

**Ein Beitrag zur Erfassung des Fahrbahnzustands und dessen Validierung**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Sebastian Staiger

aus

Villingen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dieter Schramm  
Korreferent: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Plöchl

Tag der mündlichen Prüfung: 29.01.2024



## Vorwort

Hiermit bedanke ich mich bei allen, die mich im Rahmen meiner Arbeit und der Erstellung dieser Dissertation unterstützt haben.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dieter Schramm für die wissenschaftliche Betreuung. Seine Unterstützung, die konstruktiven Gespräche und seine Anmerkungen waren sehr wertvoll bei der Erstellung dieser Arbeit. Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Prof. Manfred Plöchl für die Übernahme des Korreferats. Die hilfreichen und vor allem anregenden Diskussionen lieferten einen neuen zusätzlichen Blickwinkel auf meine Arbeit.

Ein weiterer Dank gilt auch allen Kolleginnen und Kollegen der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, die mir immer mit Rat zur Seite standen. Dabei war vor allem die Unterstützung aus den Bereichen der Fahrwerksentwicklung und Gesamtfahrzeugentwicklung sehr wichtig für die ersten Ansätze, die spätere Umsetzung und die Absicherung in den Fahrzeugen. In diesem Zusammenhang bedanke ich mich auch bei allen mitarbeitenden Studenten.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden. Sie haben mich über den langen Zeitraum stets unterstützt, motiviert und ermutigt.

Sebastian Staiger

Neuhausen, im Juli 2023.



## Kurzfassung

Im Straßenverkehr sind der Straßenzustand und die damit verbundene Haftungsmöglichkeit eines Fahrzeuges wesentliche Faktoren. Diese können mit dem Reibwert zwischen Reifen und Straße beschrieben werden. Dieser Wert ist maßgeblich verantwortlich für das Übertragungsverhalten von Kräften zwischen Fahrzeug und Fahrbahn. Anhand von Unfallstatistiken kann gezeigt werden, dass eine Vielzahl der Unfälle aufgrund eines geringen Reibwerts oder schlechten Straßenzustands stattfinden. Daher ist es für zukünftige Fahrerassistenzsysteme, die in Richtung autonomes Fahren gehen, unabdingbar, diesen Wert zu kennen. Auf der Grundlage dieser Informationen kann das Fahrzeug selbstständig die Geschwindigkeit oder das Bremsverhalten an den Fahrbahnzustand anpassen. Zu der Erfassung des Reibwerts existiert bereits eine Reihe von wissenschaftlichen Arbeiten, deren Ergebnisse sich aber noch in keinem seriennahen Fahrzeug etablieren konnten. Des Weiteren werden in den vorliegenden Arbeiten ausgeführt, dass es im Rahmen der Absicherungsstrategie Forschungslücken existieren.

Daher ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, auf Basis des aktuellen Stands der Technik und Wissenschaft ein Konzept zu der Erfassung des Reibwerts und eine Methode zu der Absicherungsstrategie zu entwickeln. Diese soll mit einem Serienfahrzeug in realen Straßenfahrten erprobt und abgesichert werden. Bei der Erfassung des Reibwerts werden verschiedene Sensoren, die bereits in einem Serienfahrzeug verbaut sind, in Bezug auf den Reibwert bewertet. Aus den Sensoren, die einen Einfluss auf den Reibwert haben, wird ein vernetztes mechatronisches System mit Fokus auf die Signalerhebung, Verarbeitung und dessen Fusion erforscht. Ein Verifizierungskonzept wird anhand von relevanten Kunden-Use-Cases, Experteninterviews erforscht und erstellt. Unter der Anwendung einer Nutzwertanalyse wird eine Fahrzeugfunktion ausgewählt, anhand derer die Verifikation durchgeführt wird. Nach heutigem Stand der Technik können Systeme, die auf funktioneller Basis beschrieben sind und selbstständig die Fahraufgabe übernehmen, mit den vorhandenen Methoden nicht effektiv abgesichert werden. Daher wird im Verlauf dieser Arbeit eine Verifikations- und Validierungsstrategie erarbeitet.

Die abschließende Validierung erfolgt mit mehreren Versuchsfahrten auf öffentlichen Straßen. Der Streckenverlauf wurde anhand der erstellten Kunden-Use-Cases so gewählt, dass ein möglichst breites Kundennutzungsprofil abgefahren wird. Die Ergebnisse daraus werden verwendet, um den Schätzalgorithmus iterativ zu verbessern. Abschließend werden die Ergebnisse gewürdigt und Handlungsfelder für weitere wissenschaftliche Arbeiten aufgezeigt.

## Abstract

In road traffic, the road condition and the relating adhesion of a vehicle are the essential factors. These can be described by the coefficient of friction between the tire and the road. This value is largely responsible for the transfer behavior of forces between the vehicle and the road. Accident statistics show that a large number of accidents occur due to a low coefficient of friction or poor road conditions. Therefore, it is essential to know this value for future driver assistance systems moving towards autonomous driving. Based on this information, the vehicle can independently adapt its speed or braking behavior to the road condition. A number of scientific studies have already been carried out on the measurement of the friction coefficient, but the results have not yet been established in a vehicle that is close to series production. Furthermore, the present work states that there are research gaps in the context of the safeguarding strategy.

Therