrzeugen mit kritischem Fahrverhalten. (Robert Bosch GmbH, 2002; WABCO, 2016)

Es wird grundsätzlich zwischen Einachs-, 2-Achs- und 3-Achs-ABS unterschieden. Einachssysteme kommen häufig bei Sattelaufliegern zum Einsatz und steuern die Räder einer Achse einzeln an. Die übrigen Achsen werden mit den gleichen

Bremsdrücken versorgt wie die geregelte Achse. Bei 2-Achs oder 3-Achs-ABS-Systemen wird die gelenkte Achse mit der modifizierten individuellen Regelung (MIR) ausgestattet. Verfügt die Achse allerdings nur über ein Druckregelventil wird die Select-Low-Regelung (SL) angewendet. Die individuelle Regelung (IR) findet bei Nutzfahrzeugen immer an der Hinterachse Anwendung. (B. Breuer & Bill, 2012a; Robert Bosch GmbH, 2002; WABCO, 2006, 2011)

Die Grundlogik des Nfz-ABS ist allerdings nicht starr, sondern passt sich der entsprechenden dynamischen Reaktion des Rades auf bei unterschiedlichen Reibwerten an. Die adaptive Regelung wird umgesetzt, indem die Schwellwerte des Reglers in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wie beispielsweise der Fahrgeschwindigkeit oder der Fahrzeugverzögerung angepasst werden. (WABCO, 2006)

In allen EU-Ländern sind ABS seit dem 1. Oktober 1991 für die Erstzulassung von Nutzfahrzeugen, die für den Anhängerbetrieb vorgesehen sind, sowie von Sattelzugmaschinen (> 16 t), Anhängern (> 10 t) und Bussen (> 12 t) gesetzlich vorgeschrieben. Erweitert wurde diese Vorschrift dahingehend, dass seit dem 1. Oktober 1998 alle Busse und seit dem 1. Oktober 1999 alle Lkw und Anhänger (> 3,5 t) mit einem ABS ausgestattet sein müssen. (Robert Bosch GmbH, 2002)

Raddrehzahlbasierte Stabilisierungsfunktionen wie das Antiblockiersystem (ABS), die Antriebsschlupfregelung (ASR) und die Motorschleppmomentregelung (MSR) müssen beim Nfz im Vergleich zum Pkw verschiedene fahrzeugspezifische Besonderheiten berücksichtigen, welche insbesondere das Fahrwerk, die Lenkung, die hohe Variantenvielfalt, die Rad- bzw. Achslasten, das Zuladungsverhältnis, den Anhängerbetrieb und die Dauerbremsen betreffen. Ein typisches Lkw-Fahrwerk basiert auf einem Leiterrahmen mit Starrachse. An der Vorderachse werden aus Kostengründen häufig Blattfedern eingesetzt, welche sowohl die Federung als auch die Achsführung in Längs- und Querrichtung übernehmen. Durch die Einleitung eines Bremsmoments kommt es dabei allerdings zu einem „Aufziehen“ der Blattfedern, einem s-förmigen Verbiegen, was sich nachteilig auf die Radregelfunktionen auswirkt. Die Hinterachsen eines Lkw verfügen üblicherweise über eine Luftfederung in Verbindung mit Achslenkern, wodurch ein besserer Federungskomfort und ein Niveauausgleich bei Beladungsänderungen etc. ermöglicht wird. Der Einfluss auf die Radregelfunktionen hängt hierbei von der Aufhängungskinematik und -elastokinematik ab. Über das Abstützmoment beim Bremsen können ungünstige Lenkeranordnungen ein „Springen“ der Achse verursachen. Nutzfahrzeuge sind häufig mit Kugelumlauflenkungen ausgerüstet, welche das Lenkmoment über eine Lenkspindel hydraulisch verstärkt auf den Lenkstockhebel übertragen. Durch den üblicherweise positiven Lenkrollradius ergibt sich bei seitenweise unterschiedlichen Bremskräften eine spürbare Rückmeldung über die Lenkung an den Fahrer, was einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Abstimmung des ABS hat. Ein weiterer Faktor ist die Variantenvielfalt von Lkw. Bei der Bestellung eines Lkw lassen sich aus dem Baukasten verschiedener Lkw-Konstruktionen unterschiedlichste Varianten kombinieren. Dies bezieht sich neben üblichen Ausstattungen wie Getriebe und Motor auch auf die Art und Anzahl der Achsen, die Achsaufhängung, die Radstandlänge, die Leiterrahmenstärke, Art des Lenkgetriebes usw. In Abhängigkeit der vorgesehenen

Aufgaben des Fahrzeugs liefert der Hersteller den Lkw häufig direkt an einen Aufbauhersteller, welcher den Lkw für seinen eigentlichen Einsatz ausrüstet. Durch damit einhergehende Modifikationen und An- bzw. Aufbauten werden die fahrphysikalischen Eigenschaften weiter beeinflusst. Insbesondere für die Radregelfunktionen wie ABS und ASR bedeutet die Variantenvielfalt eine erhebliche Anforderung an die Robustheit, da die Entwicklungs- und Applikationsphase der Systeme nur mit einer beschränkten Anzahl an Fahrzeugvarianten untersucht werden kann. Daher muss eine robuste Systemauslegung erfolgen, die alle möglichen Kombinationen abdeckt. Die typischen Rad- bzw. Achslasten eines Lkw liegen deutlich über denen eines Pkw (bis zu Faktor 15), wodurch eine erheblich höhere Flächenpressung an der Reifenoberfläche resultiert. Typische Reifenluftdrücke im Nutzfahrzeug liegen bei 6 bis 9 bar. In Kombination mit einer verschleißoptimierten Auslegung der Reifen führt dies zu niedrigeren maximalen Reibwerten und somit zu einer geringen maximal möglichen Bremsverzögerung von ca. 7 bis 8 m/s^2. (Winner et al., 2015)

Aufgrund der hohen möglichen Zuladung im Nutzfahrzeug ergibt sich ein größeres beladen-leer-Verhältnis k_{load} als im Pkw, vgl. Formel **(3)**.

$$k_{load} = \frac{m_{full}}{m_{empty}} \quad \textbf{(3)}$$

Typische Lkw-Werte liegen im Bereich von k_{load} = 2,7…2,9. Im Anhängerbetrieb oder bei Schwertransporten werden dabei k_{load}-Werte von bis zu 15 erreicht. Ein Mittelklasse-Pkw erreicht k_{load}-Werte von 1,2 bis 1,4. Beim Anhängerbetrieb wird zwischen eingliedrigen und mehrgliedrigen Anhängerfahrzeugen unterschieden. Weiterhin wird zwischen der Art der Ankopplung unterschieden zwischen einer Anhängekupplung (Kugelgelenk) die nur Kräfte aber keine Momente übertragen kann und einer Sattelkupplung die auch Wankmomente überträgt. Daraus ergeben sich zusätzliche Freiheitsgrade, die die fahrphysikalischen Eigenschaften wesentlich beeinflussen. Für die Radregelsysteme werden die einzelnen Teilfahrzeug allerdings separat betrachtet, weshalb jedes Teilfahrzeug mit einem unabhängigen ABS ausgestattet ist. (Robert Bosch GmbH, 2002; Winner et al., 2015)

Für den Fall, dass sowohl das Zugfahrzeug als auch das der Anhänger mit einem EBS ausgerüstet sind gibt es eine nach ISO 11992 standardisierte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen, vgl. **Abbildung 6** (F. Hecker, S. Hummel, O. Jundt, K.-D. Leimbach, I. Faye, H. Schramm, 1997; ISO, 2019). Die Dateninhalte werden nach ISO 11992-2 definiert und entsprechend ihrer Bedeutung und Funktion weiterverarbeitet (ISO, 2014). Signale die über die Schnittstelle zwischen dem Zugfahrzeug und Anhänger ausgetauscht werden können sind beispielsweise Radgeschwindigkeiten, Achslasten, Reifendruckwerte, ABS Status, Bremsbelagsverschleiß, Bremszylinder-Druck pro Rad oder die Querbeschleunigung des Anhängers (ISO, 2014). Der Umfang des Kommunikationsaustauschs mit weiteren Bus-Teilnehmern erfolgt gemäß des Hersteller-Fahrzeugbus-Lastenhefts (WABCO, 2011). Die Datenübertragung erfolgt über die nach ISO 7638 (7 Pins) oder nach ISO 12098 (15 Pins) genormten „Spiralkabel“ mit einer nominellen Datenrate von 125 kBit/s (Körber et al., 2021). Zur Einführung von ABS haben Untersuchungen von verschiedenen Kombinationen von Zugmaschinen und Trailern mit und ohne ABS

ergeben, dass sich das Fahrverhalten mit ABS grundsätzlich verbessert, auch wenn nicht alle Teilfahrzeuge damit ausgerüstet sind (Robert Bosch GmbH, 2002; Winner et al., 2015). Eine optimale Bremsregelung im physikalischen Grenzbereich kann bei allen Fahrzeugkombinationen allerdings nur dann gewährleistet werden, wenn sowohl die Zugmaschine als auch der Anhänger mit ABS ausgestattet werden. (Robert Bosch GmbH, 2002; WABCO, 2011; Winner et al., 2015)

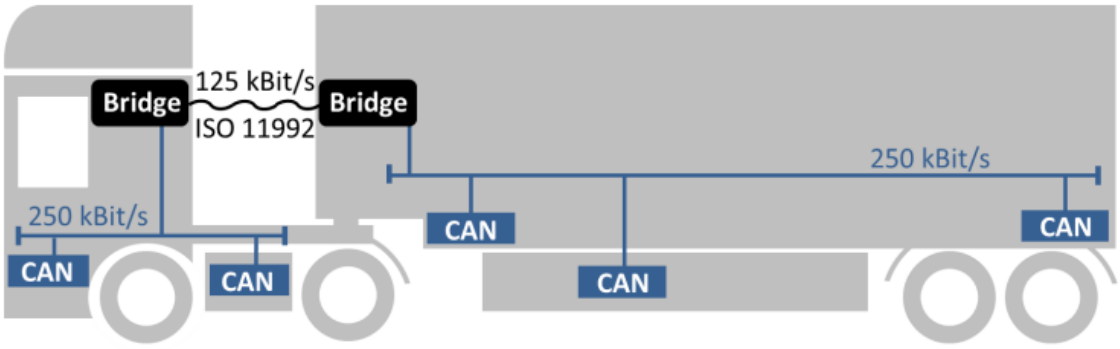

Abbildung 6: Kommunikationsaustausch zwischen Zugfahrzeug und Anhänger nach ISO 11992 (Körber et al., 2021)

Neben einer Betriebsbremse und einer Feststellbremse verfügen Nutzfahrzeuge in der Regel über verschleißfrei arbeitende Dauerbremsen, welche auch als Retarder bezeichnet werden. Ein Lkw-ABS muss diesbezüglich berücksichtigen, dass es bei geringen Achslasten, z. B. bei einem Leerfahrzeug, durch die Aktivierung des Retarders bei geringen Reibwerten zu großen Radschlupfwerten und somit zu Instabilitäten an den Antriebsrädern kommt. Das Fahrzeug muss in der Lage sein, derartige Zustände zu erkennen und die Fahrstabilität in solchen Situationen durch eine Abschaltung der Dauerbremse aufrechtzuerhalten. (Robert Bosch GmbH, 2002; WABCO, 2016; Winner et al., 2015)

3.3 Lkw-Fahrdynamik

Die Überrepräsentation von LKW in Statistiken zu tödlichen Unfällen kann mehreren unerwünschten Attributen ihrer Fahrdynamik zugeschrieben werden. Selbst mit der Einführung elektronischer Bremssysteme (EBS) und dem Wechsel von Trommelbremsen zu Scheibenbremsen sind die Bremswege von Lkw typischerweise 40 % länger als die von Pkw, vgl. **Abbildung 7**. Das Verständnis der Fahrdynamik ist die Basis zum Verständnis des Gesamtfahrzeugs, was besonders bei Nutzfahrzeugen von hoher Bedeutung ist, da diese meistens von unterschiedlichen Entwicklungsgruppen konzipiert werden. Dabei wird das Fahrgestell üblicherweise vom Fahrzeughersteller entwickelt und gefertigt wohingegen der Auf- bzw. Anbau für den eigentlichen Nutzeinsatz des Fahrzeugs von einem weiteren Hersteller entwickelt und gefertigt wird. Alle beteiligten Entwicklungsgruppen müssen dabei stets ein genaues Verständnis der Auswirkungen ihrer Konstruktionen auf die Fahrdynamik des Gesamtfahrzeugs beachten. Bei Nutzfahrzeugen kann der Trägheitsanteil drehender Teile je nach Dimensionierung erheblich sein und die Fahrdynamik dementsprechend beeinflussen. Ein Extrembeispiel dafür sind die besonders großen Reifen von 8x8-Fahrzeugen in Kombination mit Radnabengetrieben. Wenn das Gesamtfahrzeug

beschleunigt, müssen alle Drehteile ihre Drehträgheit überwinden, weshalb die erforderliche Beschleunigungskraft die Kraft, die sich alleine aus dem 2. Newton'schen Gesetz bestimmen würde, in solchen Fällen deutlich überstiegen wird. (Henderson & Cebon, 2015; Hoepke & Breuer, 2016)

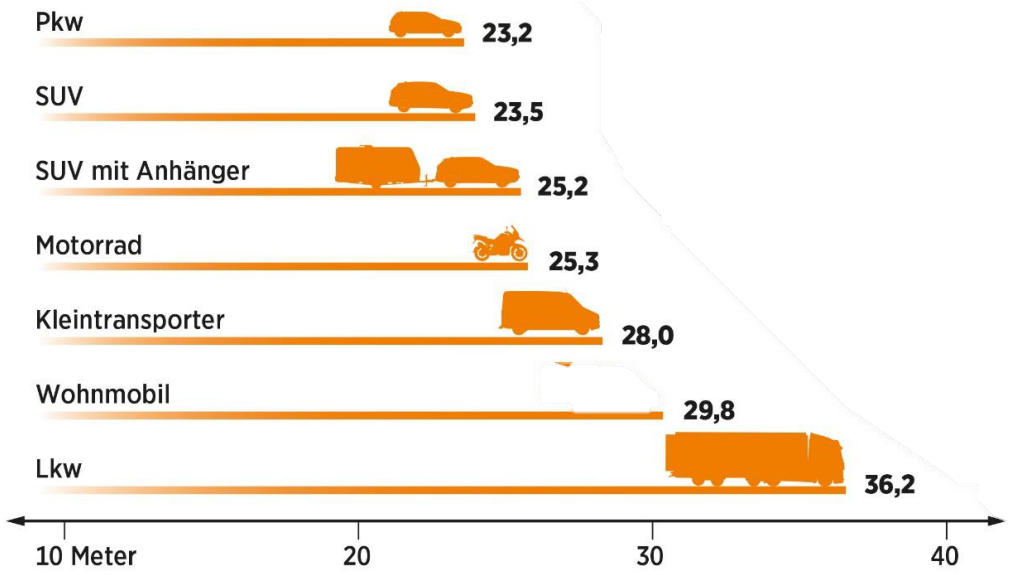

Abbildung 7: Bremswege verschiedener Fahrzeugklassen nach (ADAC e.V., 2015)

Die Fahrgrenzen eines Kraftfahrzeugs werden durch seine Motorleistung und die über die Reifen übertragbaren Kräfte beschrieben. Für dieses Projekt liegt der Fokus auf den an den Reifen übertragbaren Kräften, welche proportional zu den Vertikalkräften, also den Achslasten sind. Dieser Proportionalitätsfaktor zwischen Vertikal- und Umfangskraft wird als Kraftschlussbeiwert bezeichnet, vgl. Abs. 2.1. Im Gegensatz zum Pkw, werden Lkw häufig an den Grenzen der zulässigen Achslast betrieben. Die gesetzlichen Vorschriften für einen Sattelzug mit fünf Achsen und einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t unterscheiden sich nach Art der Achse. Demnach darf die Lenkachse mit 10 t, die angetriebene Achse mit 11,5 t und ein Dreiachsaggregat, wie es beispielsweise bei einem Auflieger vorzufinden ist, mit 24 t Achslast beaufschlagt werden. Durch die Positionierung der Nutzlast kann die Achslastverteilung beeinflusst werden, wobei die Bestrebung verfolgt wird, die Antriebsachse maximal möglich zu belasten, da dies wiederrum die übertragbaren Antriebskräfte erhöht. Die stark unterschiedlichen Achslasten eines Lkw haben ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf dessen Fahrdynamik. Die Achslast der Hinterachse einer leeren und beladenen Sattelzugmaschine kann bspw. zwischen 2 und 11,5 t schwanken, wobei sich auch die Bodenaufstandsfläche verändert. Die vom Reifen übertragbaren Kräfte sind abhängig vom Radschlupf, vgl. Abs. 2.1. Ab einem gewissen Schlupf wird der Bereich der Haftreibung überschritten und es können, ähnlich wie bei der Coulombschen Reibung, nur noch Gleitreibungskräfte übertragen werden. Aus diesem Sachverhalt resultieren die typischen μ-Schlupfkurven eines Reifens, vgl. Abbildung 1. Ohne Schlupf können keine Kräfte übertragen werden, darauf folgt bei kleinen Schlupfwerten ein steiler Anstieg des Kraftschlussbeiwerts, welcher das Maximum im Bereich zwischen 10 und 20 % Schlupf erreicht. Für größere Schlupfwerte fällt der Kraftschlussbeiwert wieder ab. Bei gleichzeitiger Beanspruchung durch Längs- und Querkräfte addieren sich diese

vektoriell, vgl. Gleichung (1). Die resultierende Kraft lässt sich dann in Form des Kamm'schen Kreises darstellen. (Hoepke & Breuer, 2016)

Bei der Beschleunigung oder Verzögerung des Fahrzeugs kommt es zu einer Veränderung der Radlasten, was als dynamische Radlasten bezeichnet wird. Anhand des in **Abbildung 8** dargestellten Einspurmodells eines Sattelzuges lassen sich unter Kenntnis der Schwerpunktlage von Zugfahrzeug und Auflieger die dynamischen Achslaständerungen beim Bremsvorgang $\ddot{x}$ durch das Aufstellen der entsprechenden Kräfte- und Momentengleichgewichte bestimmen. (Hoepke & Breuer, 2016)

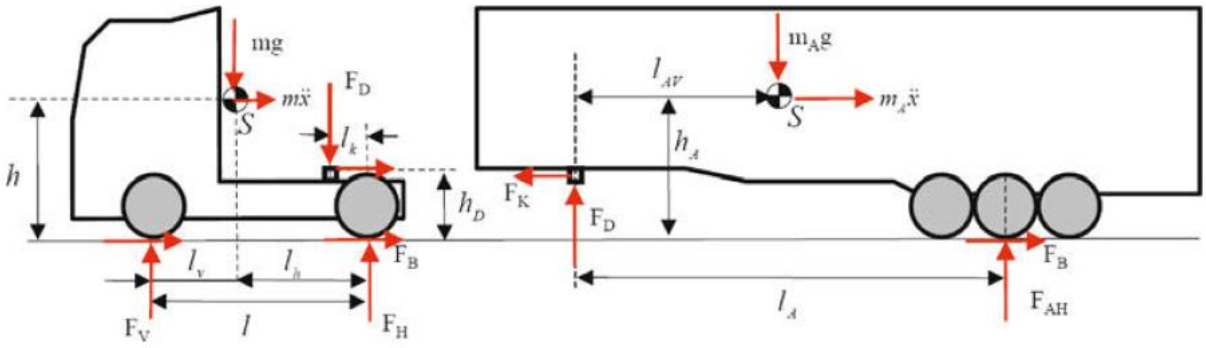

Abbildung 8: Bestimmung der Achslasten eines Sattelzuges beim Bremsen (Hoepke & Breuer, 2016)

Bei der Betrachtung einer unbeladenen Solozugmaschine wird ersichtlich, dass die Vorderachse beim Bremsen deutlich belastet und die Hinterachse entlastet wird. Bedingt durch die ungünstige Gewichtsverteilung einer leeren Sattelzugmaschine in Kombination mit dem kurzen Radstand und der immer leistungsfähigeren Vorderradbremsen kann es dazu kommen, dass die Hinterachse bei starken Bremsungen den Bodenkontakt verliert. Mit entsprechender Bremselektronik wird dieser Zustand sensiert und die Bremskraft an der Vorderachse derart begrenzt, dass ein Umkippen des Fahrzeugs vermieden wird. Dies wird von den Bremsenherstellern auch als sogenannte „Tilt-Prevention" bezeichnet. (S. Breuer & Rohrbach-Kerl, 2015; Hoepke & Breuer, 2016)

Beim Bremsen eines Lkw sind die Ansprechzeit und die Schwellzeit abhängig vom Bremssystem. Vom Gesetzgeber wird eine Höchstdauer für die Ansprechzeit und die halbe Schwellzeit von 0,54 s für Nutzfahrzeuge vorgegeben. Der gesetzlich maximal zulässige Bremsweg bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 60 km/h beträgt 36,7 m. Davon ausgehend wird der Verlustweg während der Ansprechs- und Schwellzeit von 9 m abgezogen, sodass noch 27,7 m für die Vollverzögerung bleiben. Daraus ergibt sich eine Mindestverzögerung für Nutzfahrzeuge von 5 m/s^2. (Hoepke & Breuer, 2016)

3.4 Fahrdynamiksimulation von Lkw-Längsbremsungen

Mittels Fahrdynamiksimulationen wird analysiert, inwiefern sich das vorhandene Reibwertpotenzial von einem Lkw bei Längsbremsungen tatsächlich ausnutzen lässt. Im Rahmen der Bachelorarbeit „Entwicklung eines Fahrdynamikmodells zur Analyse der möglichen Kraftschlussausnutzung von Güterkraftfahrzeugen" (Shirkhani, 2023) wird dazu ein Fahrdynamik-Simulationsmodell entwickelt, mit dem longitudinale

Vollbremsmanöver eines Sattelzugs simuliert werden können. Eine schematische Darstellung des Simulationsmodells ist **Abbildung 9** zu entnehmen.

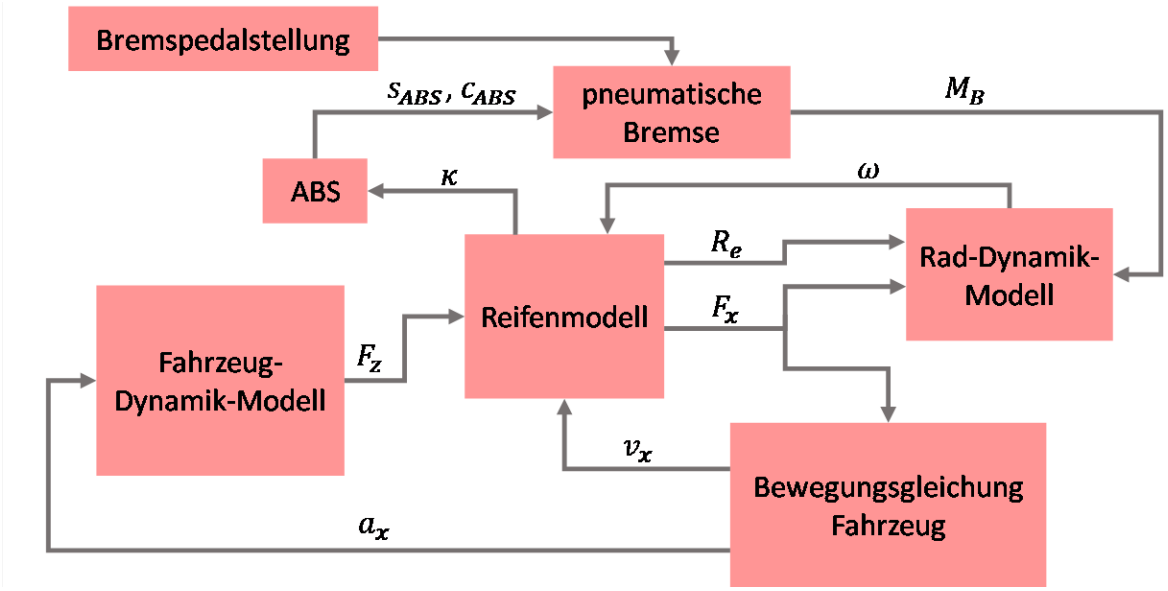

Abbildung 9: Schematische Aufbau des Simulationsmodells (Shirkhani, 2023)

Das Eingangssignal des Modells ist die Bremspedalstellung. Wird das Bremspedal aktiviert, werden die Bremsmomente M_B im Submodell der pneumatischen Bremse errechnet und in ein Modell für die Rad-Dynamik weitergegeben. Dieses Modell wird außerdem mit der von den Reifen übertragenen Längskraft F_x und dem effektiven Reifenrollradius R_e aus dem Reifenmodell gespeist. Aus diesen Größen wird die Winkelgeschwindigkeit der Räder ω ermittelt und an das Reifenmodell weitergeleitet. Im Reifenmodell werden die übertragene Längskraft F_x, der Schlupf κ und der effektive Reifenrollradius R_e bestimmt. Der Schlupf geht als Eingabe in das ABS-Modell. Zusätzlich wird die Reifenlängskraft an ein Modell für die Bewegungsgleichung des Fahrzeugs übermittelt. Hier wird die Beschleunigung des Fahrzeuges in Längsrichtung a_x bestimmt und an das Fahrzeug-Dynamik-Modell übertragen. Außerdem wir hier die Fahrzeuggeschwindigkeit in Längsrichtung v_x ermittelt und an das Reifenmodell weitergegeben. Das Fahrzeug-Dynamik-Modell ermittelt aus der Längsbeschleunigung des Fahrzeugs die Aufstandskraft der Reifen F_z und gibt diese wiederum an das Reifenmodell weiter. Das ABS-Modell überwacht den Schlupf κ und übermittelt die ABS-Signale s_{ABS} und c_{ABS} an die pneumatische Bremse, die anhand dessen das Bremsmoment entsprechend regelt. Das Modell der pneumatischen Bremse basiert auf der Arbeit von (Güleryüz & Başer, 2021) und wird entsprechend für einen Sattelzug angepasst. Das hinterlegte Einspurmodell für den längsdynamischen Fall unterteilt sich in die Subsysteme der Fahrzeug Bewegungsgleichung und das Fahrzeug-Dynamik-Modell und basiert auf dem in Abbildung 8 gezeigten Freischnitt nach dem Prinzip von d'Alembert. Als Reifenmodell wird die Magic-Formular nach Pacejka verwendet (Besselink et al., 2010; Pacejka, 2006). Die zugehörige Reifendatei entspricht einem Beispieldatensatz für einen durchschnittlichen Lkw-Reifen vom Format 315/80 R22,5.

Das Simulationsmodell wird hinsichtlich des Versuchs-Lkw parametriert (vgl. Abs. 4.1) und anhand der Messdaten von Vollbremsungen mit verschiedenen Beladungszuständen, Ausgangsgeschwindigkeiten sowie trockenen und nassen Fahrbahnen validiert. Bei der Validierung wird die Regelgüte des simulierten ABS für die einzelnen Zustände so angepasst, dass die in der Realität gemessene Verzögerung des Gesamtfahrzeugs möglichst gut wiedergegeben wird. **Abbildung 10** zeigt die Validierungsergebnisse für den halbvoll beladenen Sattelzug bei Ausgangsgeschwindigkeiten von 30 und 60 km/h auf trockenem Asphalt.

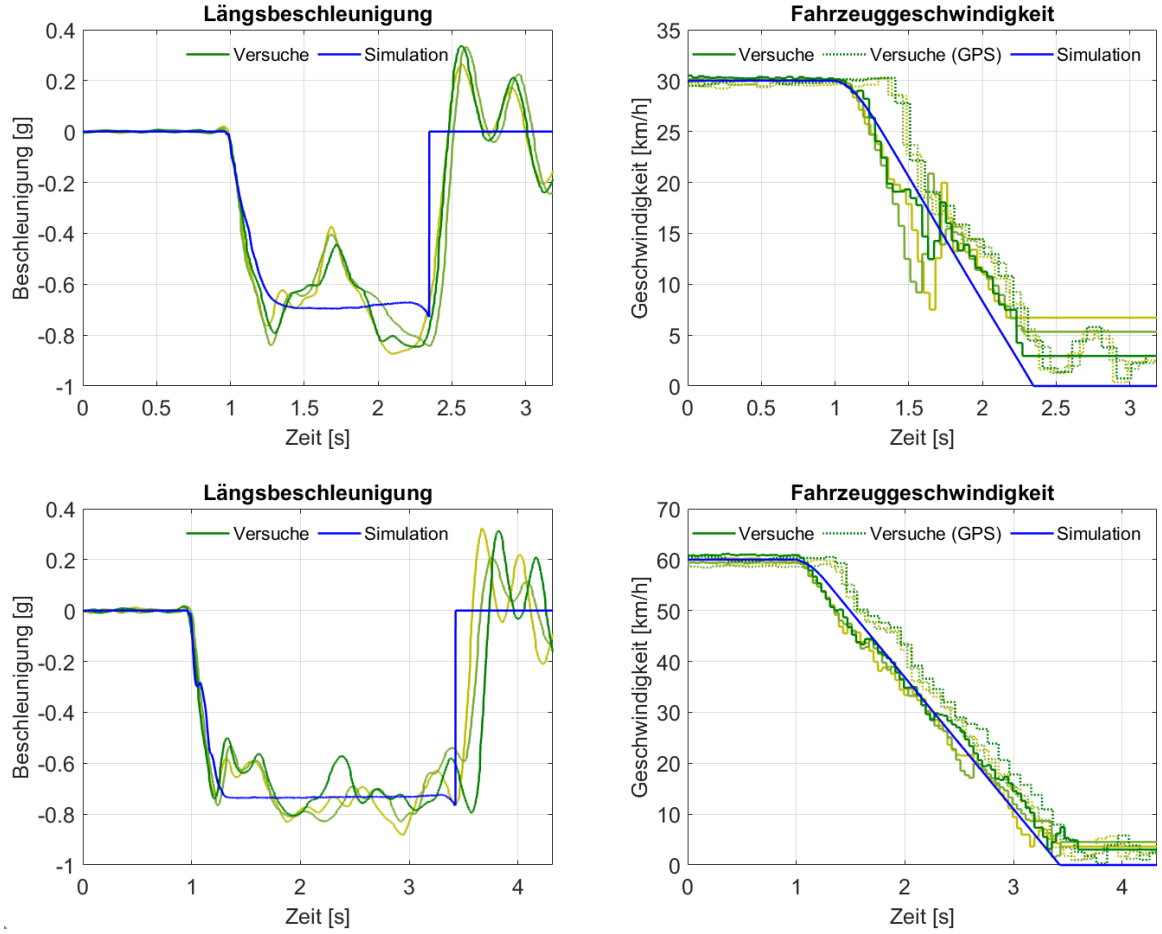

Abbildung 10: Validierung des Simulationsmodells anhand realer Messdaten von Vollbremsungen mit einem halbvoll beladenen Versuchs-Lkw bei Ausgangsgeschwindigkeiten von 30 und 60 km/h (Shirkhani, 2023)

Dabei werden die Messdaten von drei realen Bremsungen mit den entsprechenden simulierten Größen gegenübergestellt, wobei insgesamt eine hohe Übereinstimmung zwischen der Simulation und den realen Messdaten erzielt wird. Es fällt allerdings auf, dass die simulierten Bremsungen zeitlich etwas früher enden als in der Realität. Das ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Simulation idealisiert von einem rein längsdynamischen Manöver ausgeht, bei dem keine Seitenkräfte auftreten. Außerdem werden keine Aufbauschwankungen oder sonstige Störgrößen berücksichtigt, sodass die Verzögerung während der Bremsung in der Simulation im Gegensatz zur Realität annähernd konstant verläuft. Zudem wird der langsame Abbau der Verzögerung zum Ende der Bremsung vom Reifenmodell nicht berücksichtigt, sodass die

Beschleunigung zum Ende schlagartig auf 0 g springt. Unter Berücksichtigung der genannten Idealisierungen kann in der Simulation insgesamt ein sehr realitätsnahes Verhalten eines Sattelzugs während einer longitudinalen Vollbremsung abgebildet werden.

Mit dem validierten Simulationsmodell können im Folgenden die Kräfte an den Rädern einzelner Achsen und somit auch die Kraftschlusspotenzialausnutzung der einzelnen Räder genauer untersucht werden. Für die in Abbildung 10 dargestellte simulierte Vollbremsung mit dem halbvoll beladenen Sattelzug bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 60 km/h ergeben sich die in **Abbildung 11** dargestellten zeitlichen Verläufe für die Radaufstandskraft, Reifenlängskraft und den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn.

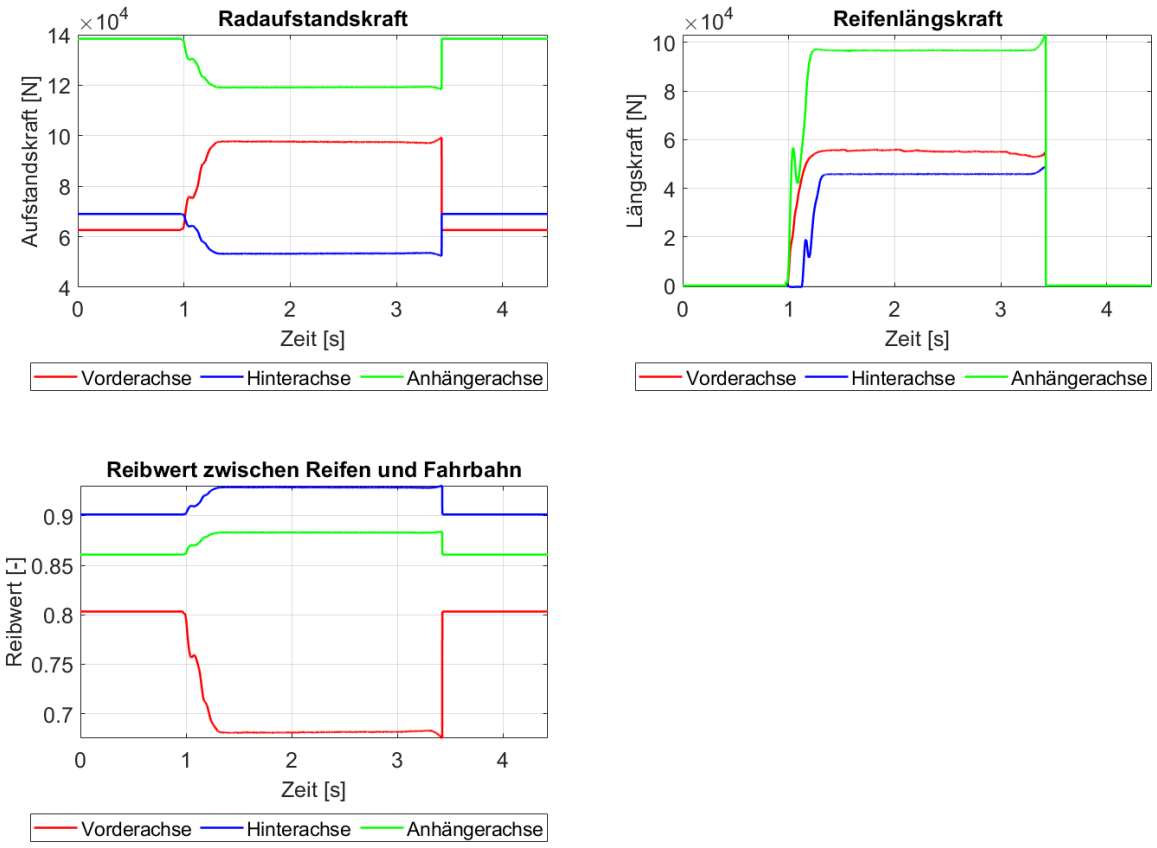

Abbildung 11: Simulationsergebnisse der Radaufstandskraft, der Reifenlängskraft und des Reibwerts für eine Lkw-Vollbremsung aus 60 km/h im halbvollen Beladungszustand (Shirkhani, 2023)

Dabei ist die dynamische Verlagerung der Radlasten besonders gut zu erkennen. Die Trägheit der Aufliegermasse verursacht eine Änderung der Anhängerradlast und der Stützlast am Königszapfen, welche sich wiederrum auf das Zugfahrzeug auswirkt. Die Anhängerachse und die Hinterachse der Zugmaschine werden entlastet und die Vorderachse der Zugmaschine im gleichen Maße belastet. Die Summe der Achslasten bleibt dabei immer konstant. An der Reifenlängskraft zeigt sich der Zusammenhang zwischen eben dieser und der Aufstandskraft. Je höher die Aufstandskraft, desto größer ist auch die übertragbare Längskraft des Reifens. Es ist außerdem zu beobachten, dass die Bremskraft an der Hinterachse erst später einsetzt als an den

beiden anderen Achsen. Dies ist auf das pneumatische Bremssystem zurückzuführen, in dem die Betätigung der hinteren Bremskammern erst durch das Relaisventil initialisiert werden muss. Es ist zu beachten, dass sich die Ergebnisse auf die drei Reifen des längsdynamischen Einspurmodells beziehen und nicht exemplarisch für einen realen Reifen der jeweiligen Achse stehen. Um diese Werte zu erhalten, muss das Ergebnis für die jeweilige Achse durch die entsprechende Anzahl der Reifen am ursprünglichen realen Fahrzeug geteilt werden. Die zeitlichen Verläufe der Reibwerte zwischen Reifen und Fahrbahn geben Auskunft darüber, wie gut das vorhandene Reibwertpotenzial ausgenutzt werden kann. Im Falle der Bremsung auf trockener Fahrbahn liegt dieses Potenzial, also der theoretisch maximal mögliche Reibwert, bei $\mu_{max} = 1$. Hier zeigt sich der Zusammenhang zwischen dem tatsächlichen Reibwert und der Aufstandskraft. Mit zunehmender Aufstandskraft sinkt der Reibwert und umgekehrt steigt er bei abnehmender Aufstandskraft. Die dargestellten Reibwerte sind repräsentativ für einen realen Einzelreifen der jeweiligen Achse.

4 Reibwertpotenzialmessungen

Als Versuchs-Lkw wird der in **Abbildung 12** dargestellte Mercedes-Benz Actros 1851 LS 4X2 F 13 (Baujahr 2011) eingesetzt, welches die Fahrzeugklasse N2 gut widerspiegelt. Das Fahrzeug verfügt über ein EBS System mit ABS und ASR vom Hersteller Knorr-Bremse. An der Vorderachse sind Reifen mit der Dimension 385/55 R22,5 vom Typ ContiEcoPlus HS3 montiert. Die Zwillingsbereifung der Hinterachse ist vom Typ ContiEcoPlus HD3 mit einer Reifendimension von 315/70 R22,5. Die Reifen sind aus dem Herstellungsjahr 2017 und werden für die gesamte Projektlaufzeit eingesetzt. Für alle Versuche innerhalb dieses Projekts ist es vorgesehen, die Messungen parallel mit dem Versuchs-Lkw und einem Versuchs-Pkw durchzuführen. Als Versuchs-Pkw wird dabei der ebenfalls in Abbildung 12 dargestellte BMW 330e G20 (Baujahr 2018) genutzt. Der Versuchs-Pkw ist mit einem Satz Winterreifen vom Typ Bridgestone Blizzak LM 001 mit der Dimension 225/50 R17 98H ausgestattet, welcher ebenfalls für die gesamte Projektlaufzeit eingesetzt wird. Winterreifen werden bewusst eingesetzt, da diese sowohl im Sommer als auch im Winter gefahren werden können und somit der Einflussfaktor des Reifentyps auf einen Reifensatz beschränkt wird.

Abbildung 12: Versuchsfahrzeuge Mercedes-Benz Actros und BMW 330e

4.1 Messtechnik

Zur Messung und späteren Echtzeitschätzung des nutzbaren Reibwertpotenzials wird der Versuchs-Lkw mit entsprechender Messtechnik ausgestattet. Hauptbestandteil dessen ist ein 3-axialer Beschleunigungsaufnehmer vom Typ DA 3102-002g der Firma Disynet. Dieser Sensor verfügt über einen Messbereich von +/- 2 g, eine Sensitivität von +/- 2 % und eine maximale Bandbreite von 1500 Hz (Disynet, 2010). Die analogen Ausgangssignale des Sensors werden mit einem kalibrierten AD-Wandler-Modul weiterverarbeitet und auf einen Messtechnik CAN-Bus gesendet. Wie in **Abbildung 13** dargestellt, wird der Beschleunigungsaufnehmer in der Nähe der horizontalen Schwerpunktlage hinter dem Fahrerhaus der Zugmaschine auf einer am

Fahrzeugrahmen montierten Querstrebe befestigt. Zur zusätzlichen Schwingungsdämpfung wird dabei ein doppelseitiges Klebepad verwendet. Um eine maximale Befestigung zu gewährleisten wird der Sensor außerdem mit zwei Schrauben fest an der Querstrebe verschraubt. Zum weiteren Schutz gegen Schmutz und Feuchtigkeit wird der Sensor zusätzlich mit Klebeband abgeklebt, vgl. Abbildung 13 rechts.

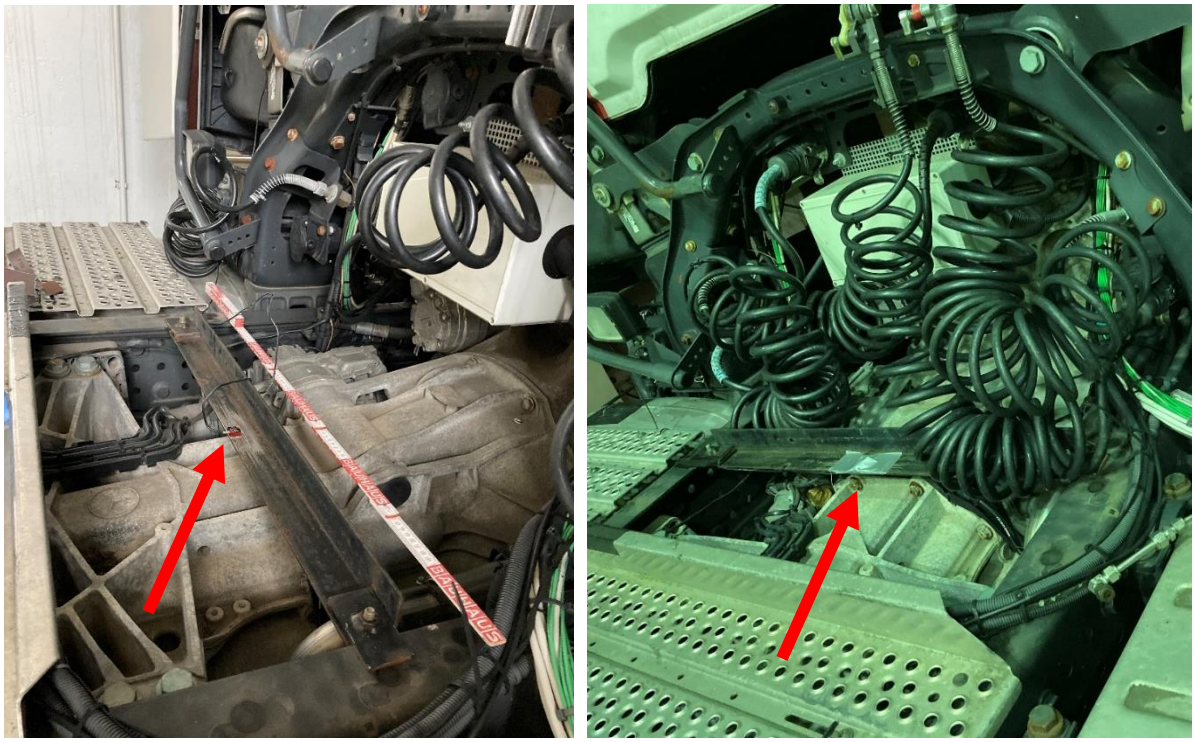

Abbildung 13: Einbauort des 3-axialen Beschleunigungssensors

Damit zusätzlich auch Winkelgeschwindigkeiten gemessen werden können, wird eine Inertial Measurement Unit (IMU) vom Typ BNO055 von der Firma Adafruit oberhalb des 3-axialen Beschleunigungssensors verbaut. Hierbei handelt es sich um einen kostengünstigen MEMS-Sensor, welcher für alle drei Achsen die Beschleunigungen, Winkelgeschwindigkeiten und absoluten Winkel als Euler-Vektor oder Quaternion mit einer Abtastrate von 100 Hz erfassen kann (Kevin Townsend, 2021). Der Sensor verfügt über einen integrierten Sensorfusionsalgorithmus und gibt die fusionierten Signale über eine serielle I^2C-Schnittstelle aus. Mittels eines Arduino Mikrocontrollers werden die seriellen Signale eingelesen und weiterverarbeitet. Weiterhin wird das GPS System IPEspeed der Firma IPETRONIK eingesetzt. Außerdem besteht über den PowerTrain-CAN der Zugmaschine ein Zugriff auf die fahrzeugseitige Sensorik. Dabei werden relevante Signale wie die Radgeschwindigkeiten, die Bremspedalstellung und das vom Fahrzeug bestimmte Gesamtgewicht aufgezeichnet. Die nach ISO 11992-2 standardisierte Kommunikation zwischen Auflieger und Zugmaschine wird ebenfalls mit aufgezeichnet. Die Aufzeichnung aller Messsignale erfolgt einem VN1610 CAN-Interface der Firma Vector Informatik. Zusätzlich wird eine GoPro Hero5 Action-Kamera an der Windschutzscheibe des Lkw montiert. **Abbildung 14** zeigt eine schematische Übersicht der Messtechnik des Versuchs-Lkw.

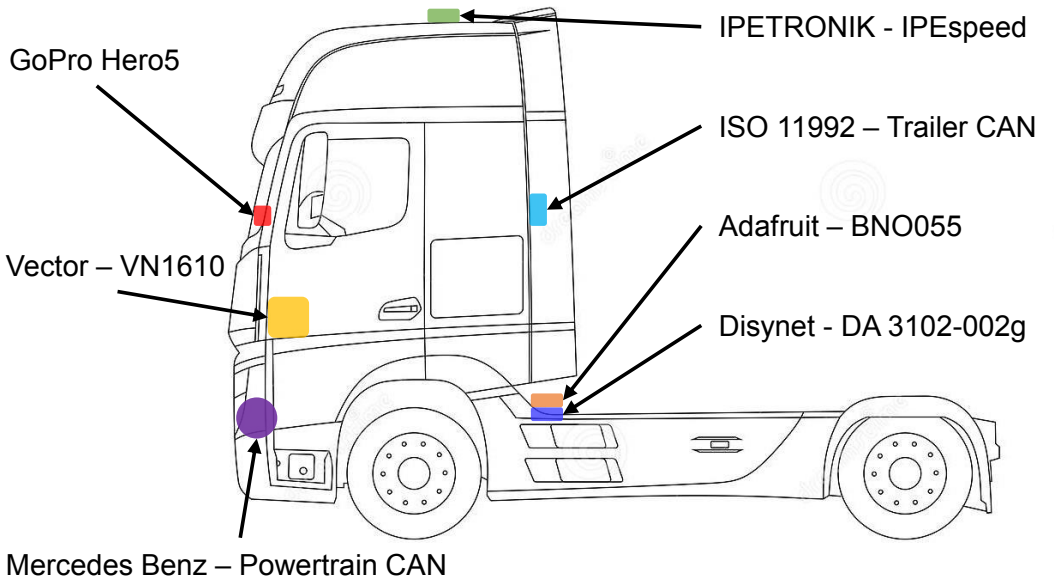

Abbildung 14: Messtechnik im Versuchs-Lkw, Skizze nach (*Dreamstime*, 2022)

Die Messtechnik des Versuchs-Pkw umfasst eine IMU vom Typ ADMA-G der Firma GeneSys GmbH. Dabei handelt es sich um ein hochpräzises Fahrdynamik-messsystem, welches über drei Servo-Beschleunigungsaufnehmer, drei faseroptische Drehratensensoren und ein integriertes GPS-System verfügt. Weiterhin ist der Versuchs-Pkw mit einem MARWIS UMB Straßenwettersensor der Firma Lufft ausgestattet, welcher es ermöglicht die Fahrbahnoberflächentemperatur, die Umgebungstemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und die Wasserfilmhöhe lokal am Fahrzeug zu messen. Neben einem Zugriff auf den fahrzeugeigenen Powertrain CAN-Bus verfügt der Versuchs-Pkw über Reifentemperatursensoren IRN4C-F1 vom Hersteller Texense, hochdynamische Reifenfülldrucksensoren HS TTPMS von Izze Racing und ein hochauflösendes Kamerasystem Blackfly U3 von Flir. Als Hauptmessrechner wird eine Autobox von dSpace eingesetzt, womit die Aufzeichnung und Synchronisation der einzelnen Messsignale realisiert wird. Eine schematische Darstellung der Messtechnik des Versuchs-Pkw ist **Abbildung 15** zu entnehmen.

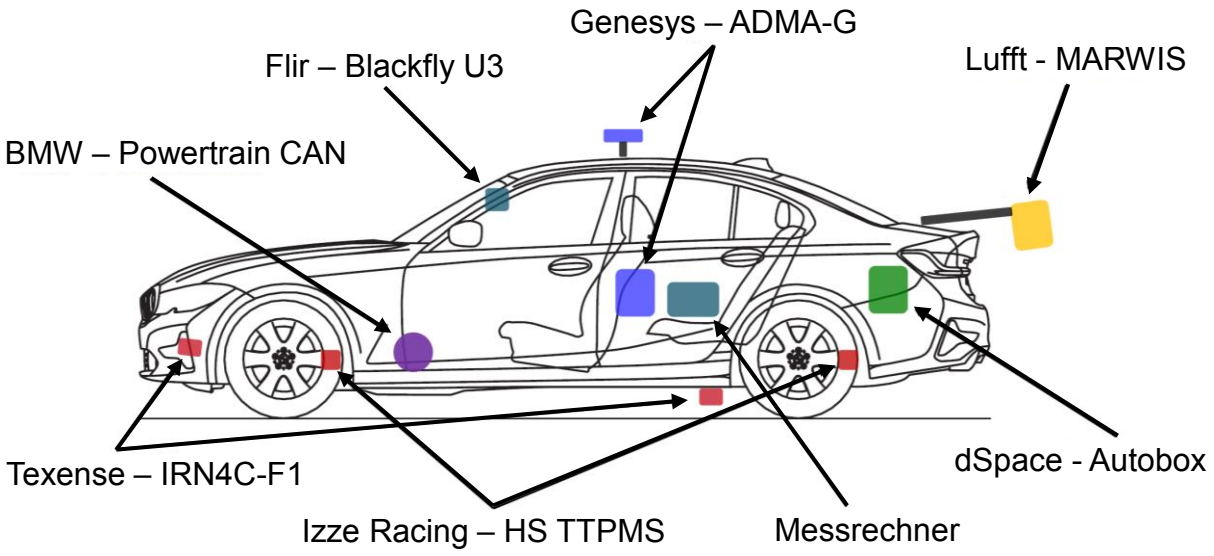

Abbildung 15: Messtechnik im Versuchs-Pkw, Skizze nach (BMW, 2019)

Zur Analyse der Messdaten der kostengünstigen BNO055 IMU erfolgen entsprechende Vergleichsmessungen im Versuchs-Pkw gegenüber dem ADMA-G. Die Messergebnisse einer umfangreichen Messfahrt mit 44 Vollbremsungen zeigen insgesamt eine hohe Übereinstimmung zwischen dem hochwertigen ADMA-G Messsystem und dem BNO055. Für eine beispielhafte Vollbremsung zeigt **Abbildung 16** die Messergebnisse der Drehgeschwindigkeiten um die x-, y- und z-Achse beider Sensoren und **Abbildung 17** zeigt die gemessene Längsbeschleunigung. Die Längsbeschleunigung beider Sensoren wird jeweils mit einem Offset korrigiert. Die Signale des BNO055 werden zusätzlichen mit einer konstanten Phasenkorrektur bearbeitet, welche die Verzögerung durch die Signalverarbeitung mit dem Arduino Mikrocontroller ausgleicht. Demzufolge kann der BNO055-Sensor als zusätzliche Messtechnik im Lkw verwendet werden.

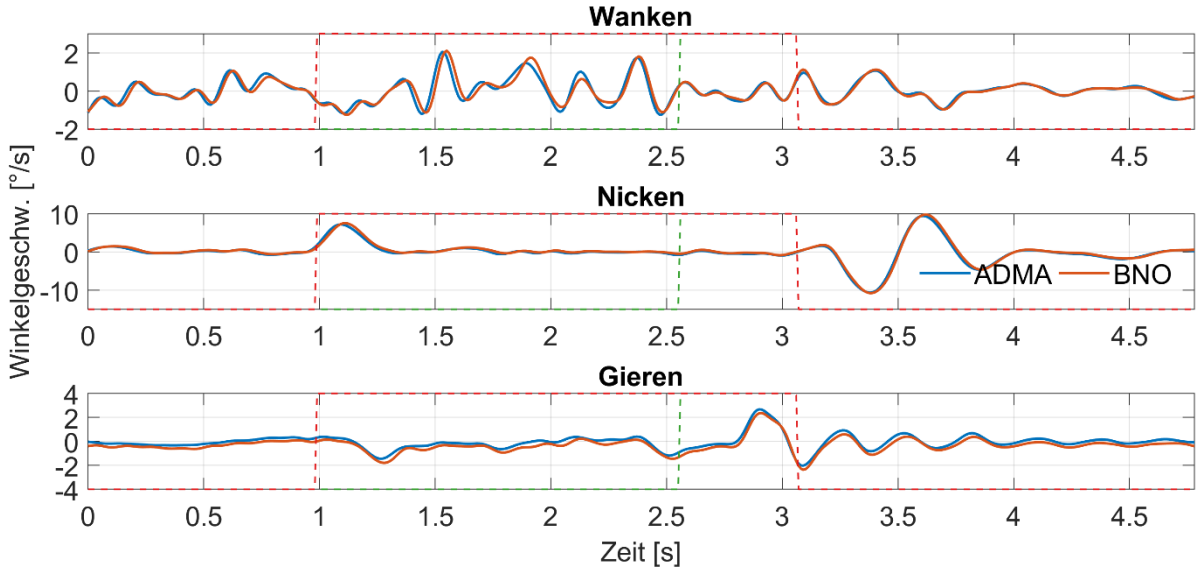

Abbildung 16: Vergleich Drehgeschwindigkeiten ADMA und BNO055 im Versuchs-Pkw

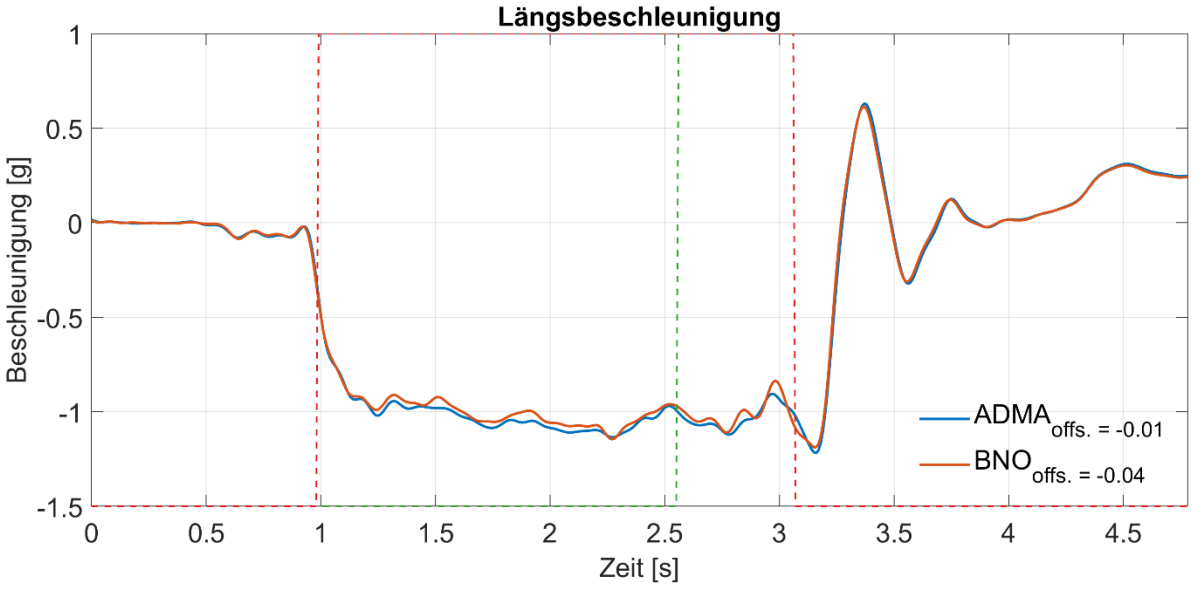

Abbildung 17: Vergleich Längsbeschleunigung ADMA und BNO055 im Versuchs-Pkw

4.2 Erprobung des Messfahrzeugs

Die Erprobung des Versuchs-Lkws erfolgt in verschiedenen Stufen. Zunächst wird eine Ersterprobung der Solozugmaschine durchgeführt. Anschließend erfolgt eine erste parallele Versuchsdurchführung mit dem Versuchs-Pkw und der Solozugmaschine auf einer definierten Messstrecke im Straßenverkehr. Daraufhin folgen die ersten Versuche mit dem gesamten Sattelzug, welche auf dem DEKRA-Testgelände am Lausitzring durchgeführt werden. Dabei werden zunächst Messungen mit unbeladenem Sattelzug bei verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Versuchsreihe mit verschiedenen Beladungszuständen und eine Versuchsreihe auf einer ABS-Teststrecke mit verschiedenen bewässerten Oberflächen. Eine zusätzliche Versuchsreihe wird durchgeführt, um das nutzbare Reibwertpotenzial mit zwei verschiedenen Auflieger-Modellen zu analysieren. Im Anschluss an die ersten Erprobungen erfolgen gezielte Versuchskampagnen auf der definierten Messstrecke im Straßenverkehr, wobei darauf abgezielt wird, eine Reibwertdatenbank für den Lkw aufzubauen, welche die verschiedenen Umgebungsbedingungen eines Jahres wiederspiegelt.

Die Ersterprobung erfolgt ausschließlich mit der Solozugmaschine und dient der ersten Durchführung von Lkw-Bremsmessungen, der Überprüfung der Messtechnik und der Plausibilisierung der Messsignale. Im Anschluss wird das Messsetup für die entsprechenden Anforderungen der Reibwertpotenzialmessungen konfiguriert und angepasst. Im nächsten Schritt erfolgt die erste parallele Versuchsdurchführung mit der Solozugmaschine und dem Versuchs-Pkw auf dem in **Abbildung 18** dargestellten Straßenabschnitt in Brandenburg. Bei dieser Strecke handelt es sich um einen Abschnitt der umfassenden Messstrecke des FAT-Projekts „Unfallvermeidung durch Reibwertprognose“ (Müller & Müller, 2017). Die Messstrecke setzt sich aus verschiedenen Landstraßen-abschnitten zusammen und umfasst 10 außerorts liegende Bremspunkte, an denen die Straße jeweils waagerecht verläuft. Außerdem zeichnet sich dieser Streckenabschnitt durch seine Nähe zur Glättemeldeanlage (GMA) Fahlhorst und zur nächstgelegenen DWD-Klimastation in Potsdam aus. Zudem können für diesen Streckenabschnitt eine hohe Einsehbarkeit der einzelnen Bremspunkte und ein überschaubares Verkehrsaufkommen gewährleistet werden. Die Durchführung der ersten parallelen Versuchsreihe zeigt, dass alle Bremspunkte sicher und zuverlässig mit dem Lkw erreicht werden können. Ein konstanter Funkkontakt zwischen dem vorausfahrenden Lkw und dem dahinter absichernden Pkw sind für die Versuchsdurchführung unabdingbar. Für alle Bremspunkte wird eine Ausgangsgeschwindigkeit von 60 km/h festgelegt, da dies auf Landstraßen die gesetzlich vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit für Lkw ist. Zur besseren Vergleichbarkeit zwischen Lkw und Pkw erfolgen die zugehörigen Pkw-Messungen ebenfalls mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 60 km/h.

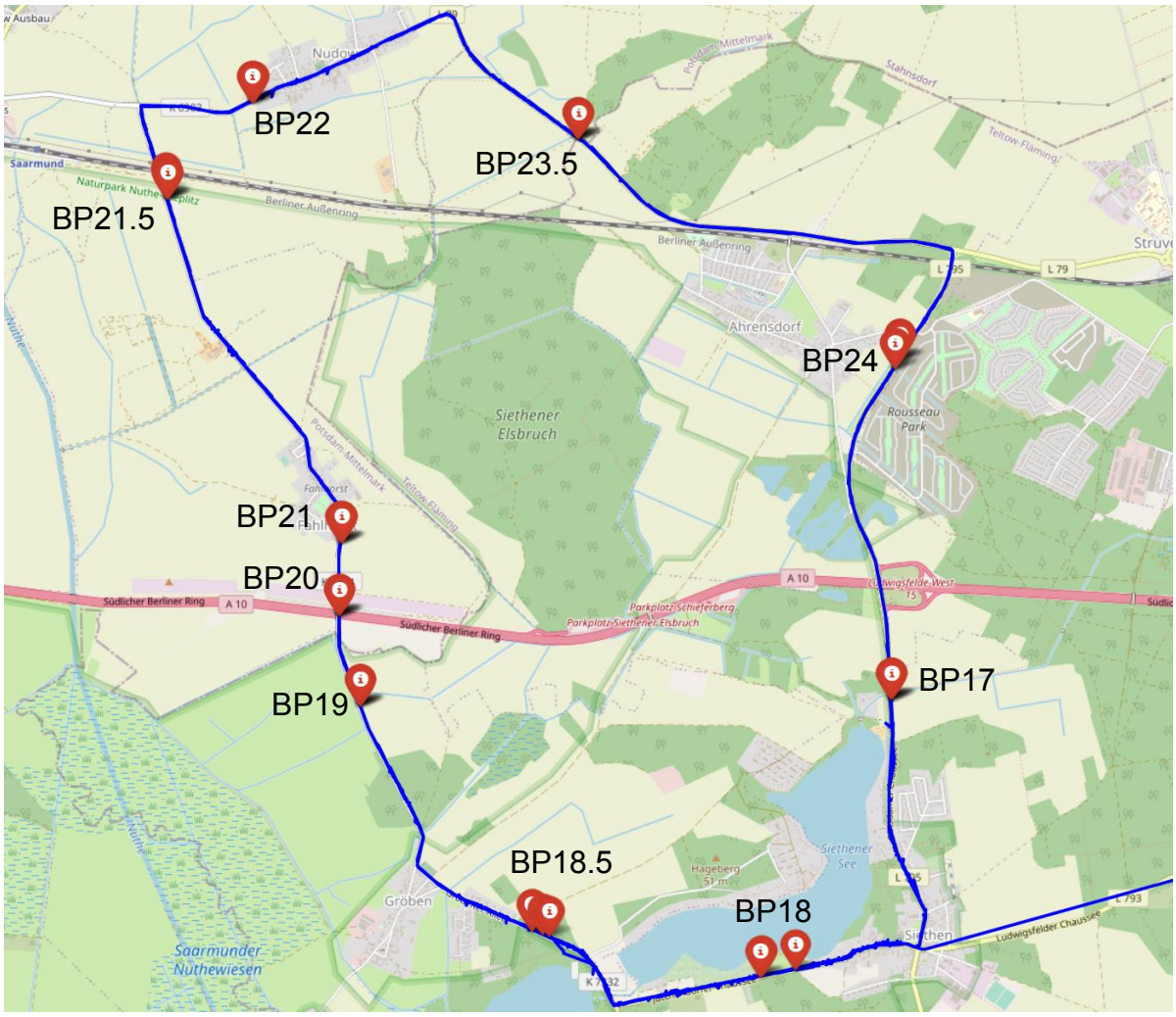

Abbildung 18: Messstrecke für die Versuchsdurchführung im Straßenverkehr, die einzelnen Bremspunktbereiche sind rot markiert, © OpenStreetMap

Im nächsten Schritt der Erprobung des Versuchs-Lkws werden Reibwertpotenzial-Messungen mit dem vollständigen Sattelzug, bestehend aus Zugmaschine und Auflieger, durchgeführt. Die Versuchsdurchführung erfolgt auf der Langstreckenanbindung des DEKRA-Testgeländes am Lausitzring. Dabei wird ein Dreiachs-Sattelanhänger des Herstellers Schmitz Cargobull mit einem Kofferaufbau aus dem Baujahr 2019 eingesetzt, vgl. **Abbildung 19**. Die Bereifung des Trailers umfasst sechs Reifen der Dimension 385/65 R22.5 von Goodyear. Auf dem Streckenabschnitt werden die in **Abbildung 20** dargestellten drei Bremspunkte definiert. Dabei wird Bremspunkt 1 (BP1) ausschließlich bei der von Osten nach Westen kommenden Durchfahrt berücksichtigt und Bremspunkt 2 bei der Durchfahrt von Westen nach Osten. Somit wird für das Anfahren aller Bremspunkte ein möglichst langer Beschleunigungsweg ermöglicht und gleichzeitig gewährleistet, dass alle Bremspunkte bei Geradeausfahrt erreichbar sind und somit keine Lenkeingriffe während der Bremsung erfolgen. Die Straßenoberfläche der Langstreckenanbindung ist asphaltiert, wobei allerdings zu beachten ist, dass sich der Asphalt von BP1 und BP2 gegenüber der Oberfläche von BP3 optisch unterscheidet. Genauere Untersuchungen des Asphalts sind nicht erfolgt.

Abbildung 19: Erste Reibwertpotenzial-Messungen mit dem unbeladenen Sattelzug

Abbildung 20: Langstreckenanbindung DEKRA-Testgelände am Lausitzring mit den Bremspunkten 1-3, © OpenStreetMap

Die ersten Vergleichsmessungen auf der Langstreckenanbindung erfolgen mit einem unbeladenen Trailer. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das nutzbare Reibwertpotenzial vom Sattelzug grundsätzlich deutlich geringer ist als beim Vergleichs-Pkw. Trotz möglichst identischer Versuchsdurchführungen weisen die Ergebnisse von Reibwertpotenzialmessungen immer gewisse Streuungen auf. Dieser Sachverhalt ist sowohl aus dem Projekt „Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen“ (Müller et al., 2017; Müller et al., 2019) als auch aus entsprechender Literatur bekannt (Bachmann, 1998; Lajewski et al., 2016; Lex, 2015; Mitschke & Wallentowitz, 2014). Die ersten Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass diese Streuung beim Sattelzug größer ausfällt als beim Vergleichs-Pkw. Insgesamt sind die Bremsversuche mit dem Sattelzug sehr sicher und reproduzierbar durchzuführen. Der Lkw zeigt dabei stets ein sehr vorhersehbares Bremsverhalten. Besonders bei

Ausgangsgeschwindigkeiten von 60 km/h können reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Um Ausgangsgeschwindigkeiten von 80 km/h zu erreichen sind entsprechend lange Beschleunigungswege einzuplanen. Die nächste Versuchskampagne erfolgt auf der ABS-Strecke des DEKRA- Testgeländes am Lausitzring und dient der Untersuchung des nutzbaren maximalen Kraftschlusses bei verschiedenen definierten Oberflächengegebenheiten. Für diese Versuchsreihe werden die vier bewässerten Oberflächen Asphalt, Kunststoff, Beton und polierter Basalt berücksichtigt. Der polierte Basalt konnte allerdings nicht mit dem Lkw befahren werden. Alle weiteren Messungen werden mit Ausgangsgeschwindigkeiten von 30 km/h durchgeführt. Der Auflieger des Sattelzugs ist bei dieser Versuchsreihe unbeladen. Die in **Abbildung 21** dargestellten Versuchsergebnisse weisen eine hohe Reproduzierbarkeit auf. Es gilt allerdings zu beachten, dass die Bewässerung der einzelnen Fahrbahnen nicht flächendeckend homogen erfolgt, sodass der Wasserfilm an den unterschiedlichen Messpunkten geringfügig variiert. Besonders bei der Asphalt-Fahrbahn wird eine sehr einseitige Bewässerung festgestellt, sodass die Gegebenheiten auf dieser Oberfläche eher als ein µ-Split Zustand zu interpretieren sind. In **Abbildung 22** ist dieser Sachverhalt gut zu erkennen, wobei die Fahrspur zwischen der Bewässerungsanlage und der weißen Kunststoffoberfläche die Asphalt-Fahrspur der ABS-Strecke darstellt.

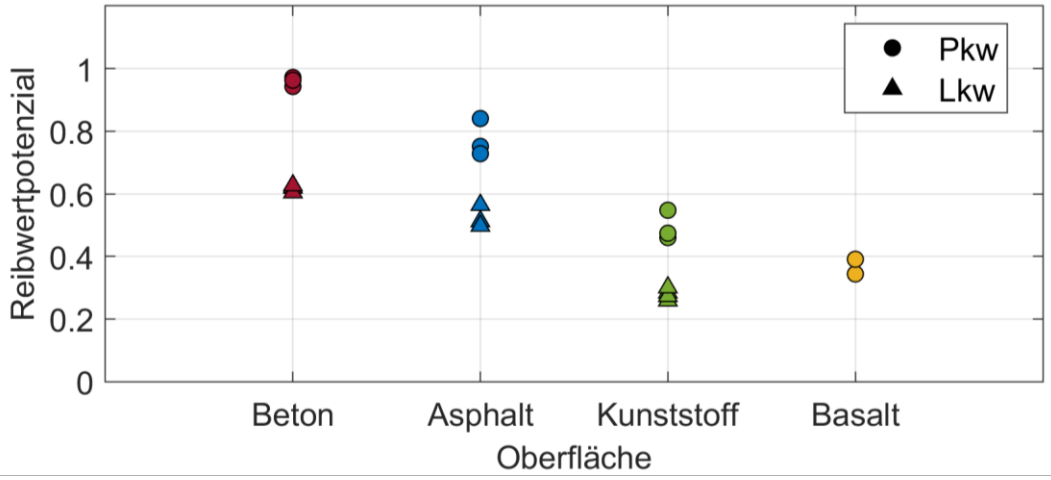

Abbildung 21: Reibwertpotenzialmessung auf der bewässerten ABS-Strecke in Klettwitz

Abbildung 22: Versuchsdurchführung auf der ABS-Strecke in Klettwitz

Die nächste Versuchsreihe dient der Untersuchung des Beladungseinflusses auf das maximal nutzbare Reibwertpotenzial des Sattelzugs. Auch diese Versuchsreihe wird auf der Langstreckenanbindung am Lausitzring durchgeführt, wobei die Messungen ebenfalls an den zuvor definierten Bremspunkten erfolgen, vgl. Abbildung 20. Zunächst werden dabei die drei verschiedenen Beladungszustände „leer“, „halbvoll“ und „voll“ definiert. Die einzelnen Beladungszustände werden durch eine Zuladung von verschiedenen Stahlgewichten erzielt, wobei für jeden Beladungszustand ein Achslast-Wäge-Protokoll aufgenommen wird, welches für Simulationen zur dynamischen Achslastverteilung herangezogen wird, vgl. Abs. 4.2. Der leere Sattelzug weist demnach ein Gesamtgewicht von 15,30 t auf, der halbvoll beladene Sattelzug hat ein Gesamtgewicht von 27,53 t und der voll beladene Sattelzug wiegt insgesamt 39,65 t. Für jeden Beladungszustand erfolgen die Reibwertpotenzialmessungen mit den Ausgangsgeschwindigkeiten von 30, 60 und 80 km/h. Die gesamte Versuchsdurchführung erfolgt an einem Tag mit konstant bleibenden, trockenen Umgebungsbedingungen, wodurch eine sehr hohe Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Messreihen gegeben ist. Die in **Abbildung 23** links dargestellten Versuchsergebnisse sind zum einen über der Zeit aufgetragen und veranschaulichen die einzelnen Messreihen mit den unterschiedlichen Beladungszuständen. Die erste Messreihe umfasst den vollen Beladungszustand, dann wird die Messung mit halbvollem und anschließend mit leerem Sattelzug durchgeführt. Während der Lkw für den nächsten Beladungszustand vorbereitet wird erfolgt die Durchführung der Pkw-Vergleichsmessungen. Die Pkw-Vergleichsmessungen verdeutlichen die über den gesamten Tag konstanten Umgebungsbedingungen. Die Darstellung rechts in Abbildung 23 veranschaulicht den Einfluss der Ausgangsgeschwindigkeit auf das nutzbare Reibwertpotenzial. **Abbildung 44** im Anhang zeigt eine Darstellung der Versuchsergebnisse mit zusätzlicher Berücksichtigung der jeweiligen Bremspunkte.

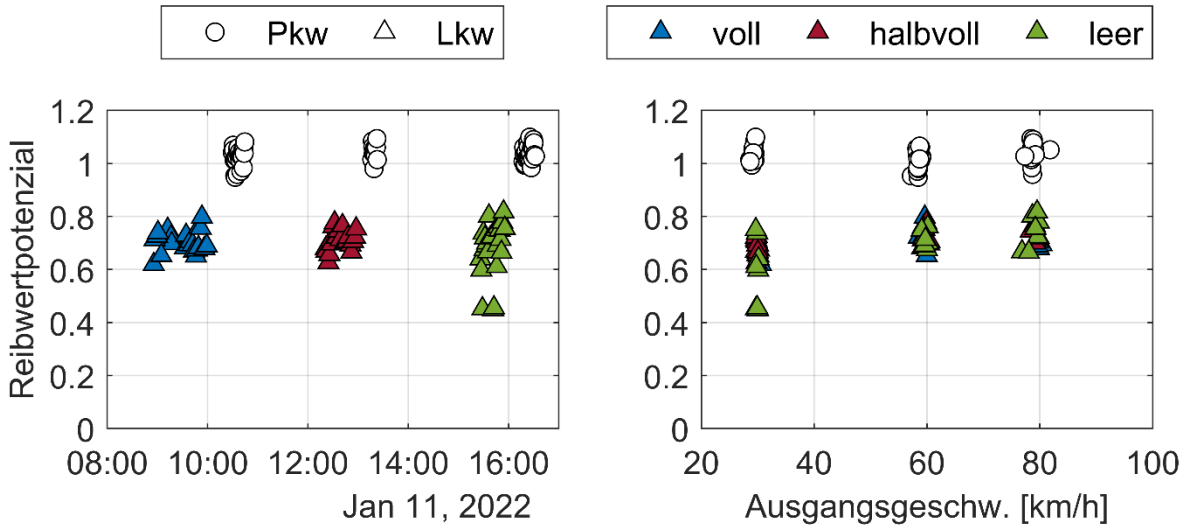

Abbildung 23: Beladungsversuche auf der Langstreckenanbindung (11.01.22 Klettwitz)

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen dem maximal nutzbaren Reibwertpotenzial bei vollen und halbvollen Beladungszustand, vgl. Abbildung 44. Im Gegensatz dazu weisen die gemessenen Reibwertpotenziale mit leerem Beladungszustand eine deutlich größere Streuung auf.

Besonders auffällig sind dabei die drei Messungen mit einer sehr geringen Reibwertpotenzialausnutzung. Diese Messungen erfolgten alle bei Ausgangsgeschwindigkeiten von 30 km/h an BP2 und BP3. In diesem speziellen Szenario wird ersichtlich, dass das Lkw-ABS aufgrund der hohen Trägheit der Räder und der geringen Achslasten erhebliche Probleme hat, die Blockierneigung eines Rades rechtzeitig zu unterbinden. **Abbildung 24** zeigt die Radgeschwindigkeiten der Zugmaschine für eine derartige Bremsung, wobei die Blockierneigung der einzelnen Räder gut zu erkennen ist. Die Kommunikation zwischen Zugfahrzeug und Auflieger wurde zu diesem Zeitpunkt noch nicht mit aufgezeichnet, sodass an dieser Stelle keine genauere Analyse der Radgeschwindigkeiten des Aufliegers erfolgt.

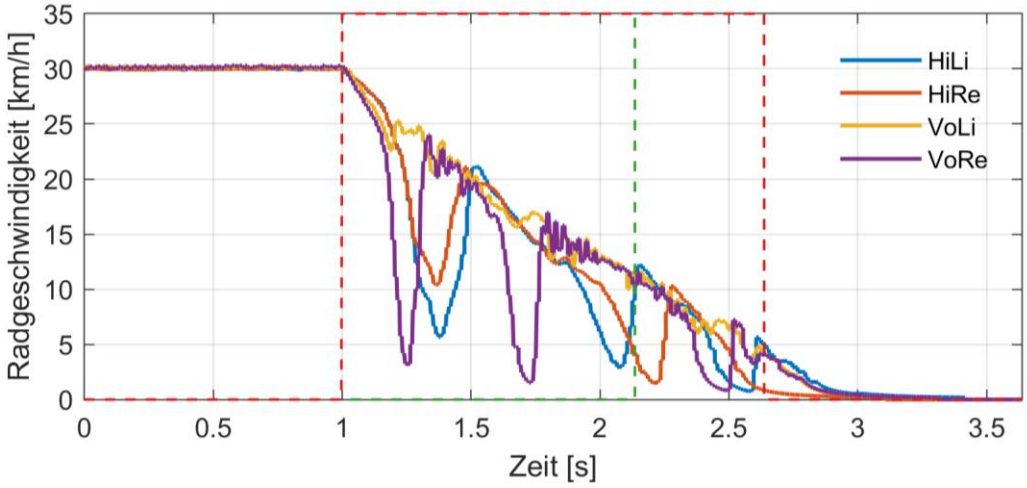

Abbildung 24: Radgeschwindigkeit des Zugfahrzeugs eines unbeladenen Sattelzugs

Der bei den zuvor beschriebenen Versuchen eingesetzte Auflieger steht für die weitere Versuchsdurchführung nicht zur Verfügung, sodass ein weiterer Auflieger für die Versuchsreihen zum Aufbau einer Lkw-Reibwertdatenbank eingesetzt wird. Bei diesem Auflieger handelt es sich um ein Modell vom Typ SD des Herstellers Krone aus dem Baujahr 2007, vgl. **Abbildung 25**. Die Räder dieses Aufliegers sind allerdings mit fünf verschiedenen Reifenmodellen ausgestattet, vgl. **Tabelle 1**. Dieser Zustand bildet einen durchschnittlichen in der Praxis eingesetzten Lkw gut ab, da häufig verschiedene Reifentypen eingesetzt werden, sobald ein einzelner Reifen ausgetauscht werden muss. Da die in diesem Projekt berücksichtigte Methode der Reibwertpotenzialschätzung immer für eine bestimmte Fahrzeugkonfiguration anwendbar ist (vgl. Abs. 5.1), kann diese Fahrzeugkonfiguration für die Ziele des Projekts eingesetzt werden kann.

Abbildung 25: Krone-Auflieger für die weitere Versuchsdurchführung

Tabelle 1: Bereifung Krone Auflieger

	Links	Rechts
Vorne	Michelin X Line Energy	Goodyear KMAX T HL
Mitte	Michelin X Line Energy	Firestone FT522
Hinten	Bison Ecoway AZ170	Bison Ecoway AZ170

Um einen Vergleich mit dem zuvor genutzten Schmitz Cargobull Auflieger herstellen zu können werden mit dem Krone-Auflieger ebenfalls Reibwertpotenzial-Messungen auf der Langstreckenanbindung am Lausitzring durchgeführt. Für die weitere Versuchsdurchführung wird ein halbvoll beladener Sattelzug berücksichtigt, da dieser Zustand sehr ähnliche Ergebnisse wie der voll beladene Sattelzug liefert, vgl. Abbildung 23. Da Leerfahrten von Logistikunternehmen nach Möglichkeit vermieden werden bildet der halbvoll beladene Sattelzug somit den durchschnittlichen Sattelzug für den Umfang dieses Projekts sehr gut ab. Für die Versuchsdurchführung im Straßenverkehr ist das im Vergleich zum voll beladenen Fahrzeug deutlich geringere Gesamtgewicht zudem von entscheidendem Vorteil, da der Sattelzug somit deutlich agiler ist und die gewünschten Ausgangsgeschwindigkeiten schneller erreicht werden. Die Vergleichsmessungen mit dem Krone-Auflieger werden demzufolge ebenfalls mit einem halbvollen Beladungszustand durchgeführt und mit den in Abbildung 23 gezeigten Ergebnissen der Beladungsversuche mit dem Schmitz Cargobull Auflieger verglichen. Insgesamt werden dabei weitestgehend vergleichbare Ergebnisse erzielt, vgl. **Abbildung 26**. Die Messergebnisse mit dem Krone Auflieger sind in Abbildung 26 für die einzelnen Bremspunkte jeweils rechts und die mit dem Schmitz Cargobull Auflieger jeweils links dargestellt. Die Messergebnisse des Krone Aufliegers weisen im Durchschnitt etwas geringere Reibwertpotenziale und eine größere Streuung auf. Eine Darstellung der insgesamt ca. 12 t schweren Stahl-Gewichte und der entsprechenden Ladungssicherung mit Anti-Rutsch-Matten und Spanngurten im Krone Auflieger ist **Abbildung 27** zu entnehmen.

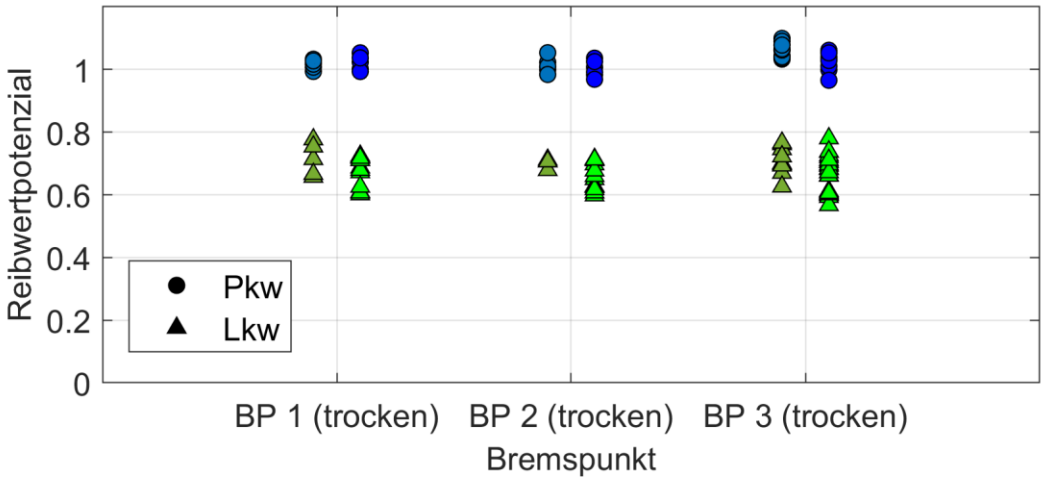

Abbildung 26: Vergleichsmessung Auflieger Schmitz Cargobull (links) Krone Auflieger (rechts) bei halbvollem Beladungszustand

Abbildung 27: Halbvoller Beladungszustand des Krone Aufliegers

4.3 Aufbau einer Lkw-Reibwertdatenbank

Für die in diesem Projekt berücksichtigte ursachenbasierte Methode zur Reibwertpotenzialschätzung ist es unabdingbar auf eine Datenbank mit hinreichend vielen Reibwertpotenzialmessungen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen zurückgreifen zu können. Für den Versuchs-Pkw wird dabei die im Rahmen des DFG-Projekts „Reibwertparameter basierte Reibwertpotenzialschätzung“ am FG Kraftfahrzeuge der TU Berlin entstandene Reibwertdatenbank genutzt. Für einen Zeitraum von 15 Monaten umfassen die einzelnen Messkampagnen dieser Reibwertdatenbank 1.854 gültige Reibwertpotenzialmessungen auf den Straßenoberflächen Asphalt, Beton und Kopfsteinpflaster für die Zwischenschichtzustände trocken, feucht, nass und verschneit/vereist sowie die Berücksichtigung verschiedener Ausgangsgeschwindigkeiten. Eine Boxplot-Darstellung der daraus resultierenden unterschiedlichen Reibwertpotenzial-Klassen ist

Abbildung 28 zu entnehmen. Die Box beschreibt dabei den Bereich zwischen dem oberen und unteren Quartil der Daten und umfasst eine rote Linie für den Medianwert. Die sogenannten Wiskers erstrecken sich von der Box und stellen das Minimum und Maximum der Daten dar, wobei Ausreißer ausgenommen sind und mit kreisförmigen Markern separat dargestellt werden. Im Rahmen dieses Projekts wird eine Messkampagne durchgeführt, welche regelmäßige Reibwertpotenzialmessungen mit dem Versuchs-Lkw umfasst, wodurch eine äquivalente Reibwertpotenzialdatenbank für dieses Fahrzeug entsteht. Diese Messkampagne wird im Straßenverkehr auf der in Abbildung 18 dargestellten Messstrecke durchgeführt, welche die Bremspunkte 17 bis 24 der Messstecke der Vorgänger-Projekts „Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen“ und „Reibwertparameter basierte Reibwertpotenzialschätzung“ umfasst (Müller et al., 2017; Müller et al., 2019). Zum besseren Vergleich der Reibwertpotenzialausnutzung des Lkw und um konkretere Rückschlüsse zur Übertragbarkeit des entwickelten Verfahrens vom Pkw auf den Lkw ziehen zu können, erfolgen alle Reibwertpotenzialmessungen parallel mit dem Lkw und Pkw. Die Messungen für den Aufbau der resultierenden Reibwertdatenbank erfolgt über den Zeitraum von ca. einem Jahr, um die verschiedenen Umgebungsbedingungen eines Jahres zu berücksichtigen. Eine Darstellung dieser Reibwertdatenbank für Lkw und Pkw ist **Abbildung 29** zu entnehmen.

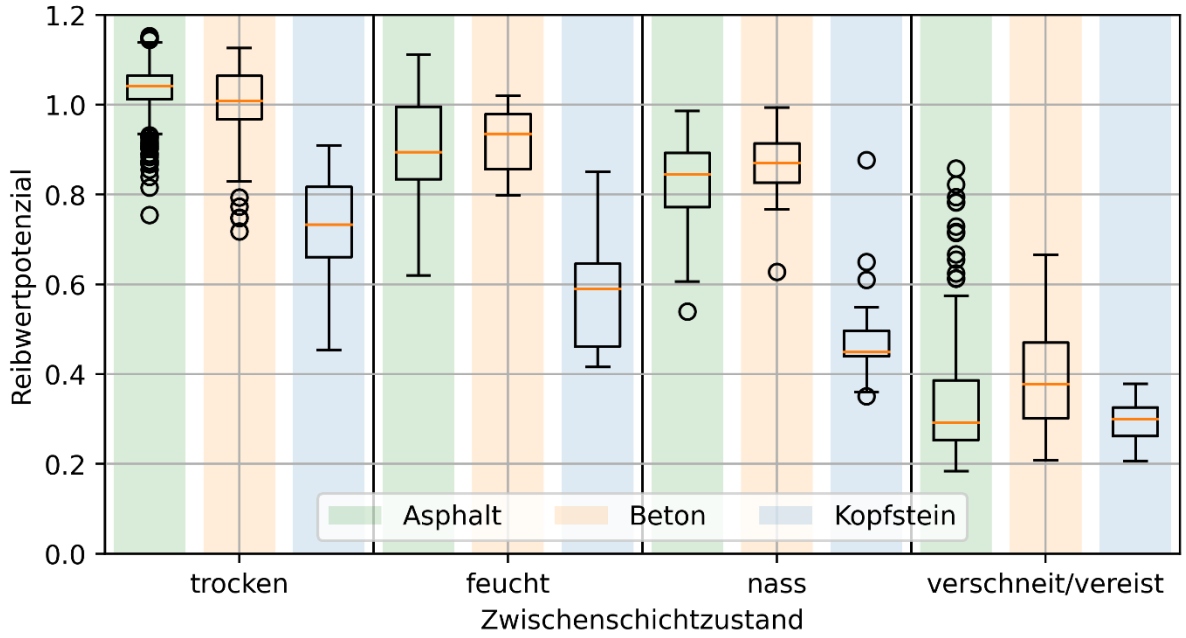

Abbildung 28: Reibwertpotenzial-Klassen des Versuchs-Pkws

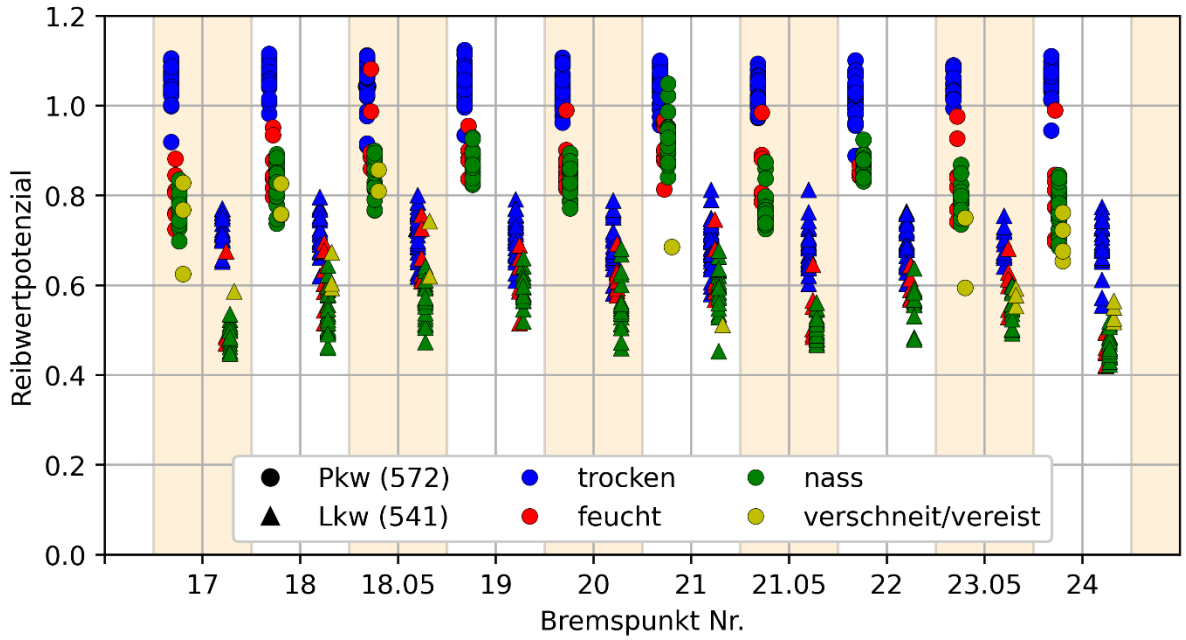

Abbildung 29: Reibwertpotenzialdatenbank für Lkw und Pkw; trocken (Lkw: 269, Pkw: 282), feucht (Lkw: 71, Pkw: 76), nass (Lkw: 187, Pkw: 199), verschneit/vereist (Lkw: 14, Pkw: 15)

Diese Reibwertdatenbank umfasst 541 Lkw-Messungen und 572 parallel durchgeführte Pkw-Messungen für die Zwischenschichtzustände trocken (Lkw: 269, Pkw: 282), feucht (Lkw: 71, Pkw: 76), nass (Lkw: 187, Pkw: 199) und verschneit/vereist (Lkw: 14, Pkw: 15). Die Durchführung der Pkw-Messung erfolgt dabei für jeden Bremspunkt immer unmittelbar im Anschluss an die Lkw-Messung, sodass von identischen Umgebungsbedingungen auszugehen ist und eine hohe Vergleichbarkeit gewährleistet wird. Insgesamt ist wie bei den in Abs. 4.2 beschriebenen Untersuchungen zu erkennen, dass die Reibwertpotenzialausnutzung des Lkws stets deutlich geringer ausfällt als die des Pkws. Der resultierende Offset ist weitestgehend konstant. Die vereinzelten Messungen beim Zwischenschichtzustand „verschneit/vereist“ sind an einem Tag entstanden, an dem an einzelnen Straßenabschnitten Blitzeis vorzufinden war. Insgesamt ist es allerdings für den Umfang dieses Projekts nicht vorgesehen ausführliche Untersuchungen bei verschneiter oder vereister Fahrbahn durchzuführen. Die Ergebnisse repräsentieren den Zwischenschichtzustand verschneit oder vereist aufgrund der geringen Datenlage somit nicht vollumfassend. Es zeigt sich allerdings, dass die Verschlechterung der Reibwertpotenzialausnutzung des Lkws bei den berücksichtigten Blitzeis Messungen geringer ausfällt als beim Pkw. **Abbildung 30** veranschaulicht die aus der in Abbildung 29 dargestellten Reibwertdatenbank resultierenden Reibwertpotenzial-Klassen auf asphaltierten Straßen für den Lkw und den Pkw.

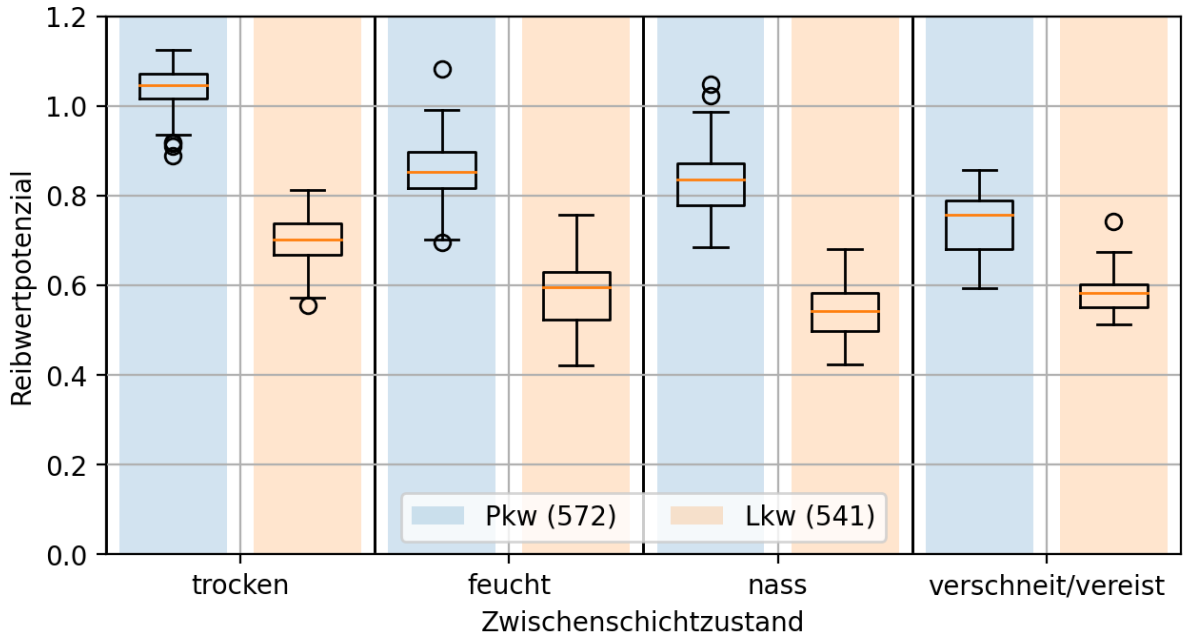

Abbildung 30: Boxplot Darstellung der Reibwertklassen auf asphaltierten Straßenoberflächen für den Versuchs-Pkw und -Lkw

4.4 Vergleich mit standardisierten Messverfahren

Die Fahrbahnbeschaffenheit beeinflusst den Reifen-Fahrbahn-Kontakt maßgeblich, wobei die Güte einer Fahrbahn hinsichtlich dessen Mikro- und Makrorauigkeit beurteilt wird. Die Mikrorauigkeit berücksichtigt Oberflächenelemente, die kleiner als 0,5 mm sind. Größere Oberflächenelemente werden im Rahmen der Makrorauigkeit betrachtet. Verschiedene standardisierte Messverfahren zielen darauf ab, Fahrbahnoberflächen in Bezug auf dessen Mikro- und Makrorauigkeit über Parameter wie der mittleren Rautiefe oder der Profilkuppendichte zu charakterisieren. (B. Breuer & Bill, 2012a)

Zur besseren Einordnung der Reibwertpotenzialausnutzung der Versuchs-Fahrzeuge werden die gemessenen Reibwertpotenziale mit den Messergebnissen verschiedener standardisierter Verfahren verglichen. Die Messdaten dieser standardisierten Messverfahren wurden im Rahmen des FAT-Projekts erhoben, wobei mitunter die im Rahmen dieses Projekts genutzte Messstrecke (vgl. Abbildung 18) vermessen wurde. Im Rahmen dieser Analyse wird das Seitenkraftmessverfahren (SKM-Verfahren), der Skid Resistance Tester (SRT), der ASFT T2GO, der Grip Tester (GT) und der Portable Friction Tester (PFT) berücksichtigt, vgl. **Abbildung 31**.

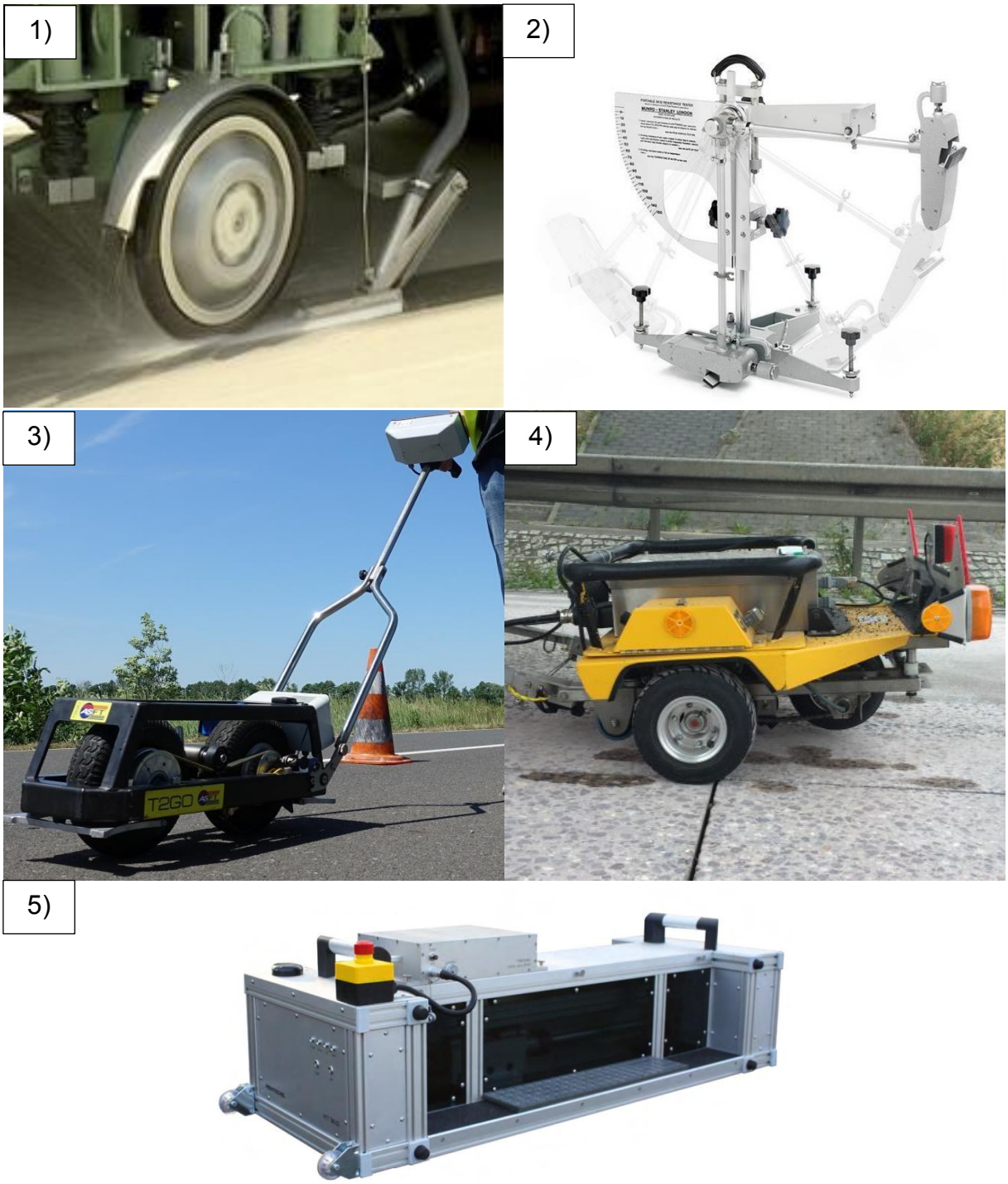

Abbildung 31: Übersicht der untersuchten standardisierten Messverfahren: 1) SKM (Cadera et al., 2022), 2) SRT (Sreening Eagle), 3) T2GO, 4) Grip Tester, 5) PFT (Wangenheim et al., 2016)

Das SKM-Verfahren basiert auf dem Verfahren der britischen Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine (SCRIM) und umfasst spezifische Modifikationen für den Einsatz in Deutschland. Gemessen wird sowohl die Mikro- als auch die Makrorauigkeit einer Oberfläche. Dabei wird ein schräg gestelltes Messrad mit einem profillosen schmalen Gummireifen mit den Dimensionen eines Motorradreifens mit einer definierten Radlast von 1,96 kN unter einem

Schräglaufwinkel von 20° abgerollt, wobei Fahrgeschwindigkeiten von 40, 60 und 80 km/h (Stadt, Land und Autobahn) berücksichtigt werden. Die Fahrbahn wird bei der Messung mit einem 0,5 mm dicken Wasserfilm benetzt. Der resultierende Seitenkraftbeiwert zur Bewertung der Fahrbahnoberflächengriffigkeit ergibt sich als Quotient der gemessenen Seitenführungskraft und der Normalkraft. Die BASt beauftragt regelmäßige SKM-Messungen zur Analyse der Fahrbahnbeschaffenheit von Autobahnen und wichtigen Bundesstraßen. (Minh-Tan Do, Peter G Roe, 2008)

Der Skid Resistance Tester (SRT) ist ein stationäres Pendelmessgerät. Das SRT-Verfahren ist nach DIN EN 13036-4 genormt und dient der Messung der Mikrorauigkeit von kleinflächigen Bereichen. Dabei wird das Pendelgerät auf der zu vermessenden Oberfläche aufgebaut und der Pendelfuß, auf dessen Unterseite ein federbelasteter Gleitkörper montiert ist, wird in einem definierten Abstand zur Oberfläche fallen gelassen, sodass dieser mit einer definierten Anfangsgeschwindigkeit über die Oberfläche reibt. Der dabei gemessene SRT-Wert ist dimensionslos und dient dem Vergleich verschiedener Oberflächenqualitäten, wobei überwiegend die Mikrorauigkeit berücksichtigt wird. (B. Breuer & Bill, 2012b; Minh-Tan Do, Peter G Roe, 2008)

Der vom Hersteller ASFT entwickelte T2GO ist ein portabler Handmesswagen, welcher beispielsweise bei Unfalluntersuchungen der Polizei oder Vermessungen von Gehwegen oder Kreisverkehren eingesetzt wird. Es handelt sich um ein kontinuierliches Längskraftmessverfahren, wobei das Messrad bei einer konstanten Geschwindigkeit von 5 km/h mit einem Längsschlupf von 20 % geführt wird. Ein weiteres Referenzrad ist über einen Zahnriemen mit dem Messrad verbunden. Durch eine verschiedene Anzahl an Zahnrädern wird der Schlupf am Messrad erzeugt. Dieser Schlupf erzeugt beim Schieben des Messwagens wiederum eine Spannung am Riemen, welche mit einem Lastsensor gemessen wird und proportional zur Längskraft und damit zum gemessenen Reibwert ist. Das Messverfahren kann sowohl auf trockenen als auch bewässerten Fahrbahnen angewendet werden. (ASFT, 2015; SARSYS-ASFT)

Der Grip Tester MK2 vom Hersteller Findlay Irvine Ltd. ist ein Anhänger mit zwei Laufrädern und einem Messrad, mit den Raddimensionen eines Go-Kart-Reifens. Mittels eines mechanischen Zahnrad- und Kettensystems wird das Messrad mit einem konstanten Längsschlupf von 15 % betrieben. Die Messung erfolgt bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit, wobei das Messrad unter konstanter vertikaler Belastung über eine kontrolliert bewässerte Fahrbahnoberfläche gezogen oder geschoben wird und die resultierende Längskraft gemessen wird. (Minh-Tan Do, Peter G Roe, 2008)

Der Portable Friction Tester (PFT) der Hentschel System GmbH wird zur Messung von Gleitreibungen mit Laufflächenproben eingesetzt. Das Messgerät umfasst ein lineares Führungssystem mit einer 650 mm langen Traverse und ermöglicht Gleitgeschwindigkeiten von 0,1 bis 2 m/s, wodurch typischen Bedingungen für eine ABS-Bremsung bei Ausgangsgeschwindigkeiten von bis zu 100 km/h und einem Bremsschlupfbereich von weniger als 10-5 % abgebildet werden können. Während einer Messung werden die Kräfte in alle 3-Achsen gemessen. Der Testkörper kann mit einer Flächenpressung von 2 bis 3,5 bar beaufschlagt werden. Der Hersteller

verspricht eine hohe Übereinstimmung mit den Bedingungen während ABS-Bremsungen. (Hentschel System GmbH, 2018; Wangenheim et al., 2016)

Aus der Literatur ist insgesamt bekannt, dass die mittels standardisierter Messverfahren gemessenen Rauigkeitsparameter bei ABS-nass Bremsungen nur eingeschränkte Korrelationen mit dem tatsächlichen Reibwert am Reifen aufweisen (B. Breuer & Bill, 2012a). Die in **Abbildung 32** dargestellten Ergebnisse aller untersuchten standardisierten Messverfahren und der in diesem Projekt ermittelten Reibwertpotenzialausnutzung der Versuchs-Fahrzeuge bei trockener und nasser Fahrbahn in Form von Boxplots verdeutlichen diesen Sachverhalt. Es ist zu erkenne, dass die Ergebnisse der bei bewässerten Fahrbahnen durchgeführten kontinuierlichen Messungen des SKM-Verfahrens und des Grip Testers eine relativ gute Korrelation mit den gemessenen Reibwertpotenzialausnutzungen des Versuchs-Lkw bei nasser Fahrbahn zeigen. **Abbildung 33** zeigt einen Vergleich zwischen den Ergebnissen dieser beiden Verfahren mit den gemessenen Reibwertpotenzialausnutzungen des Lkw und des Pkw auf nasser Fahrbahn. Dabei ist gut zu erkennen, dass die absoluten Messwerte beider Verfahren im Wesentlichen zwischen den gemessenen Werten des Pkws und Lkws liegen, die Tendenz des maximalen Reibwertpotenzials zwischen den einzelnen Bremspunkten allerdings sehr gut abgebildet wird. Die weiteren untersuchten Verfahren T2GO, PFT und SRT weisen keine derartigen Übereinstimmungen mit den gemessenen Reibwertpotenzialausnutzungen der Versuchsfahrzeuge auf.

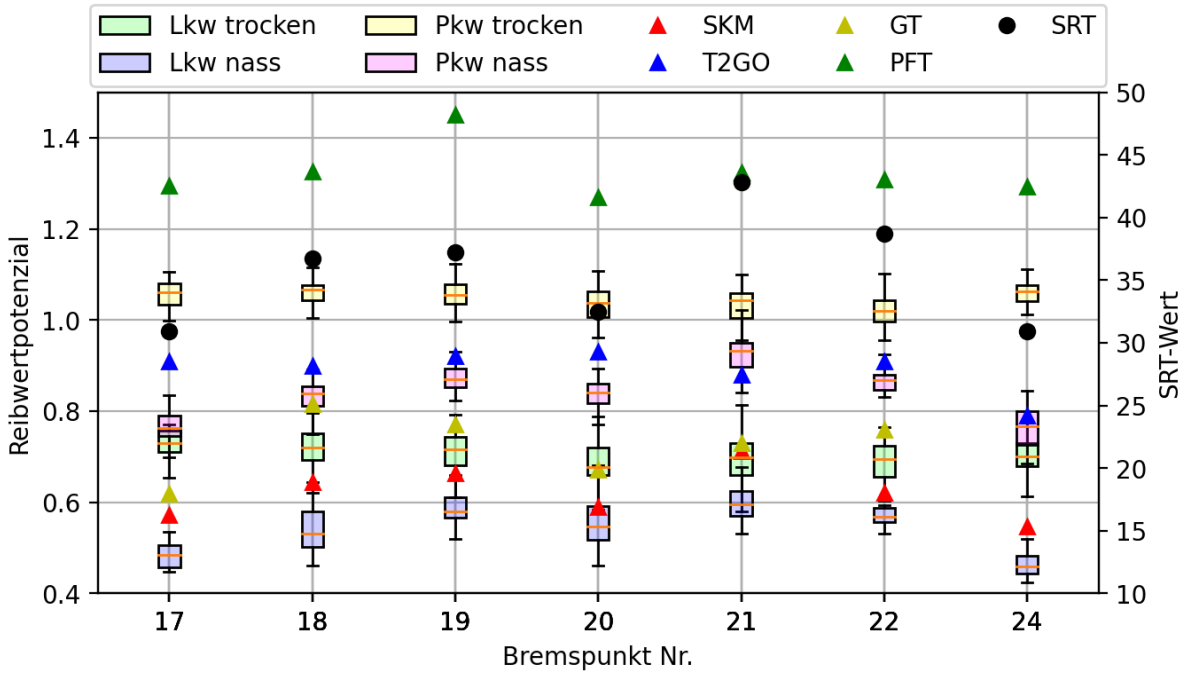

Abbildung 32: Vergleich zwischen den Ergebnissen standardisierter Messverfahren und der gemessenen Reibwertpotenzialausnutzung der Versuchs-Fahrzeuge bei trockener und nasser Fahrbahn

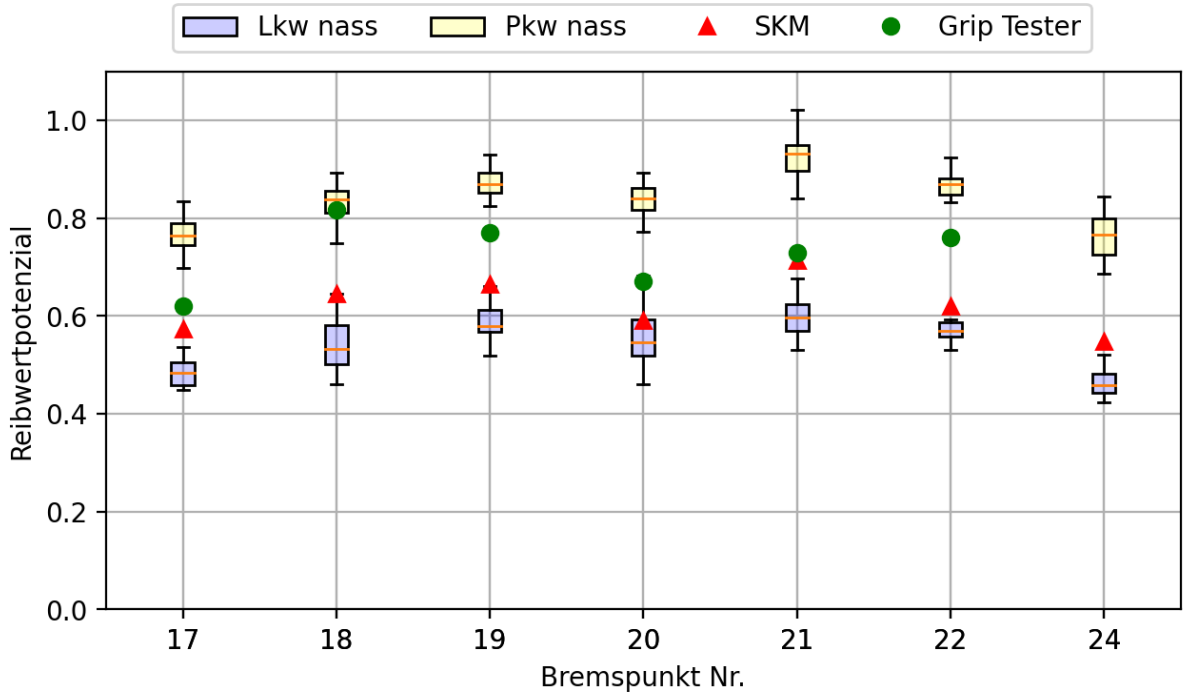

Abbildung 33: Vergleich zwischen den Messergebnissen des SKM-Verfahrens und des Grip Testers mit der gemessenen Reibwertpotenzialausnutzung der Versuchs-Fahrzeuge auf nasser Fahrbahn

Die hohe Korrelation des SKM-Verfahrens mit den Nass-Messungen beider Fahrzeuge ist besonders interessant, da dabei die spezifischen Eigenschaften einzelner Straße abgebildet werden können. Die Tatsache, dass eine Vielzahl von Straßen bereits mit diesem Verfahren vermessen wurden und regelmäßig vermessen werden, eröffnet die Möglichkeit, dass im Folgenden dargelegten Schätzverfahren durch eine zusätzliche Berücksichtigung von SKM-Daten hinsichtlich der Prädiktion von Reibwerten bei nassen Fahrbahnen zu verbessern, indem die jeweiligen Straßeneigenschaften mitberücksichtigt werden. Die Daten dieser SKM-Messungen könnten dabei beispielsweise in digitalen Karten für die entsprechenden Straßenabschnitte hinterlegt werden und für ursachenbasierte Reibwertpotenzialschätzverfahren, wie dem in Kapitel 5 beschriebenen Verfahren, berücksichtigt werden, um eine Steigerung der Schätzgenauigkeit zu bewirken.

5 Reibwertpotenzialschätzung

Im Rahmen dieses Projekts wird ein ursachenbasiertes Verfahren zur Reibwertpotenzialschätzung entwickelt, wobei die Haupteinflussfaktoren der Zwischenschicht, Straßenoberfläche, Reifenart und Fahrzeugdynamik eines jeweiligen Fahrzeugs berücksichtigt werden. Dieses Verfahren setzt sich im Wesentlichen aus einer fahrzeugunabhängigen Zwischenschichtschätzung und einer anschließenden fahrzeugindividuellen Reibwertpotenzialschätzung zusammen. Die Schätzung des Zwischenschichtzustands erfolgt durch eine geeignete Auswertung verschiedener Wetterdaten. Für den ermittelten Zwischenschichtzustand wird dann mittels der Kenntnis über die vorliegende Straßenoberfläche und die eingesetzte Reifenart anhand von entsprechenden Messdaten zur maximal möglichen Reibwertpotenzialausnutzung (Reibwertdatenbank) das jeweils nutzbare Reibwertpotenzial geschätzt. Das übergreifende Ziel besteht darin, ein Verfahren zu entwickeln, welches die Erstellung einer von der Fahrzeugposition unabhängigen Reibwertkarte ermöglicht und für verschiedene Fahrzeugtypen und Fahrzeugklassen adaptiert werden kann.

5.1 Methoden zur Zwischenschichtschätzung

Eine zuverlässige Bestimmung der Zwischenschicht zwischen Reifen und Fahrbahn (trocken, feucht, nass, verschneit/vereist) ist die größte Herausforderung in der gesamten Kette der ursachenbasierten Reibwertpotenzialschätzung. Hinsichtlich der Anforderung, eine großflächige Reibwertkarte erstellen zu können, muss es dabei ermöglicht werden, die Zwischenschicht unabhängig von der aktuellen Fahrzeugposition bestimmen zu können. Dabei soll die jeweils vorliegende Zwischenschicht nicht mit Sensorik gemessen werden, sondern durch ein geeignetes Verfahren fahrzeugunabhängig geschätzt werden. Demzufolge wird ein Verfahren entwickelt, welches vollständig ohne am Fahrzeug gemessene Daten angewandt werden kann. Als Eingangsgrößen der Zwischenschichtschätzung werden ausschließlich Wetterparameter von externen, frei zugänglichen Quellen (Wetterstationen und Wetterradare) genutzt. Die einzelnen Wetterdaten werden in Abs. 5.2 genauer erläutert. Mit Methoden des maschinellen Lernens werden anschließend Modelle darauf trainiert, anhand der jeweiligen Eingangsgrößen den zugehörigen Zwischenschichtzustand bestimmen zu können. Als geeignete Klassifikationsverfahren zur Zwischenschichtschätzung haben sich die multinomiale logistische Regression und die Anwendung künstlicher neuronaler Netze herausgestellt, welche im Folgenden genauer beschrieben werden.

5.1.1 Multinomiale logistische Regression

Das auf der multinomialen logistischen Regression basierende Verfahren zur Zwischenschichtschätzung wurde im Rahmen des FAT-Projekts „Unfallvermeidung durch Reibwertprognose“ entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Dabei wird mittels der Funktionsgleichung der logistischen Regression nach **Gleichung (4)** für jede Eingangsgröße x die Eintrittswahrscheinlichkeit P für jeden Zwischenschichtzustand y berechnet. Die freien Parameter a,b und c werden dahingehend optimiert, dass der quadratische Fehler zwischen P und y minimiert wird. (Müller et al., 2017)

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

Eine funktionale Aussage zur Güte *G* der berechneten Wahrscheinlich wird anhand von **Gleichung (5)** getroffen. (Müller et al., 2017)

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

Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Zwischenschichtzustands in Abhängigkeit der Eingangsgrößen wird beurteilt, indem alle Einzeleintrittswahrscheinlichkeiten *P* mit ihrer jeweiligen Güte *G* nach **Gleichung (6)** gewichtet werden. Dabei entspricht *n* der Anzahl der berücksichtigten Eingangsgrößen. (Müller et al., 2017)

$$\overline{P_j} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_j\left(y_j(x_i)\right) \cdot G_j\left(y_j(x_i)\right)}{\sum_{i=1}^{n} G_j\left(y_j(x_i)\right)} \quad (6)$$

Der Zwischenschichtzustand y_j mit der höchsten berechneten Wahrscheinlichkeit *P* entspricht dem geschätzten Zwischenschichtzustand. Je größer dabei der Wert von $\overline{P}$ ist, desto verlässlicher ist das Ergebnis der Zwischenschichtschätzung. (Müller et al., 2017)

Bei der Anwendung der auf der multinomialen logistischen Regression basierenden Zwischenschichtschätzung hat es sich zudem als sinnvoll erwiesen, die Zwischenschichtschätzung in verschiedene Ebenen zu unterteilen. Dabei wird in einem ersten Schritt zunächst ausschließlich zwischen den Zuständen „trocken“ und „nicht trocken“ unterschieden, da bei dieser Unterscheidung eine besonders hohe Genauigkeit erzielt werden kann. In einem weiteren Schritt wird zwischen „feucht“ und „nass/verschneit“ differenziert und im letzten Schritt zwischen „nass“ und „verschneit“. Je nach Ebene werden dabei verschiedene Eingangsgrößen als sogenannte Stellhebel berücksichtigt. (Müller et al., 2017)

Der Hauptvorteil dieses Verfahrens ist die Transparenz, da sich für jede Schätzung relativ unkompliziert anhand der separat durchgeführten Regressionen zurückverfolgen lässt, wie das Verfahren zum jeweiligen Schätzergebnis kommt. Nachteilig ist die aufwendige Optimierung der zahlreichen freien Parameter für die einzelnen Regressionskurven sowie das gezielte Aufteilen in die verschiedenen Ebenen des gesamten Schätzverfahrens, was hauptsächlich auf einem gezielten Ausprobieren in Kombination mit bestimmten Erfahrungswerten basiert.

5.1.2 Künstliche Neuronale Netze

Künstliche neuronale Netze (KNN) sind nicht-lineare Methoden des maschinellen Lernens, wobei sich ein Netzwerk aus verschiedenen Neuronen zusammensetzt. Das mathematische Modell eines einzelnen Neurons wird in **Abbildung 34** links veranschaulicht. Die Einträge $x_0, \ldots, x_n$ sind die Merkmale des Merkmalsvektors *x*. Diese Merkmale werden mit den Gewichten *w* multipliziert und aufsummiert, wodurch sich die Funktion *h(x)* ergibt, vgl. **Gleichung (7)**. *h(x)* ist wiederrum der Eingangswert der Aktivierungsfunktion *g*. (Frochte, 2021)

$$h(x) = \sum_{i=0}^{n} w_i x_i \tag{7}$$

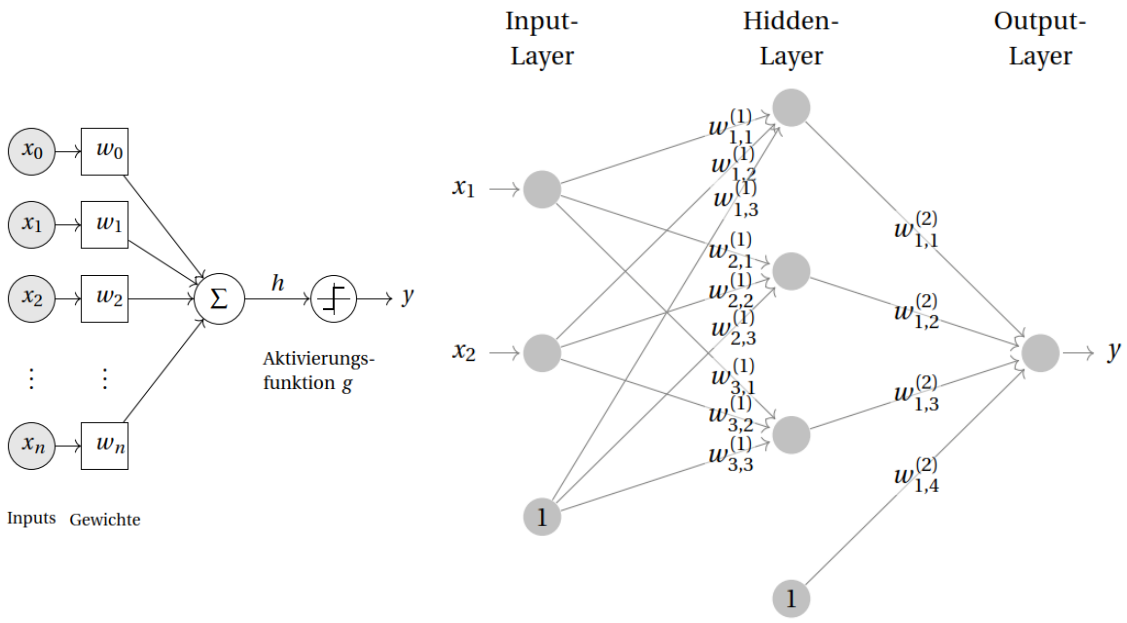

Abbildung 34: Mathematisches Modell eines Neurons (links) und KNN mit einem Hidden-Layer (rechts) (Frochte, 2021)

Ausgehend von der in Abbildung 34 links dargestellten einfachsten Form eines Neurons kann ein KNN über eine beliebig komplexe Architektur verfügen, welche sich prinzipiell durch eine Verkettung mehrerer Neuronen ergibt. Abbildung 34 rechts zeigt die Darstellung einer solchen vollständig verketteten Architektur mit einem Hidden-Layer. Ersichtlich ist, dass sich ein solches neuronales Netz in verschiedene Schichten (Layer) unterteilt, wobei die Komplexität von der Anzahl der Schichten und der Anzahl der Neuronen pro Schicht abhängt. Als Aktivierungsfunktion *g* können verschiedene nicht-lineare Funktionen genutzt werden. Für Klassifikationsaufgaben, wie beispielsweise eine Zwischenschichtschätzung, werden als Aktivierungsfunktion für die Hidden-Layer häufig die logistische Regression (Sigmoid-Funktion), der Rectifier (Rectified Linear Unit, kurz: ReLU) oder der Tangens hyperbolicus (tanh) eingesetzt (Brownlee, 2021). Im Anschluss an die Definition einer Netzwerkarchitektur kann ein KNN mit Hilfe eines entsprechenden Datensatzes und unter Anwendung bestimmter Trainingsalgorithmen trainiert werden, wobei im Wesentlichen eine Optimierung der einzelnen Gewichte hinsichtlich der Minimierung einer bestimmten Fehlermetrik erfolgt.

Sowohl in (Leschik, 2020) als auch in (Lajewski, 2021) werden vielversprechende Ergebnisse für ähnliche Zwischenschichtklassifikationsaufgaben mit künstlichen neuronalen Netzen gezeigt, wobei jeweils eine Genauigkeitssteigerung gegenüber der Anwendung der multinomialen logistischen Regression erzielt wird. Der Hauptvorteil von KNN ist, dass sich diese beliebig erweitern können und somit auch für hochkomplexe Anwendungen trainiert werden können. Dabei muss stets beachtet werden, dass eine Überanpassung (Overfitting) an den verwendeten Datensatz

vermieden wird. Dazu ist zum einen ein ausgewogener Datensatz entscheidend und zum anderen muss während des Trainings mit entsprechenden Methoden sichergestellt werden, dass das Ergebnis stets allgemeingültig anwendbar ist und nicht ausschließlich für den jeweiligen Trainingsdatensatz gilt. Der Hauptnachteil eines KNN ist, dass sich die Aussage, die mit einem trainierten Netz getroffen wird, mit steigender Netzwerkkomplexität immer aufwändiger nachzuvollziehen lässt.

5.2 Wetterdaten

Für die Zwischenschichtschätzung werden die Wetterdaten von Klimastationen, Glättemeldeanlagen und Wetterradaren berücksichtigt. In Deutschland ist der Deutsche Wetterdienst (DWD) für die Erfüllung meteorologischer Erfordernisse zuständig. Aktuell betreibt der DWD 464 aktive Klimastationen und stellt dabei folgende Messdaten in 10-minütigiger Auflösung kostenfrei zur Verfügung (DWD Climate Data Center [CDC], 2019):

- Lufttemperatur (in 5 cm und 2 m Höhe),
- Luftdruck auf Stationshöhe,
- der relativen Luftfeuchtigkeit (in 2 m Höhe),
- Taupunkttemperatur (in 2 m Höhe).

Zudem betreibt der DWD aktuell 1.658 aktive Glättemeldeanlagen (GMA), welche eine besondere Form von Wetterstationen darstellen (DWD, 2020b). Eine GMA erfasst die neben herkömmlichen Wetterparametern auch Informationen zum Straßenzustand der Straße an der sie installiert ist: (Valk & DWD)

- Umgebungstemperatur,
- Taupunkttemperatur,
- relative Luftfeuchtigkeit,
- Sichtweite,
- Windrichtung/-geschwindigkeit,
- Niederschlagsart/-höhe/-intensitätsklasse,
- Belagstemperatur,
- Untergrundtemperatur,
- Wasserfilmdicke/Wasserfilmdickenklasse,
- aktueller Straßenzustand (trocken, feucht, nass, Reif, Schnee, Eis).

Glättemeldeanlagen sind häufig an Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen zu finden und werden hauptsächlich von Winterdienstzentralen und Autobahnmeistereien zur Überwachung des Straßenzustands und zur Koordination von Streu- und Räumfahrzeugen genutzt (Manitta & DWD, 2020). Die GMA-Daten werden vom DWD mit einer Auflösung von 15 Minuten für einen Zeitraum von 48 Stunden kostenfrei zur

Verfügung gestellt (Schmitz, 2019; Valk, 2022; Valk & DWD). Private Messnetze, wie das der Firma Netatmo, verfügen im Vergleich zum DWD über ein deutlich dichteres Messnetz. **Abbildung 35** zeigt eine Darstellung der Standorte aller aktuell in Berlin und der Umgebung aktiven DWD-Klimastationen, Glättemeldeanlagen und Netatmo-Messstationen. Netatmo vertreibt entsprechende Messstationen für private Haushalte, wobei das Netatmo-Außenmodul folgende Wetterparameter misst:

- Lufttemperatur,
- Luftdruck,
- rel. Luftfeuchtigkeit.

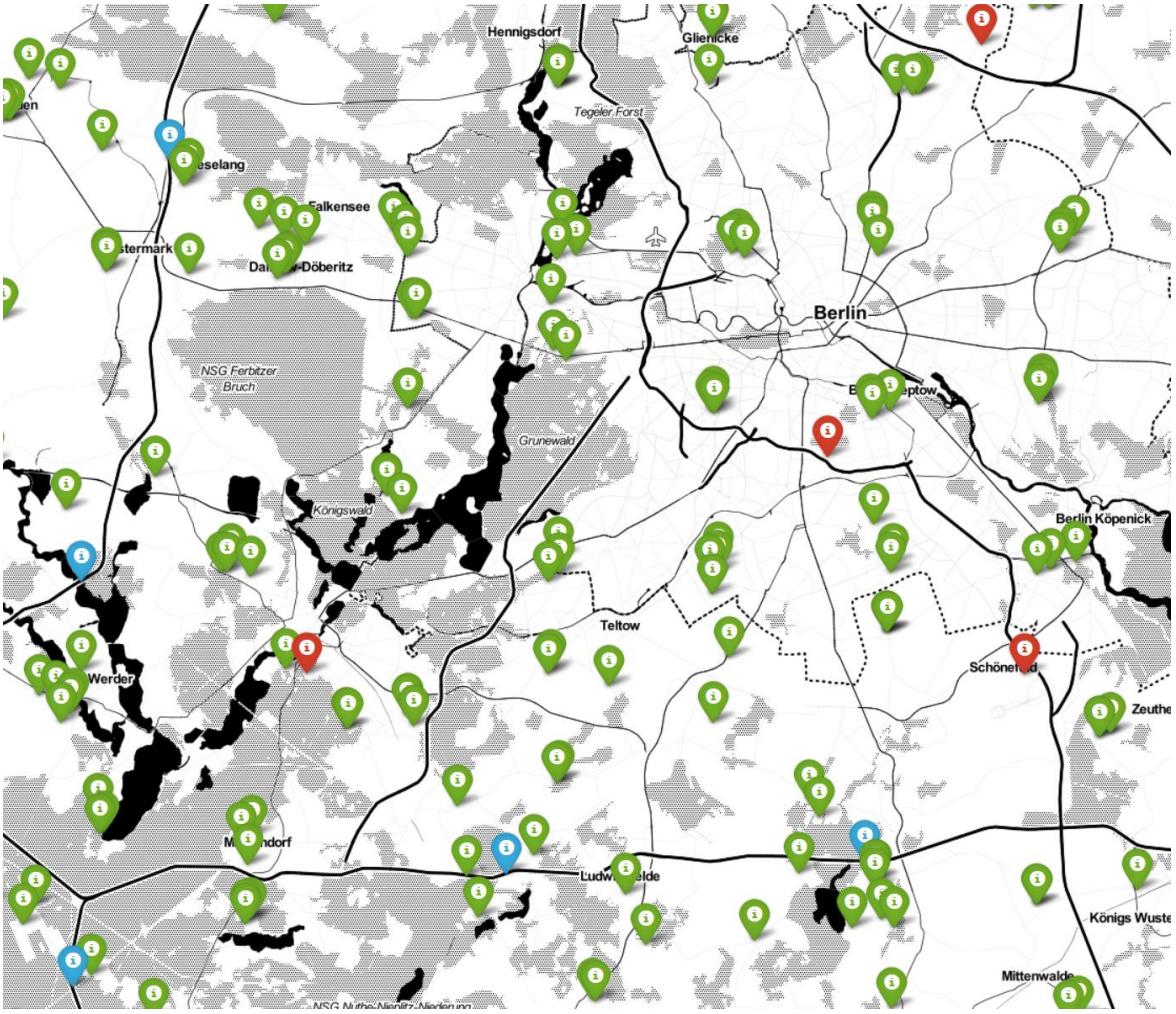

Abbildung 35: Aktive Messstationen im Umkreis von Berlin (Stand: 10.03.2023): DWD-Klimastationen (rot), GMA (blau), Netatmo (grün); © OpenStreetMap

Zudem sind Netatmo-Messstationen für den Innenbereich sowie ein Windsensor und ein Regensensor erhältlich. Über eine entsprechende API werden die gemessenen Daten der Messstationen automatisiert online zur Verfügung gestellt. Zudem können die aktuellen Messdaten aller Netatmo Nutzer weltweit anonymisiert über die API abgerufen werden. (mkshb.de; Robert Basic, 2020)

Im Rahmen der Atmosphärenbeobachtung wird vom DWD der in **Abbildung 36** dargestellte Verbund aus 17 verschiedenen operationellen Wetterradaren mit Dual-Pol-Doppler-Technik sowie ein zusätzliches Wetterradar zur Qualitätssicherung in Hohenpeißenberg und ein Ausfallsicherungsradar auf Borkum betrieben (DWD, 2022b, 2022c). Die Wetterradare ermöglichen es, flächendeckend dreidimensionale Niederschlagsinformationen zur Verfügung zu stellen. Für eine horizontale Reichweite von 150 km und einer vertikalen Berücksichtigung von bodennahen Luftschichten bis zur oberen Troposphäre in über 10 km Höhe liefern die DWD-Wetterradarsysteme Daten über die Niederschlagsintensität und -verteilung sowie die (Radial-) Windgeschwindigkeit. Der DWD erzeugt aus den Radar-Daten verschiedene lokale Radar-Produkte und Radar-Komposit-Produkte für ganz Deutschland und stellt diese für einen Zeitraum von 48 Stunden kostenfrei zur Verfügung. (DWD, 2022b)

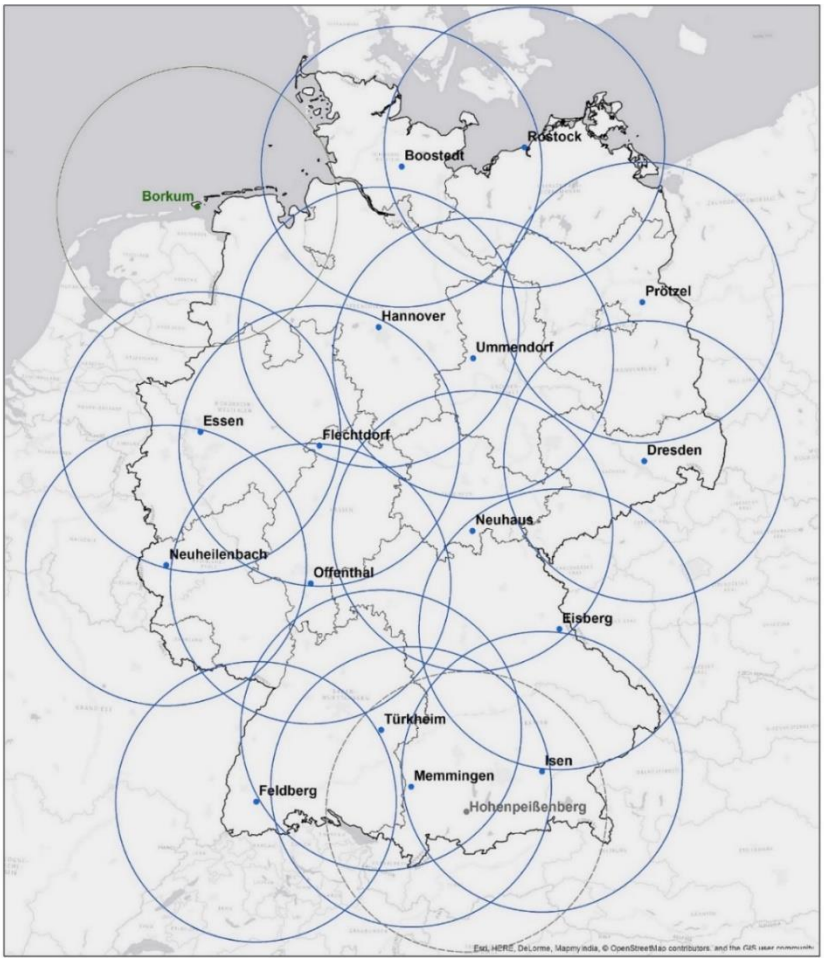

Abbildung 36: Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2022c)

5.2.1 Verarbeitung der Wetterdaten

Damit die verschiedenen Wetterdaten für die Zwischenschichtschätzung an einer beliebigen Position eingesetzt werden können müssen die Rohdaten entsprechend weiterverarbeitet werden. Die einzelnen Wetterparameter der DWD-Klimastationen, GMA und der privaten Netatmo-Messstationen werden unter Berücksichtigung der nächstgelegenen Stationen für die jeweilige Position der Schätzung interpoliert. Als Interpolationsverfahren wird dazu die Methode der inversen Distanzwichtung (engl.

Inverse Distance Weighting, kurz: IDW) verwendet, welches ein nichtstatistisches Interpolationsverfahren der Geostatistik ist und für die einfache Interpolation räumlicher Abhängigkeiten georeferenzierter Daten eingesetzt wird. Diese Methode eignet sich für die Schätzung von Messwerten zwischen bekannten Messpunkten, wobei jeder Messpunkt in Abhängigkeit vom Abstand zur Lage des gesuchten Punktes gewichtet wird (Department of Earth Sciences [FU Berlin]; Pingel, 2013). Zur Interpolation der Wetterparameter der DWD-Klimastationen werden jeweils die Werte der 25 nächstgelegenen Stationen berücksichtigt. Eine Visualisierung der Interpolation der Lufttemperatur in 2 m Höhe und der relativen Luftfeuchtigkeit ist **Abbildung 37** zu entnehmen, wobei die schwarzen Kreise den Positionen der Klimastationen entsprechen und der rote Kreis der Position entspricht, für die der gesuchte Wert Interpoliert wird. Für die Wetterparameter der Netatmo-Messtationen und GMA erfolgt die Interpolation nach einem äquivalenten Vorgehen.

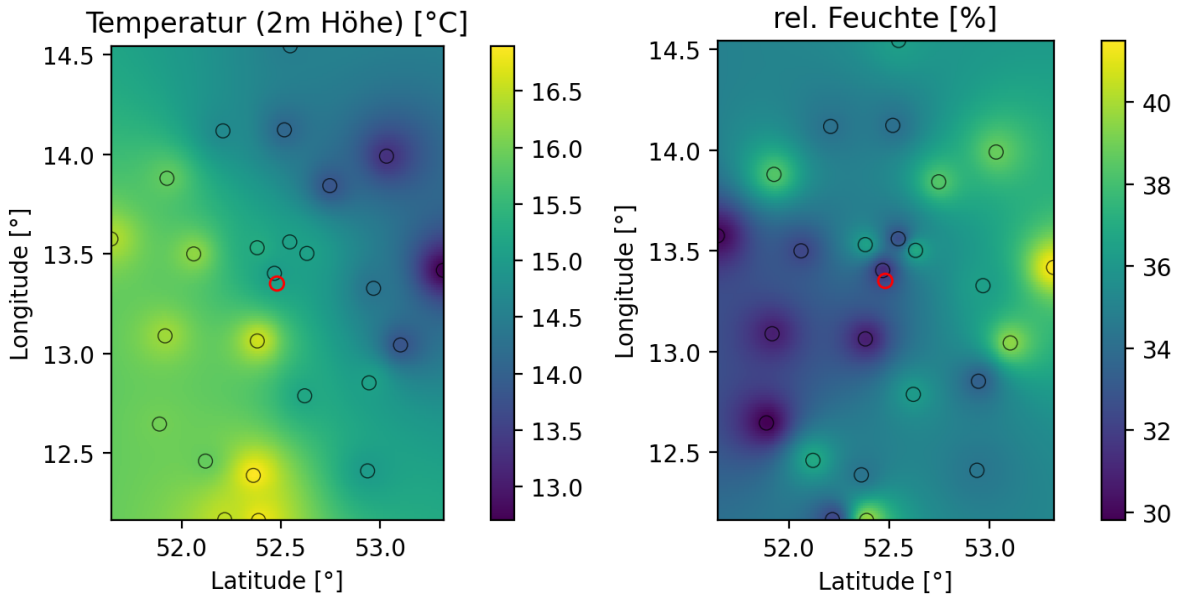

Abbildung 37: Interpolation der Wetterdaten umliegender DWD-Klimastationen

Zur Untersuchung der Aussagekraft der interpolierten Daten wird die Korrelation mit den entsprechenden am Fahrzeug gemessenen Daten analysiert. **Abbildung 38** zeigt die hohe Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den interpolierten Daten. Die Umgebungstemperatur wird mit der Seriensensorik des Fahrzeugs erfasst. Die weiteren Wetterparameter werden am Fahrzeug mit dem in Abs. 4.1 beschriebenen MARWIS Straßenwettersensor erfasst. Die vereinzelten deutlichen Abweichungen sind auf Messfehler des MARWIS zurückzuführen. Die interpolierte Lufttemperatur in 5 cm Höhe wird hier mit der vom MARWIS gemessenen Oberflächentemperatur der Straße gegenübergestellt. Dabei gilt es zu beachten, dass die Straßenoberfläche nicht zwangsläufig dieselbe Temperatur aufweist wie die Lufttemperatur oberhalb des Bodens. Dennoch ist auch hier eine hohe Überstimmung zu erkennen. Eine mögliche Weiterentwicklung des beschriebenen Verfahrens könnte das Interpolationsverfahren durch entsprechende Wettermodelle ersetzen, welche spezielle geografische Besonderheiten und Höhenunterschiede besser berücksichtigen und dadurch eine höhere Genauigkeit erzielen.

Die Auswertung der Wetterradardaten umfasst eine Zuordnung der GPS-Koordinaten der gewünschten Position zur entsprechen Rasterzelle der Wetterradardaten. Eine Rasterzelle beschreibt dabei eine Fläche von ca. 1 km x 1 km und beinhaltet für diesen Bereich je nach Radarprodukt die gemessene Reflexivität des Radars oder die daraus bestimmte Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit. Mittels historischer Wetterradardaten kann auf diese Weise der Verlauf der Regenintensität an einer beliebigen GPS-Position für ein rückwirkendes Zeitintervall ausgewertet werden.

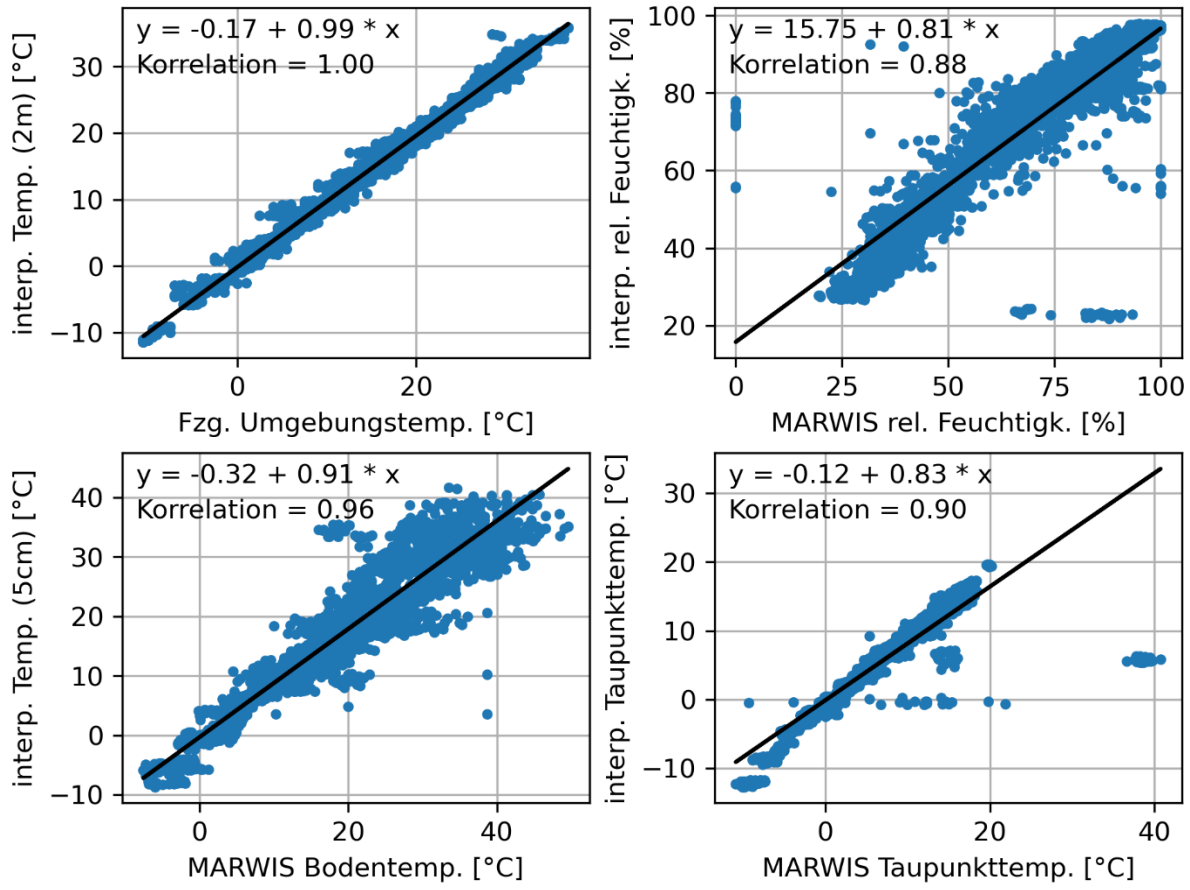

Abbildung 38: Gegenüberstellung der anhand der Daten der umliegenden DWD-Klimastationen interpolierten Wetterparameter mit den entsprechenden am Fahrzeug gemessenen Daten

5.2.2 Verfügbarkeit und Qualität der Wetterdaten

Eine Anwendung der Wetterdaten im Kontext des Echtzeitbetriebs eines Zwischenschichtschätzers stellt verschiedene Anforderungen an die Verfügbarkeit und Qualität der Wetterdatenbasis. Damit entsprechende Modell zur Schätzung der Zwischenschicht entwickelt und trainiert werden können sind große Datensätze mit Ground-Truth Daten zum Fahrbahnzustand inklusive eines Zeitstempels und der GPS-Koordinaten erforderlich, welche durch entsprechende Messfahrten erhoben werden. Diese Daten werden mit entsprechenden externen Wetterdaten für die jeweiligen Zeitpunkte der Datenerhebung ausgewertet, sodass ein Trainingsdatensatz entsteht, mit dem Schätzmodelle trainiert werden können. Für die spätere Anwendung der trainierten Schätzmodelle im Echtzeitbetrieb ist es zudem erforderlich, dass die aktuellen Wetterdaten, selbigen Umfangs und Güte zeitnah abgerufen und

ausgewertet werden können, damit sie als Eingangsgröße des Schätzers fungieren können und es dem System ermöglichen auf die aktuellen Witterungsbedingungen zu reagieren. Unter diesen Voraussetzungen werden die in Abs. 5.2 erläuterten Wetterdaten hinsichtlich ihrer Qualität und Verfügbarkeit begutachtet.

Die Wetterdaten der DWD-Klimastationen liegen mit einer 10-minütigen Auflösung vor. Historische Daten der DWD-Klimastationen sind rückwirkend bis in die 90er Jahre verfügbar. Es wird unterschieden zwischen dem Unterverzeichnis „recent“ und „historical“, wobei für die „historical“-Daten entsprechende routinemäßige Qualitätskontrollen bereits vollständig abgeschlossen sind (DWD, 2020a). Die laufenden Qualitätskontrollen dienen dazu, dass auch zu einem späteren Zeitpunkt erkannte Fehler in den archivierten Daten korrigiert werden (DWD, 2020a). Darüber hinaus sind die aktuellsten Wetterdaten ohne entsprechende Qualitätskontrollen unter dem Verzeichnis „now“ verfügbar. Diese Daten werden alle 30 Minuten mit einer zeitlichen Verzögerung von jeweils ca. 30 Minuten auf dem DWD-Server zur Verfügung gestellt. Das bedeutet, dass bei einem Datenabruf um 12:30 die Daten von 12:00 als aktuellste Daten zur Verfügung stehen. Um 12:59 sind die aktuellsten Daten dann allerdings bereits 59 Minuten alt. Im Echtzeitbetrieb macht sich diese Verzögerung erheblich bemerkbar und sorgt dafür, dass eine Reaktion auf wechselnde Witterungsbedingungen nicht möglich ist. Im Offline-Betrieb weisen diese Daten allerdings eine sehr hohe Güte auf und zeigen auch nach einer Interpolation für die jeweilige Fahrzeugposition eine sehr hohe Korrelation mit den am Fahrzeug gemessenen Daten, wie in Abbildung 38 veranschaulicht wird.

Die aktuellen Daten der Glättemeldeanlagen werden alle 15-minütigen auf den DWD-Servern zur Verfügung gestellt und können dort 48 Stunden lang kostenfrei abgerufen werden. Für eine Nutzung im Echtzeitbetrieb des Schätzers sind die Daten allerdings ungeeignet, da die GMA-Stationen im Sommer häufig abgeschaltet werden und damit nicht zwangsläufig dauerhaft zur Verfügung stehen.

Die Daten von Netatmo weisen besonders in Ballungsgebieten aber auch in ländlicheren Regionen eine sehr hohe Netzdichte auf, vgl. Abbildung 35. Die Aktualisierung der Daten der einzelnen Messstationen erfolgt alle 10 Minuten, wobei jede Station ihren eigenen Zeitintervallen folgt. Aufgrund der hohen Netzdichte und der asynchronen Aktualisierung der Messwerte der einzelnen Stationen ist die Datenqualität der Netatmo Daten für die Echtzeitnutzung sehr hoch. Die Vielzahl an Stationen im jeweiligen Umkreis ermöglicht es, eventuelle Messungenauigkeiten über das statistische Mittel auszugleichen. Zudem ist die Distanz zu den nächstgelegenen Stationen stets überschaubar. Die asynchrone Aktualisierung der verschiedenen Stationen begünstigt, dass stets aktuelle Messwerte berücksichtigt werden können. Die Bodentemperatur oder die bodennahe Lufttemperatur werden von den Netatmo-Messstationen allerdings nicht gemessen.

Die Wetterradardaten werden vom DWD in verschiedenen Formaten zur Verfügung gestellt. Für die Anwendung der Zwischenschichtschätzung eignen sich das WN-, RY- und YW-Format. Das WN-Format ist ein Kombinationsprodukt aus einem Radarkomposit und einer Vorhersage für 2 Stunden (DWD, 2022b). Die Daten des WN-Komposit liegen als DE1200-Komposit vor und umfassen eine Datenmatrix von 1100 Pixel in x-Richtung (West-Ost) und 1200 Pixeln in y-Richtung (Nord-Süd), wobei

eine Gitterzelle einer Größe von 1 km x 1 km entspricht (DWD, 2022a). Die Werte der Gitterzellen entsprechen der jeweiligen Reflektivität des Radars in dBZ. Die 900x900 Pixel große Datenmatrix des RY-Formats umfasst qualitätsgeprüfte Radardaten nach Abschattungskorrektur und nach Anwendung der verfeinerten Z-R-Beziehung, wobei die Reflexionswerte in Niederschlagshöhen pro 5 Minuten (mm/5 min) umgerechnet werden (Weigl, 2023a, 2023b). Die Daten des WN- und RY-Produkts werden mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten für einen Zeitraum von 48 Stunden zur Verfügung gestellt und können mit einer Verzögerung von 2-3 Minuten vom DWD-Server abgerufen werden. Ein weiteres Wetterradardatenformat ist das YW-Format, welches ausschließlich als historisches Archiv verfügbar ist und quasi-angeeichte Radardaten auf Basis der RY-, RH- und RW-Produkte umfasst (Weigl, 2021). Die Werte der Gitterzellen der 1100x900 Pixel großen YW-Datenmatrix entsprechen, wie beim RY-Produkt, der Niederschlagshöhe pro 5 Minuten (mm/5 min). Die Daten des YW-Produkts werden ungefähr zum zweiten Quartal eines Jahres für das vorherige Jahr zur Verfügung gestellt. Für das Jahr 2022 wurden die Daten am 16.03.2023 auf den DWD-Servern hochgeladen. Aktuelle Daten des YW-Produkts sind nicht verfügbar. **Abbildung 39** zeigt einen Vergleich der Wetterradardaten des WN- und des YW-Produkts, wobei die unterschiedliche Sensitivität zwischen der Radarreflexion (WN-Produkt) und der umgerechneten Niederschlagsmenge pro 5 Minuten deutlich zu erkennen ist.

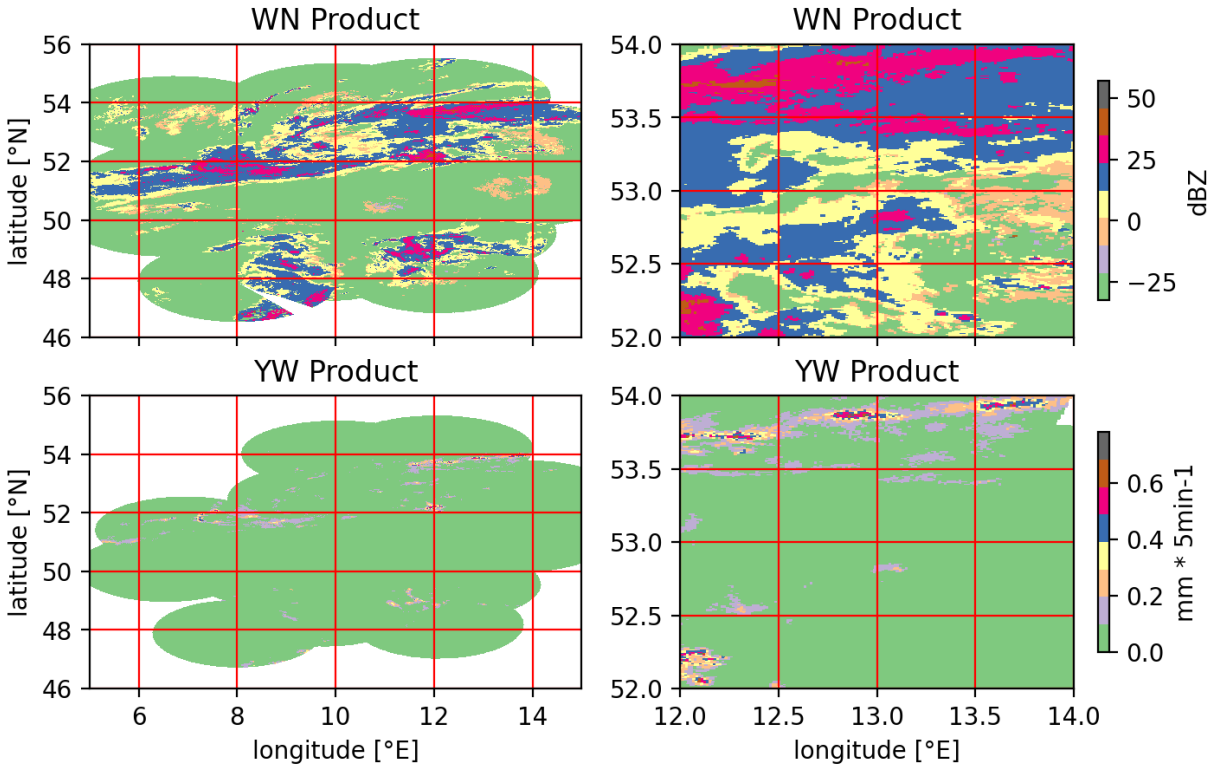

Abbildung 39: Vergleich zwischen WN- und YW-Produkt für den 05.12.2022 10:00 (UTC)

5.3 Umsetzung der Zwischenschichtschätzung

Im Rahmen dieses Projekts werden Modelle zur Zwischenschichtschätzung entwickelt, welche auf künstlichen neuronalen Netzen basieren. Als

Aktivierungsfunktion wird der Rectifier (Rectified Linear Unit, kurz: ReLU) verwendet, welcher als der Positivanteil seines Arguments definiert ist, vgl. **Gleichung (8)**.

$$P(x) = \max(0, x) \tag{8}$$

Als Ausgangsfunktion wird die Softmax Funktion verwendet, welche sicherstellt, dass die berechneten Wahrscheinlichkeitswerte der einzelnen Klassen in Summe 1 ergeben, vgl. **Gleichung (9)**.

$$P_j(x) = \frac{e^{x_j}}{\sum_{k=1}^{K} e^{x_k}} \text{ für } j = 1 \dots n \tag{9}$$

Der eingesetzte Datensatz umfasst alle Messungen, die am Fachgebiet Kraftfahrzeuge zwischen 2014 und 2021 durchgeführt wurden. Jede Messung ist mit dem vom Fahrer bestimmten, vorliegenden Zwischenschichtzustand gekennzeichnet (gelabelt). Dieser Zwischenschichtzustand wird im Folgenden als *Ground Truth* verwendet und sowohl zum Trainieren des Schätzalgorithmus als auch für die anschließende Bewertung der Schätzgenauigkeit verwendet. Als Eingangsparameter werden die Umgebungstemperatur in 5 cm und 2 m Höhe, die Luftfeuchtigkeit, die Taupunkttemperatur, der Luftdruck, die vergangene Zeit seit dem letzten Niederschlag und die Dauer des letzten Niederschlags berücksichtigt. Die Wetterdaten werden dabei von der nächstgelegenen 25 DWD-Klimastationen bezogen und für die jeweilige GPS-Position der einzelnen Messungen interpoliert, vgl. Abs. 5.2.1. Die Zeit seit dem letzten Niederschlag wird anhand der Wetterradardaten ermittelt, wobei mittels der Radardaten zur Niederschlagsmenge pro 5 min bessere Ergebnisse erzielt werden als unter Berücksichtigung der Radarreflexionsdaten. Es werden ausschließlich Datensätze berücksichtigt, für die alle Eingangsparameter vollständig vorliegen. Diese Datenmenge umfasst demnach insgesamt 5.571 vollständige Datenpunkte und wird in 70 % Trainingsdaten und 30 % Testdaten aufgeteilt. Dabei wird beachtet, dass das Verhältnis der einzelnen Zwischenschichtzustände in beiden Datensätzen identisch ist. Das neuronale Netz umfasst 3 Hidden-layer mit 16, 64 und 16 Neuronen. Die Kantengewichte des neuronalen Netzes werden hinsichtlich der Kostenfunktion der binären Kreuzentropie (binary crossentropy) mit einem Adam Optimierer optimiert. Die neuronalen Netze werden für die Klassifikation der drei Zwischenschichtzustände trocken, feucht/nass und verschneit/vereist trainiert, wobei die Messungen der Kategorie feucht und nass sowie verschneit und vereist zu jeweils einer Kategorie zusammengeführt werden.

Das Modell erzielt mit dem Testdatensatz mit 1672 Datenpunkten eine Gesamtgenauigkeit von 93,36 %. **Tabelle 2** zeigt die entsprechende Konfusionsmatrix. Die Precision liegt dabei bei 96,12 %, der Recall bei 97,02 % und der F1-Score bei 96,57 %. Als besonders kritisch sind dabei die Fälle anzusehen, bei denen ein sicherer Zustand geschätzt wird als eigentlich vorliegt (false negative), wie bspw. die Schätzung des Zustands trocken, obwohl die Fahrbahn nass ist, da derartige Klassifizierungen ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen können. Die sogenannte Safe Prediction berücksichtigt daher, zu welchem Anteil die Zwischenschicht korrekt (true positive) oder zu konservativ (false positive) geschätzt wurde. Für die hier

dargelegte Klassifikation von drei Fahrbahnzuständen wird mit dem trainierten neuronalen Netz eine Safe Prediction von 97,13 % erzielt. Eine Übersicht der einzelnen Bewertungsmetriken ist **Tabelle 3** zu entnehmen.

Tabelle 2: Konfusionsmatrix des neuronalen Netzes für die Klassifikation von drei Zwischenschichtzuständen bei Anwendung auf den Testdatensatz mit 1672 Datenpunkten; grün: true positive, rot: false negative, gelb: false positive

Fahrer \ Schätzung	trocken	feucht/nass	verschneit
trocken	1019 (94,18 %)	63 (5,82 %)	0 (0,0 %)
feucht/nass	40 (7,56 %)	489 (92,44 %)	0 (0,0 %)
verschneit	0 (0,0 %)	8 (13,11 %)	53 (86,89 %)

Tabelle 3: Bewertungsmetriken des neuronalen Netzes für die Klassifikation von drei Zwischenschichtzuständen

Accuracy	93,36 %
Precision	96,12 %
Recall	97,02 %
F1 Score	96,57 %
Safe Prediction	97,13 %

5.4 Erarbeitung einer großflächigen Reibwertkarte

Die Daten von digitalen Karten wie Open Street Map (OSM) ermöglichen den Zugriff auf digitale Straßendaten mit hinterlegten Informationen zur Straßenoberfläche. Nach einer Ermittlung der externen Wetterdaten für beliebige GPS-Koordinaten, kann anschließend mit dem zuvor trainierten Schätzalgorithmus anhand der jeweiligen Eingangsgrößen eine Zwischenschichtschätzung für diese GPS-Koordinaten erfolgen. In Kombination mit den relevanten Informationen zur Straßenoberfläche kann daraufhin mittels einer entsprechend umfangreichen Reibwertdatenbank eine Prädiktion des jeweils vorliegenden Reibwertpotenzials erfolgen. Für das entsprechende Programm werden dieselben Teilbestandteile wie für die Echtzeitschätzung verwendet, welche es ermöglichen fahrzeugunabhängig für beliebige Positionen das Reibwertpotenzial zu schätzen. Die Zusammenführung und entsprechende Visualisierung dieser Daten ermöglicht dann eine Darstellung in Form einer Reibwertkarte. Die Bestimmung der Reibwertklassen des Versuchs-Lkws erfolgt mittels der in Abbildung 30 dargestellten Boxplots. Die im Rahmen dieses Projekts nicht erhobenen Daten für die Oberflächen Beton und Kopfsteinpflaster werden anhand der jeweiligen Offsets gegenüber der Pkw-Messungen ermittelt. Der Zustand verschneit/vereist wird für den Lkw nicht berücksichtigt, da es für den Rahmen dieses Projekts nicht vorgesehen war entsprechende Messdaten mit dem Lkw zu erheben, vgl. Abs. 4.3. **Abbildung 40** zeigt eine Reibwertkarte mit den Reibwertpotenzialschätzungen für den Lkw für den 02.02.2023 um 12:15 Uhr. Zusätzlich werden die Ergebnisse entsprechender Reibwertpotenzialmessungen dargestellt, welche zu diesem Zeitraum durchgeführt wurden. Das farblich visualisierte geschätzte Reibwertpotenzial für die verschiedenen Straßenabschnitte entspricht

jeweils dem Mittelwert der Box des Boxplots der zugeordneten Reibwertklasse und zeigt an den entsprechenden Stellen eine hohe Übereinstimmung mit den gemessenen Reibwertpotenzialen.

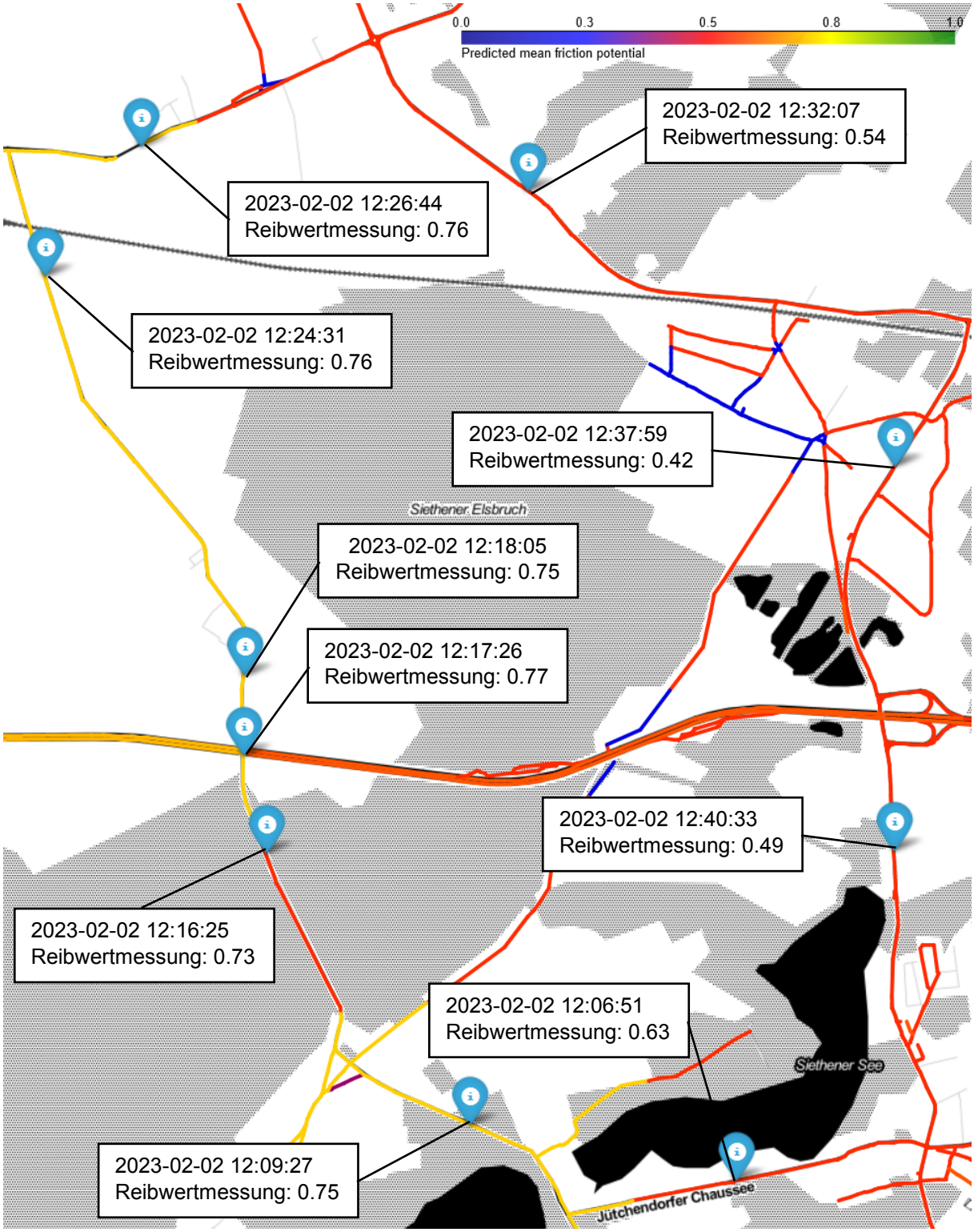

Abbildung 40: Lkw-Reibwertkarte für den 02.02.2023 um 12:15 inklusiver der zu dieser Zeit erhobenen Messergebnisse, © OpenStreetMap

5.5 Echtzeitschätzung im Demofahrzeug

Damit das entwickelte System zur Reibwertpotenzialschätzung während des Fahrbetriebs eingesetzt werden kann müssen die einzelnen Teilsysteme zu einem robusten Echtzeitsystem zusammengeführt werden. Die entsprechende Systemarchitektur für das Gesamtsystem ist in **Abbildung 41** dargestellt.

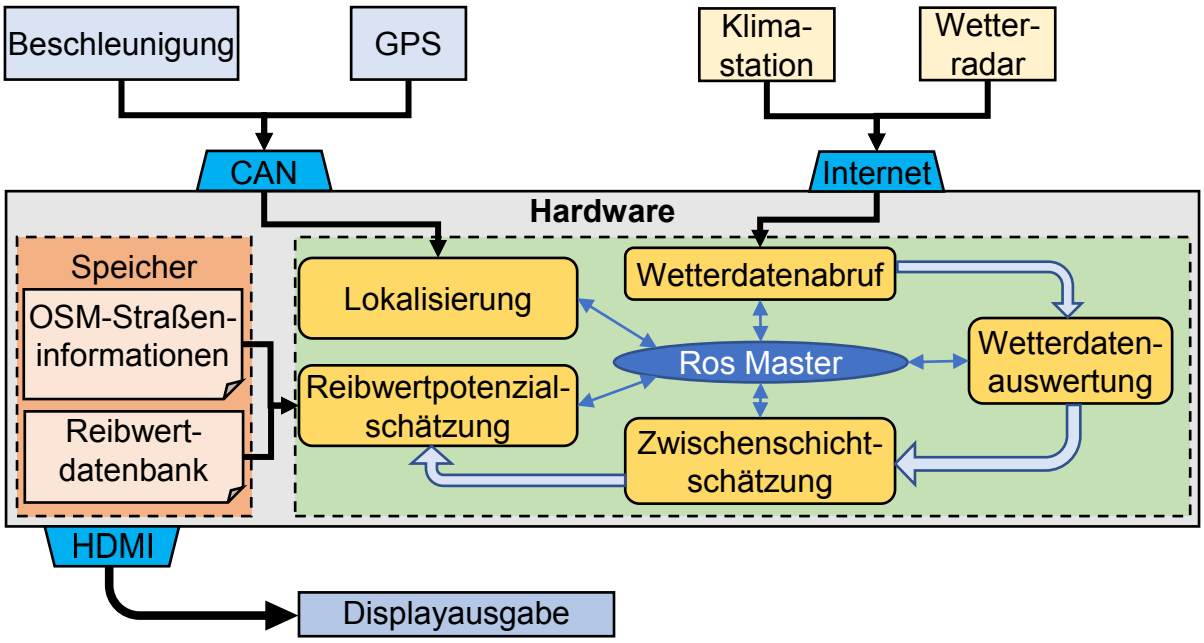

Abbildung 41: Systemarchitektur des Echtzeitschätzers

Als Umgebung wird für dieses System ein Robot Operating System (ROS) gewählt, was ein open-source Framework für Linux basierte Echtzeitbetriebssysteme ist. Dabei werden einzelne Knoten definiert, welche bestimmte Aufgaben ausführen, dabei miteinander kommunizieren und gegenseitig Daten austauschen. Der ROS-Master ermöglicht es den einzelnen Knoten, sich gegenseitig zu lokalisieren. Sobald sich diese gefunden haben, kommunizieren sie Peer-to-Peer miteinander. Die Teilfunktionen der einzelnen Knoten unterteilen sich, wie in Abbildung 41 dargestellt, in den Wetterdatenabruf, die Wetterdatenauswertung, die Zwischenschichtschätzung, die Reibwertpotenzialschätzung und die Lokalisierung. Die Funktionsarchitektur der Hauptbestandteile der entwickelten Software ist in **Abbildung 42** veranschaulicht. Die Funktion des Wetterdatenabrufs hat die Aufgabe kontinuierlich zu überwachen, ob neue Wetterdaten zur Verfügung stehen und diese über eine Internetschnittstelle von den entsprechenden Servern der Wetterdatenanbieter herunterzuladen. Die integrierte Wetterdatenauswertung bringt die Rohdaten in ein einheitliches Format, wertet die aktuellen Wetterdaten aus und stellt diese einem sogenannten Stack-Knoten (Provider) zur Verfügung, welcher die Daten speichert. Die Stack-Knoten verfügen jeweils über eine entsprechende Service-Schnittstelle, über welche die jeweiligen Daten durch eine Serviceanfrage abgerufen werden können. Eine solche Serviceanfrage beinhaltet die GPS-Koordinaten eines gewünschten Punktes. Der Provider hat daraufhin die Aufgabe, die aktuellsten ihm zur Verfügung stehenden Daten für diese gewünschte Position zu interpolieren (vgl. Abs. 5.2.1) und die Resultate als Antwort zurück zu senden. Der für die Wetterradardaten zuständige

Provider speichert die Niederschlagsintensität pro Pixel für ein gewünschtes rückwirkendes Zeitintervall. Als Antwort auf eine Serviceanfrage wird der für die gewünschte Position zugehörige Pixel ermittelt und entsprechend ausgewertet. Mit den auf diese Weise von den verschiedenen Providern zur Verfügung gestellten Wetterdaten kann der Knoten der Zwischenschichtschätzung mittels des zuvor trainierten Schätzmodells die Zwischenschicht für jede beliebige Position schätzen. Im Anschluss an die Zwischenschichtschätzung erfolgt die Reibwertpotenzialschätzung, wobei auf gespeicherte digitale Straßeninformationen und die Reibwertdatenbank zurückgegriffen wird.

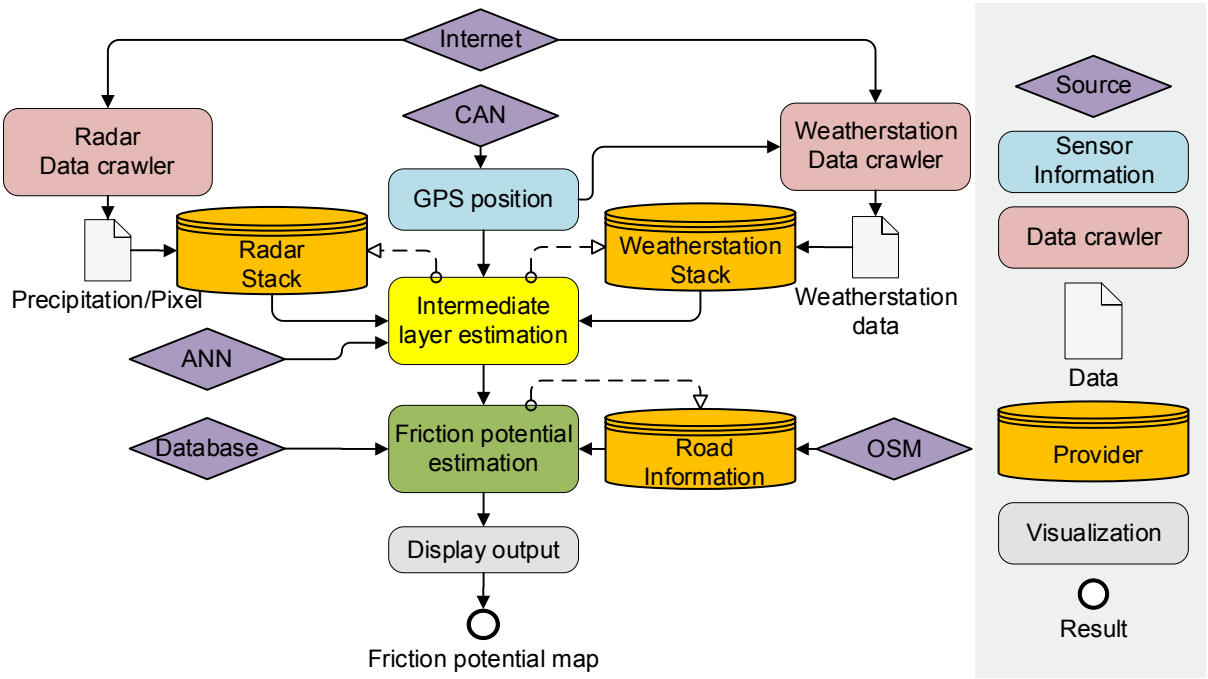

Abbildung 42: Funktionsarchitektur des Echtzeitsystems

Insgesamt ist die Qualität der Echtzeitschätzung im Demofahrzeug maßgeblich abhängig von der Aktualität und Verfügbarkeit der Wetterdaten, welche nach einer entsprechenden Auswertung bzw. Datenverarbeitung die Input-Größen des Algorithmus‘ zur Zwischenschichtschätzung darstellen, vgl. Abs. 5.3. Für die Implementierung der Echtzeitschätzung im Demofahrzeug ist es daher von besonderer Bedeutung, dass die Wetterdaten möglichst aktuell abgerufen und ausgewertet werden können, vgl. Abs. 5.2.2. Die Daten der DWD-Klimastationen sind aufgrund der teilweise erheblich verzögerten Verfügbarkeit für die Echtzeitanwendung nicht gut geeignet. Eine Reaktion auf plötzlich ändernde Witterungsbedingungen ist mit diesen Daten nicht möglich. Die Daten von Netatmo liefern an dieser Stelle Abhilfe, da sie sofort verfügbar sind. Diese Daten umfassen allerdings keine Temperatur in 5 cm Höhe und keine Taupunkttemperatur. Die Taupunkttemperatur wird daher anhand der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit errechnet. Der Parameter der Lufttemperatur in 5 cm Höhe muss weiterhin von den DWD-Klimastationen bezogen werden, da es hierzu keine Alternative gibt.

5.6 Analyse der Effektivität des Systems

Zur Analyse der Effektivität des Systems wird das in Kapitel 5 beschriebenen entwickelten Modell zur Schätzung des Reibwertpotenzials für den Versuchs-Lkw eingesetzt und anhand der entsprechenden Resultate begutachtet. Dabei werden Reibwertpotenzialschätzungen für den jeweiligen Ort (GPS-Position) und Zeitstempel aller im Rahmen dieses Projekts erhobenen Lkw-Messungen durchgeführt. Diese Datenpunkte werden im Datensatz für das Training und Testen der Schätzmodelle nicht verwendet, sodass sie als ein zusätzlicher Verifikationsdatensatz zur Analyse der Effektivität des Systems genutzt werden können, ohne dass das Modell bereits anhand dieser Daten optimiert wurde. Eine Visualisierung zur Verifikation der Genauigkeit der Reibwertpotenzialschätzung ist **Abbildung 43** dargestellt. Dabei sind die jeweiligen Reibwertpotenzialmessungen in Form von Punkten chronologisch nummeriert (Messung Nr.) aufgetragen. Für jede Messung erfolgt eine Schätzung des jeweiligen Reibwertpotenzialbereichs, dessen oberen und der unteren Grenze durch eine durchgezogene blaue und orangene Linie veranschaulicht wird. Liegt die zugehörige Messung innerhalb des Schätzbereich wird der entsprechende Punkt grün dargestellt, liegt die Messung oberhalb des Schätzbereichs wird der Punkt in hellblau dargestellt und liegt die Messung unterhalb des Schätzbereichs wird der Punkt in roter Farbe darstellt.

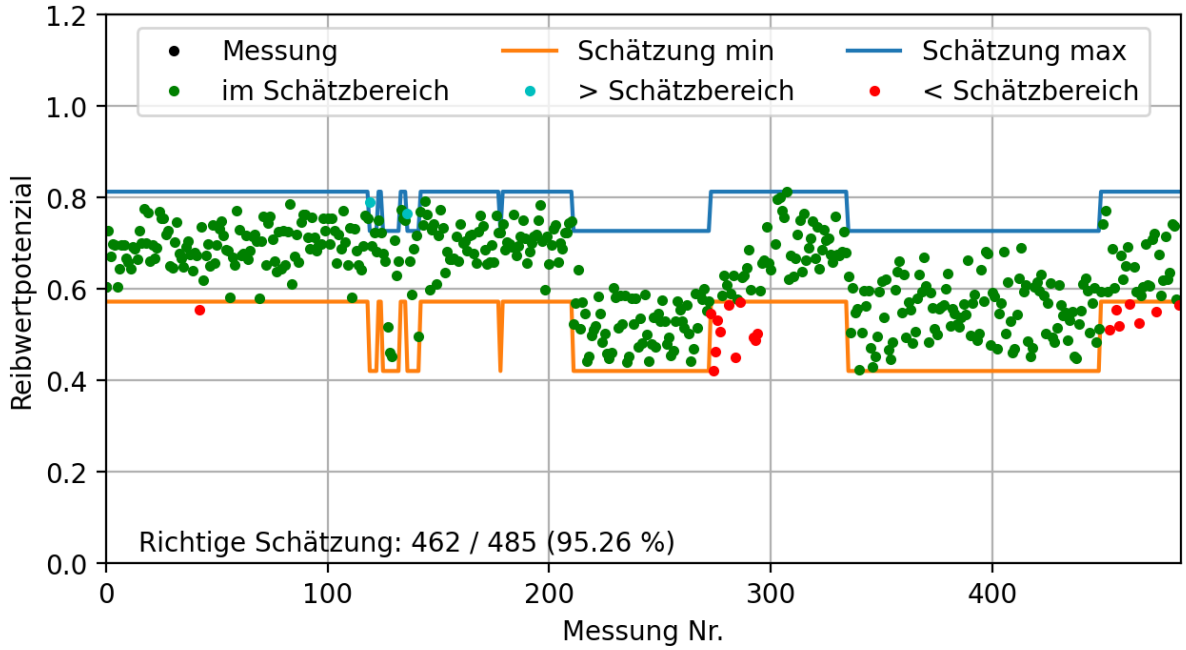

Abbildung 43: Reibwertpotenzialschätzung unter Berücksichtigung der 3 Zwischenschichtklassen trocken, feucht/nass, verschneit/vereist für den Ort und Zeitpunkt aller durchgeführten Messungen mit dem Versuchs-Lkw

Insgesamt zeigt sich, dass die Methode überwiegend zuverlässige Vorhersagen zum maximal nutzbaren Reibwertpotenzial bei verschiedenen Witterungsbedingungen liefert. Die hier eingesetzten Schätzbereiche für die unterschiedlichen Kategorien können weiter optimiert werden, wobei z. B. die obere Grenze des Zustands feucht/nass reduziert werden könnte. Insgesamt sollten dafür allerdings zusätzliche Messkampagnen für verschiedene Situationen auf unterschiedlichen Oberflächen

erfolgen. Besondere Herausforderungen für die Zwischenschichtschätzung sind Übergangsszenarien zwischen trockenen und nicht trockenen Fahrbahnen. Diesbezüglich wäre es sinnvoll gezielte Messungen und Analysen für diese Übergangsszenarien durchzuführen und das Modell mit entsprechenden Daten weiter zu optimieren.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts „Prognose des Kraftschlusspotenzials bei schweren Güterkraftfahrzeugen (> 12 t zGG.)“ wird ein ursachenbasiertes Verfahren zur Reibwertpotenzialschätzung entwickelt, welches unabhängig von der Fahrzeugklasse angewendet werden kann. Das Verfahren wird entsprechend für einen schweren Sattelzug umgesetzt und ermöglicht es das Reibwertpotenzial ohne zusätzliche am Fahrzeug installierten Sensoren vorherzusagen, sodass eine großflächige Reibwertpotenzialschätzung in Form einer Reibwertkarte für die aktuelle Fahrzeugumgebung zur Verfügung gestellt wird.

Eingangs werden mögliche Einflussgrößen auf die Reibwertpotenzialausnutzung von Lkws analysiert. Anhand von Fahrdynamiksimulationen wird darauf basierend die mögliche Reibwertpotenzialausnutzung eines Sattelzugs genauer untersucht. Zudem werden umfassende Reibwertpotenzialmessungen mit einem Versuchs-Lkw durchgeführt. Dabei wird das nutzbare Reibwertpotenzial bei Bremsmanövern im ABS-Regelbereich ermittelt, wobei unterschiedliche Beladungszustände, Fahrzeuggeschwindigkeiten und variierende Umgebungsbedingungen eines Jahres berücksichtigt werden. Alle Messungen werden parallel auch mit einem Versuchs-Pkw durchgeführt, um vorhandene Erkenntnisse zum Thema Reibwert aus vergangenen Forschungsprojekten besser auf den Lkw übertragen zu können. Dabei wird insbesondere verdeutlicht, dass das vorhandene Reibwertpotenzial von einem schweren Nutzfahrzeug deutlich schlechter ausgenutzt werden kann. Der Einfluss des Zwischenschichtzustands lässt sich nahezu äquivalent übertragen, wobei das nutzbare Reibwertpotenzial des Lkws besonders bei widrigen Verhältnissen sehr niedrige Werte erzielt. Insgesamt liefern Reibwertpotenzialmessungen eine Reibwertdatenbank für den Versuchs-Lkw, welche eine wichtige Grundlage für die ursachenbasierte Reibwertpotenzialschätzung für Fahrzeuge dieser Fahrzeugklasse darstellt.

Das Schätzverfahren setzt sich im Wesentlichen aus einer fahrzeugunabhängigen Zwischenschichtschätzung und einer anschließenden an das jeweilige Fahrzeug angepassten Reibwertpotenzialschätzung zusammen. Dabei wird das Ziel verfolgt, eine prädiktive Reibwertpotenzialschätzung für den Bereich um die aktuelle Fahrzeugposition und insbesondere vor dem Fahrzeug zu ermöglichen. Diesbezügliche wird eine neuartige Methode zur Zwischenschichtschätzung entwickelt, welche darauf beruht, dass ausschließlich externe Wetterparameter zur Klassifizierung des vorliegenden Zwischenschichtzustands eingesetzt werden. Im weiteren Schritt erfolgt dann die Reibwertpotenzialschätzung, unter der Berücksichtigung der jeweiligen Straßenoberfläche, der eingesetzten Reifenart und der fahrzeugtypischen Besonderheiten. Aufgrund der Tatsache, dass die Reibwertpotenzialausnutzung trotz identischer Randbedingungen und Versuchsdurchführungen immer einer signifikanten Streuung unterliegen wird das Reibwertpotenzial als ein Bereich zwischen einem minimalen und einem maximalen Reibwert prognostiziert, dessen Werte auf den Ergebnissen der umfangreichen Reibwertpotenzialmessungen beruhen. Für den Versuchs-Lkw liegen die Reibwertpotenzialmessungen in 95,3 % der Fälle innerhalb des jeweils geschätzten Bereichs zwischen einem minimalen und maximalen Reibwert. Hier gilt es allerdings

zu beachten, dass ausschließlich trockene und nicht trockene Asphalt Straßen berücksichtigt werden. Mögliche weitere Untersuchungen sollten ebenfalls auf Kopfsteinpflaster und Beton sowie unter der Berücksichtigung von verschneiten und vereisten Fahrbahnzuständen erfolgen.

Das Verfahren ermöglicht insbesondere die Erstellung von großflächigen Reibwertkarten, dessen Implementierung prototypisch dargelegt wird und dessen Zuverlässigkeit anhand von verschiedenen Reibwertpotenzialmessungen gezeigt werden kann. Zudem erfolgt eine Implementierung des Verfahrens als Echtzeitsystem, wobei die grundsätzliche Funktionalität während des Fahrbetriebs ebenfalls nachgewiesen werden kann. Die entsprechenden Wetterparameter zur Zwischenschichtschätzung werden allerdings mit einer erheblichen Verzögerung von 30-59 Minuten zur Verfügung gestellt, wodurch die Fähigkeit auf aktuelle Witterungsbedingungen reagieren zu können nicht gewährleistet werden kann. Abhilfe können Daten privater Messstationen schaffen. Technisch wäre es allerdings möglich die Daten professioneller Klimastationen ebenfalls zeitnah zur Verfügung stellen zu können. Eine derartige echtzeitfähige Reibwertkarte in Fahrzeugen integrieren zu können, ermöglicht insgesamt ein hohes Potenzial für reibwertbasierte Verbesserungen von Fahrerassistenzfunktionen, für eine den Straßenverhältnissen angepasste Fahrdynamik beim automatisierten Fahren oder als Warnsystem für menschliche Fahrer. Ein besonderer Vorteil der hier vorgestellten Methode ist es, dass das Verfahren ohne zusätzliche Fahrzeugsensorik funktioniert und es dennoch ermöglicht prädiktiv Aussagen für den Bereich vor einem Fahrzeug zu treffen.

Für eine besonders zuverlässige und allgemein anwendbare Reibwertpotenzialschätzung wird es zukünftig notwendig sein, wie auch im Bereich der Umfelderkennung, mit den Prinzipien der Sensorredundanz und Sensorfusion zu arbeiten. Dabei sollten sowohl fahrzeugbasierte als auch fahrzeugunabhängige Methoden eingesetzt werden, sodass die Schwächen der einzelnen Verfahren ausgeglichen werden können. Im Einsatz als alleiniges Verfahren kann mit der entwickelten fahrzeugunabhängigen Methode unter den berücksichtigten Gegebenheiten bereits eine hohe Genauigkeit gezeigt werden. Lokale Besonderheiten können verfahrensbedingt allerdings nicht berücksichtigt werden. Mögliche dahingehende Weiterentwicklungen des Verfahrens könnten somit für eine Steigerung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit führen.

Eine durchgeführte Analyse der Messdaten von SKM-Messungen zeigt ein hohes Potenzial, um die Schätzgenauigkeit des Reibwertpotenzials auf nassen Fahrbahnen durch die zusätzliche Berücksichtigung der jeweiligen Oberflächenrauigkeiten zu erhöhen. Eine Verknüpfung mit fahrzeugbasierten Kamera- oder LiDAR-basierten Methoden kann zusätzliche prädiktive Aussagen unter Berücksichtigung der aktuellen Gegebenheiten beisteuern und somit die Gesamtgenauigkeit erhöhen. Unter Einsatz der Vehicle2X-Kommunikation können Erkenntnisse vorausfahrender Fahrzeuge ebenfalls berücksichtigt werden. Dabei können auch die Ergebnisse effektbasierter Schätzverfahren, welche ausschließlich das Reibwertpotenzial des aktuellen Fahrzustands eines Fahrzeugs abschätzen, von nachfolgenden Fahrzeugen für eine prädiktive Reibwertschätzung genutzt werden.

Literatur

Abdic, I., Fridman, L., Brown, D. E., Angell, W., Reimer, B., Marchi, E. & Schuller, B. (2016). Detecting road surface wetness from audio: A deep learning approach. In *2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)* (S. 3458–3463). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICPR.2016.7900169

ADAC e.V. (2015). *Pkw im Bremstest nicht zu schlagen: ADAC vergleicht Bremswege verschiedener Fahrzeugklassen / Transporter und Wohnmobil mit mäßigen Ergebnissen*. https://presse.adac.de/meldungen/adac-ev/technik/pkw-im-bremstest-nicht-zu-schlagen.html [30.04.2023]

Ahrenhold, T [T.], Iatropoulos, J [J.], Pethe, C. & Henze, R [R.] (2021). Anforderungen an die Güte, Verfügbarkeit und Vorausschau einer Reibwertschätzung aus Funktionssicht: FAT Schriftenreihe 355.

Ahrenhold, T [Tim], Iatropoulos, J [Jannes], Henze, R [Roman] & Winkler, M. (2022). Potenziale der Fahrbahnzustandsschätzung für mehr Sicherheit in Fahrfunktionen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, *124*(6), 26–31. https://doi.org/10.1007/s35148-022-0863-y

Amthor, M., Hartmann, B. & Denzler, J. (2015). Road Condition Estimation Based on Spatio-Temporal Reflection Models. In J. Gall, P. Gehler & B. Leibe (Hrsg.), *Lecture Notes in Computer Science. Pattern Recognition* (Bd. 9358, S. 3–15). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24947-6_1

ASFT (2015). The Portable T2GO.

Bachmann, T. (1998). *Wechselwirkungen im Prozess der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn*. VDI Verlag.

Besselink, I. J., Schmeitz, A. J. & Pacejka, H. B. (2010). An improved Magic Formula/Swift tyre model that can handle inflation pressure changes. *Vehicle System Dynamics*, *48*(sup1), 337–352. https://doi.org/10.1080/00423111003748088

BMW (2019). BMW G20 Preisliste.

Breuer, B. & Bill, K. H. (2012a). *Bremsenhandbuch*. Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2225-3

Breuer, B. & Bill, K. H. (2012b). *Bremsenhandbuch*. Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2225-3

Breuer, S. & Rohrbach-Kerl, A. (2015). *Fahrzeugdynamik*. Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-09475-1

Brownlee, J. (2021). How to Choose an Activation Function for Deep Learning. https://machinelearningmastery.com/choose-an-activation-function-for-deep-learning/ [30.04.2023]

Bussgeldkataloge.de (2022). Lkw-Reifen: Die Regelungen sind nicht analog zum Pkw. https://www.bussgeldkataloge.de/lkw-reifen/ [30.04.2023]

Cadera, J., Storz, K. & Meyer, A. (2022). *SKM - Seitenkraftmessverfahren*. https://www.bast.de/DE/Strassenbau/Technik/SKM.html [30.04.2023]

Challa, A., Ramakrushnan, K., Subramanian, S. C., Vivekanandan, G. & Sivaram, S. (2020). Analysis Of Thresholds In Rule-Based Antilock Braking Control Algorithms. *IFAC-PapersOnLine*, *53*(1), 404–409. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.06.068

Continental (2020). Nutzfahrzeugreifen: Emmision, Klimaschutz, Effizienz.

Department of Earth Sciences. *Inverse Distance Weighting (IDW)*. https://www.geo.fu-berlin.de/en/v/soga/Geodata-analysis/geostatistics/Inverse-Distance-Weighting/index.html [30.04.2023]

Disynet (2010). Miniature Capacitive Accelerometers: TYPE: DA-Series.

dreamstime. (2022). https://www.dreamstime.com/illustration/mercedes-actros.html [30.04.2023]

DWD (2020a). CDC-OpenData Bereich: Liesmich intro CDC-OpenData.

DWD. (2020b). *Liste der Glättemeldeanlagen (05.06.2020)*. https://www.dwd.de/DE/leistungen/opendata/help/stationen/sws_stations_xls.html [30.04.2023]

DWD (2022a). Dateiformat des WN-Produkts: Deutschlandkomposit der Reektivität - Version 1.04.

DWD (2022b). Radarprodukte. https://www.dwd.de/DE/leistungen/radarprodukte/radarprodukte.html?nn=16102 [30.04.2023]

DWD (2022c). Radarverbund. https://www.dwd.de/DE/derdwd/messnetz/atmosphaerenbeobachtung/_functions/Teasergroup/radarverbund_teaser5.html?nn=16102 [30.04.2023]

DWD Climate Data Center (2019). Aktuelle 10-minütige Stationsmessungen des Luftdrucks, der Lufttemperatur (in 5cm und 2m Höhe), der Luftfeuchte und des Taupunkts in Deutschland.

eMove360. (2017). *Rain, Snow and Ice – Continental Uses Road Condition Detection for Active Driving Safety*. https://www.emove360.com/rain-snow-and-ice-continental-uses-road-condition-detection-for-active-driving-safety/ [30.04.2023]

F. Hecker, S. Hummel, O. Jundt, K.-D. Leimbach, I. Faye, H. Schramm (1997). Vehicle Dynamics Control for Commercial Vehicles. *JOURNAL OF COMMERCIAL VEHICLES*(Vol. 106, Section 2), 693–700.

Frochte, J. (2021). *Maschinelles Lernen: Grundlagen und Algorithmen in Python* (3. Aufl.). *Plus.Hanser-Fachbuch*. Hanser.

Gao, L., Xiong, L., Lin, X., Xia, X., Liu, W., Lu, Y. & Yu, Z. (2019). Multi-sensor Fusion Road Friction Coefficient Estimation During Steering with Lyapunov Method. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *19*(18). https://doi.org/10.3390/s19183816

Gnadler, R. & Marwitz, H. (2004). Neues System zur Ermittlung des Kraftschlusspotenzials im Fahrbetrieb.

Güleryüz, İ. C. & Başer, Ö. (2021). Modelling the longitudinal braking dynamics for heavy-duty vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, *235*(10-11), 2802–2817. https://doi.org/10.1177/09544070211004508

Heimlich, E. (2016). *Untersuchung von fahrdynamischen Einflussgrößen auf die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn in alltäglichen Fahrsituationen.*

Henderson, L. & Cebon, D. (2015). Full-scale testing of a novel slip control braking system for heavy vehicles.

Henderson, L. & Cebon, D. (2016). Full-scale testing of a novel slip control braking system for heavy vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, *230*(9), 1221–1238. https://doi.org/10.1177/0954407015604804

Hentschel System GmbH (2018). Portable Friction Tester 380.02.

Hoepke, E. & Breuer, S. (2016). *Nutzfahrzeugtechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-09537-6

Hoever, C, Kropp & W (2014). Numerische Simulation von Rollgeräusch und Rollwiderstand von LKW-Antriebsachsenreifen.

ISO (2014). ISO_11992-2: Road vehicles - Interchange of digital information on electrical connections between towing and towed vehicles : Part 2: Application layer for brakes and running gear.

ISO (2019). ISO 11992-1: Road vehicles - Interchange of digital information on electrical connections between towing and towed vehicles: Part 1: Physical and data-link layers.

Kalakos, D. & Westerhof, B. (2017). Heavy Vehicle Braking using Friction Estimation for Controller Optimization.

Kevin Townsend (2021). Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor.

Körber, B., Müller, N., Trebeck Matthias & Wunderlich, T. (2021). Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen: FAT-Schriftenreihe 340.

Koskinen, S. & Peussa, P. (2009). Fricti@n: Final Report.

Lajewski, T. (2021). Friction Potential Estimation for Autonomous Driving.

Lajewski, T., Rauh, J. & Müller, S [S.]. (2016). Measuring a reference friction potential by anti-lock braking tests. In M. Bargende, H.-C. Reuss & J. Wiedemann (Hrsg.), *Proceedings. 16. Internationales Stuttgarter Symposium* (S. 419–433). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-13255-2_30

Leschik, C. (2020). Entwicklung eines Schaetzverfahrens mittels Kuenstlicher Neuronaler Netze zur Ermittlung der Zwischenschicht zwischen Reifen und Fahrbahn.

Lex, C. (2015). *Maximum tire-road friction coefficient estimation.* https://doi.org/10.3217/978-3-85125-422-8

M. Kalliris, Stratis Kanarachos, R. Kotsakis, Olivier Haas & Mike Blundell (2019). Machine learning algorithms for wet road surface detection using acoustic measurements. *Proceedings, 2019 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*. http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8712112 [30.04.2023]

MAN. (2022). *Elektronisches Bremssystem (EBS).* MAN. https://www.mantruckandbus.com/de/unternehmen/glossar/elektronisches-bremssystem-ebs.html [30.04.2023]

Manitta, M. & DWD. (2020). *Winterdienstsaison 2020/2021.* DWD. https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2020/10/10.html [30.04.2023]

Minh-Tan Do, Peter G Roe (2008). Tyre and Road Surface Optimisation for Skid Resistance and Further Effects: Report on state-of-the-art of test methods.

Mitschke, M. & Wallentowitz, H. (2014). *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05068-9

mkshb.de. *Wind und Wetter aus der Nachbarschaft mit Netatmo*. https://www.mkshb.de/wind-und-wetter-aus-der-nachbarschaft-mit-netatmo/ [30.04.2023]

Müller, G., Bräsemann, C., Joao, N., Sodoudi, S. & Müller, S [Steffen] (2017). Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen: FAT 299.

Müller, G., Leschik, C., Gregull, V., Sieron, N. & Müller, S [Steffen] (2019). Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen – Umsetzung und Anwendung: FAT 322.

Müller, G. & Müller, S [S.]. (2017). Development of a real time friction estimation procedure. In M. Bargende, H.-C. Reuss & J. Wiedemann (Hrsg.), *Proceedings. 17. Internationales Stuttgarter Symposium* (S. 1281–1292). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-16988-6_96

Müller, G., Thüring, M., Jänsch, M., Epple, S., Kretschmer, F., Gottwald, Y. L., Oehring, F. & Winkenbach, A. (2021). Analyse von glättebedingten Güterkraftfahrzeuge - Unfällen (>12 t zulässiges Gesamtgewicht).

Orgeldinger, S. (2007). Neue Techniken bei Lkw-Reifen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, *109*(11), 1040–1046. https://doi.org/10.1007/BF03221933

Pacejka, H. B. (2006). *Tyre and vehicle dynamics* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Padarthy, M. & Heyns, E. (2019). Identification and Classification of Slippery Winter Road Conditions using Commonly Available Vehicle Variables. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2673*(2), 60–70. https://doi.org/10.1177/0361198118823494

Pingel, S. (2013). Statistische Verfahren zur Auswertung von Klimadaten aus Modell und Beobachtung.

Reif, K. (Hrsg.). (2010). *Bosch-Fachinformation Automobil*. *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme* (1. Aufl.). Vieweg + Teubner. http://swbplus.bsz-bw.de/bsz325728399cov.htm [30.04.2023]

Reif, K. (2015). *Automotive Mechatronics*. Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-03975-2

Robert Basic. (2020). *Die Netatmo-Wetterstation im ausführlichen Test: Eine der bestens verkauften Wetterstationen*. https://www.computerbild.de/artikel/cb-Tests-Freizeit-Die-Netatmo-Wetterstation-im-ausfuehrlichen-Test-23872215.html [30.04.2023]

Robert Bosch GmbH (2002). Bosch Automotive Handbook.

Roychowdhury, S., Zhao, M., Wallin, A., Ohlsson, N. & Jonasson, M. (2018). Machine Learning Models for Road Surface and Friction Estimation using Front-Camera Images. In *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (S. 1–8). IEEE. https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489188

Šabanovič, E., Žuraulis, V., Prentkovskis, O. & Skrickij, V. (2020). Identification of Road-Surface Type Using Deep Neural Networks for Friction Coefficient Estimation. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *20*(3). https://doi.org/10.3390/s20030612

SARSYS-ASFT. *SARSYS-ASFT friction measuring system*. https://www.sarsys-asft.com/measuring-system [30.04.2023]

Schmitz, R. (2019). Road Weather Information System (RWIS) in Germany.

Shirkhani, R. (2023). *Entwicklung eines Fahrdynamikmodells zur Analyse der möglichen Kraftschlussausnutzung von Güterkraftfahrzeugen*. unveröffentlicht.

Sreening Eagle. *Proceq SRT 5800*. https://www.screeningeagle.com/de/products/proceq-srt5800 [30.04.2023]

Statistisches Bundesamt Destatis (2022). Verkehrsunfälle - Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr 2020.

Teke, M. & Duran, F. (2019). The design and implementation of road condition warning system for drivers. *Measurement and Control*, *52*(7-8), 985–994. https://doi.org/10.1177/0020294019858088

Treffs, T. (2021). *Anti-Blockier-System*. http://www.bs-wiki.de/mediawiki/index.php/Anti-Blockier-System [30.04.2023]

Umeno, T. & TOYOTA (2002). Estimation of Tire-Road Friction by Tire Rotational Vibration Model. *MECHANICAL SYSTEMS JOURNAL (2002)*, 1553–1558.

Valk, M. (2022). SWS Stations.

Valk, M. & DWD. Verwertung der Daten von Glättemeldeanlagen (GMA-Daten).

WABCO (2006). ABS/ASR "D" - "Cab" - Version Anti-Lock Braking System for Commercial Vehicles.

WABCO (2011). Das Anti-Blockier-System (ABS) und die Antriebs-Schlupf-Regelung (ASR): 2. Ausgabe.

WABCO (2016). EBS3 - Elektronisches Bremssystem, Systembeschreibung.

Wangenheim, M., Lind, H., Linke, T. & Lecking, D. (2016). Portable friction tester: Development of a new lab-scale test system for testing tire-road friction on roads. *Tire Technology International 2016*, *2016*, 64–66.

Weber, I., Pruckner, A. & Winner, H [H.] (2002). Reibwertangepasste Regelstrategien bei Bremsmanövern im Kraftfahrzeug. *4. Darmstädter Reifenkolloquium*, 151–168.

Weigl, E. (2021). RADOLON/RADVOR: Hoch aufgelöste Niederschlagsanalyse und –vorhersage auf der Basis quantitativer Radar- und Ombrometerdaten für grenzüberschreitende Fluss-Einzugsgebiete von Deutschland im Echtzeitbetrieb.

Weigl, E. (2023a). RADOLAN Produktübersicht.

Weigl, E. (2023b). RADOLAN-Kurzbeschreibung.

Winner, H [Hermann], Hakuli, S., Lotz, F. & Singer, C. (2015). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3

Bilder

Abbildung 1: Reibwert-Schlupf-Diagramm (Reif, 2010), links: 1) trockener Beton, 2) nasser Asphalt, 3) lockerer Schnee, 4) nasses Glatteis, rechts: Haftreibungszahl und Seitenkraftbeiwert in Abhängigkeit von Bremsschlupf und Schräglaufwinkel α blaue Fläche: ABS Regelbereiche

Abbildung 2: Fahrbahnreibwertbereiche einer trockenen, nassen, schnee- und eisbedeckten Fahrbahn (T. Ahrenhold et al., 2021)

Abbildung 3:Aufbau des Radialreifens(Continental, 2020), 1) Lauffläche, 2) Mehrlagenstahlgürtel, 3) Stahlkarkasse, 4) Innenseele, 5) Seitenwand, 6) Wulstverstärker, 7) Wulstkern

Abbildung 4: Profile von Nutzfahrzeugreifen (Hoepke & Breuer, 2016), a) für nicht angetriebene Räder, b) für angetriebene Räder

Abbildung 5: EBS-Systemskomponenten (MAN, 2022)

Abbildung 6: Kommunikationsaustausch zwischen Zugfahrzeug und Anhänger nach ISO 11992 (Körber et al., 2021)

Abbildung 7: Bremswege verschiedener Fahrzeugklassen nach (ADAC e.V., 2015)

Abbildung 8: Bestimmung der Achslasten eines Sattelzuges beim Bremsen (Hoepke & Breuer, 2016)

Abbildung 9: Schematische Aufbau des Simulationsmodells (Shirkhani, 2023)

Abbildung 10: Validierung des Simulationsmodells anhand realer Messdaten von Vollbremsungen mit einem halbvoll beladenen Versuchs-Lkw bei Ausgangsgeschwindigkeiten von 30 und 60 km/h (Shirkhani, 2023)

Abbildung 11: Simulationsergebnisse der Radaufstandskraft, der Reifenlängskraft und des Reibwerts für eine Lkw-Vollbremsung aus 60 km/h im halbvollen Beladungszustand (Shirkhani, 2023)

Abbildung 12: Versuchsfahrzeuge Mercedes-Benz Actros und BMW 330e

Abbildung 13: Einbauort des 3-axialen Beschleunigungssensors

Abbildung 14: Messtechnik im Versuchs-Lkw, Skizze nach (Dreamstime, 2022)

Abbildung 15: Messtechnik im Versuchs-Pkw, Skizze nach (BMW, 2019)

Abbildung 16: Vergleich Drehgeschwindigkeiten ADMA und BNO055 im Versuchs-Pkw

Abbildung 17: Vergleich Längsbeschleunigung ADMA und BNO055 im Versuchs-Pkw

Abbildung 18: Messstrecke für die Versuchsdurchführung im Straßenverkehr, die einzelnen Bremspunktbereiche sind rot markiert, © OpenStreetMap

Abbildung 19: Erste Reibwertpotenzial-Messungen mit dem unbeladenen Sattelzug

Abbildung 20: Langstreckenanbindung DEKRA-Testgelände am Lausitzring mit den Bremspunkten 1-3, © OpenStreetMap

Abbildung 21: Reibwertpotenzialmessung auf der bewässerten ABS-Strecke in Klettwitz

Abbildung 22: Versuchsdurchführung auf der ABS-Strecke in Klettwitz

Abbildung 23: Beladungsversuche auf der Langstreckenanbindung (11.01.22 Klettwitz)

Abbildung 24: Radgeschwindigkeit des Zugfahrzeugs eines unbeladenen Sattelzugs

Abbildung 25: Krone-Auflieger für die weitere Versuchsdurchführung

Abbildung 26: Vergleichsmessung Auflieger Schmitz Cargobull (links) Krone Auflieger (rechts) bei halbvollem Beladungszustand

Abbildung 27: Halbvoller Beladungszustand des Krone Aufliegers

Abbildung 28: Reibwertpotenzial-Klassen des Versuchs-Pkws

Abbildung 29: Reibwertpotenzialdatenbank für Lkw und Pkw; trocken (Lkw: 269, Pkw: 282), feucht (Lkw: 71, Pkw: 76), nass (Lkw: 187, Pkw: 199), verschneit/vereist (Lkw: 14, Pkw: 15)

Abbildung 30: Boxplot Darstellung der Reibwertklassen auf asphaltierten Straßenoberflächen für den Versuchs-Pkw und -Lkw

Abbildung 31: Übersicht der untersuchten standardisierten Messverfahren: 1) SKM (Cadera et al., 2022), 2) SRT (Sreening Eagle), 3) T2GO, 4) Grip Tester, 5) PFT (Wangenheim et al., 2016)

Abbildung 32: Vergleich zwischen den Ergebnissen standardisierter Messverfahren und der gemessenen Reibwertpotenzialausnutzung der Versuchs-Fahrzeuge bei trockener und nasser Fahrbahn

Abbildung 33: Vergleich zwischen den Messergebnissen des SKM-Verfahrens und des Grip Testers mit der gemessenen Reibwertpotenzialausnutzung der Versuchs-Fahrzeuge auf nasser Fahrbahn

Abbildung 34: Mathematisches Modell eines Neurons (links) und KNN mit einem Hidden-Layer (rechts) (Frochte, 2021)

Abbildung 35: Aktive Messstationen im Umkreis von Berlin (Stand: 10.03.2023): DWD-Klimastationen (rot), GMA (blau), Netatmo (grün); © OpenStreetMap

Abbildung 36: Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2022c)

Abbildung 37: Interpolation der Wetterdaten umliegender DWD-Klimastationen

Abbildung 38: Gegenüberstellung der anhand der Daten der umliegenden DWD-Klimastationen interpolierten Wetterparameter mit den entsprechenden am Fahrzeug gemessenen Daten

Abbildung 39: Vergleich zwischen WN- und YW-Produkt für den 05.12.2022 10:00 (UTC)

Abbildung 40: Lkw-Reibwertkarte für den 02.02.2023 um 12:15 inklusiver der zu dieser Zeit erhobenen Messergebnisse, © OpenStreetMap

Abbildung 41: Systemarchitektur des Echtzeitschätzers

Abbildung 42: Funktionsarchitektur des Echtzeitsystems

Abbildung 43: Reibwertpotenzialschätzung unter Berücksichtigung der 3 Zwischenschichtklassen trocken, feucht/nass, verschneit/vereist für den Ort und Zeitpunkt aller durchgeführten Messungen mit dem Versuchs-Lkw

Abbildung 44: Beladungsversuche auf der Langstreckenanbindung unter Berücksichtigung der verschiedenen Bremspunkte (11.01.22 Klettwitz)

Tabellen

Tabelle 1: Bereifung Krone Auflieger

Tabelle 2: Konfusionsmatrix des neuronalen Netzes für die Klassifikation von drei

Zwischenschichtzuständen bei Anwendung auf den Testdatensatz mit 1672 Datenpunkten; grün: true positive, rot: false negative, gelb: false positive

Tabelle 3: Bewertungsmetriken des neuronalen Netzes für die Klassifikation von drei Zwischenschichtzuständen

Anhang

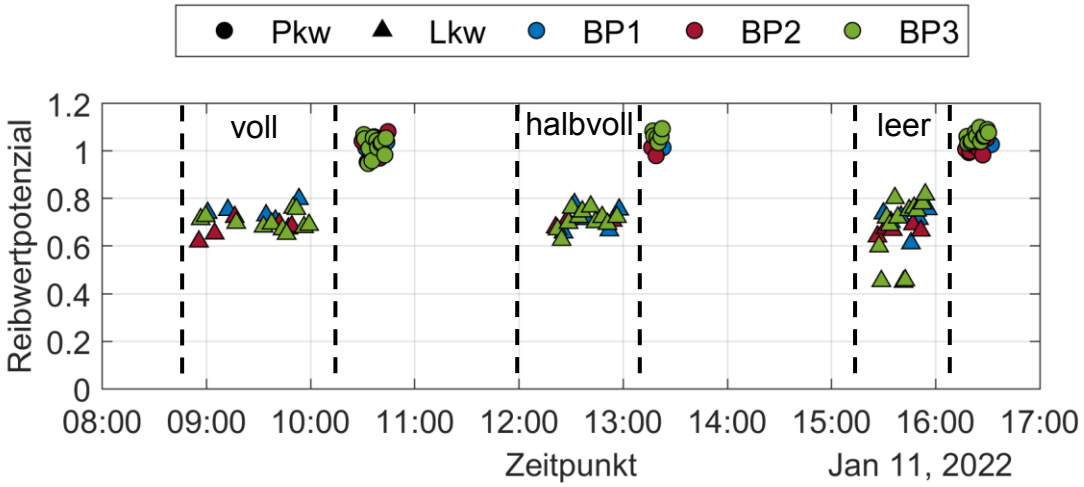

Abbildung 44: Beladungsversuche auf der Langstreckenanbindung unter Berücksichtigung der verschiedenen Bremspunkte (11.01.22 Klettwitz)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2023

F 150: Fahrerassistenzsysteme für die Geschwindigkeitsreduzierung bei schlechten Bedingungen
Pohle, Günther, Schütze, Trautmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 151: Integration von öffentlichem und privatem Parkraummanagement
Höpping, Jonas, Becker, Krüger, Freudenstein, Krampe, Godschachner, Inninger, Scholz, Hüttner, Grötsch, Stjepanovic
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 152: On-Board-Diagnose (OBD) – Analyse der OBD in Bezug auf zukünftig verfügbare Emissionsdaten für die Periodische Technische Inspektion (PTI)
Hausberger, Matzer, Lipp, Blassnegger, Hametner, Prosenc
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2024

F 153: Zusammenstellung geeigneter Sicherheitsindikatoren für die Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion von Level 3 Systemen
Yan, Pichen, Schmitz, Sklorz, Baumann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 153b: Compilation of suitable safety indicators for the evaluation of Human-Machine Interaction of level 3 systems
Yan, Pichen, Schmitz, Sklorz, Baumann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 154: Systematisierung geeigneter fahrfremder Tätigkeiten für automatisiertes Fahren von schweren Güterkraftfahrzeugen
Flämig, Beck, Hoffmann, Tjaden, Höger, Brandt, Haase, Wolter, Müller, Damer, Hettich, Schnücker
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 155: Handbuch Rollstuhlbeförderung bei Ausschreibungen
Boenke, Deuster
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 156: Entwicklung eines Konzepts und Lastenheftes für eine Szenariendatenbank zur Bewertung der Sicherheitswirkung hochautomatisierter Fahrfunktionen
Klinge, Krampitz, Ehrich, Siemon, Wiegand, Lassowski, Stavesand, Simon
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 157: Statistischer und methodischer Ansatz zur Erhebung vertiefter Verkehrsunfalldaten
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 158: Wissenschaftliche Begleitung der Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr
Unger, Grosche, Rößler, Uhlenhof, Bierbach, Huster, Panwinkler, Straßgütl, Suing, Zelazny
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 159: Pilotprojekt zu Emissionsmessungen mittels Remote Sensing Devices
Hager, Kathmann, Brandt, Roggendorf, Scharrenbroich, Borken-Kleefeld
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2025

F 160: Verbesserte Unfallrekonstruktion durch zusätzliche Anknüpfungstatsachen und KI
Breitlauch, Erbsmehl, Schramm, Urban, Hauck, Sinen, Espig, Walter, Jänsch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 161: Datenverknüpfung zur Erfassung von Fahrzeugausstattungen in GIDAS
Rößler, Uhlenhof
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 162: Motorrad Kurven-ABS MOKABS
Erlinger, Kraut, Tomasch, Ausserer, Rieß, Kaufmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 163a: Anhänger mit elektrisch angetriebener Unterstützungsachse
Seiniger, Bierbach, Bartels, Gail
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 163b: Trailers with an electrically powered support axle
Seiniger, Bierbach, Bartels, Gail
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 164: Methodenstudie zur Konzeption der Fahrleistungserhebung 2026
Bäumer, Pfeiffer, Kathmann, Müller, Wyrich, Eisenmann, Nobis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

F 165: Prognose des Kraftschlusspotenzials bei schweren Güterkraftfahrzeugen (> 12 t zGG.)
Büteröwe, Müller
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
www.schuenemann-verlag.de
Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

ISSN 0943-9307
ISBN 978-3-95606-854-6
https://doi.org/10.60850/bericht-f165

www.bast.de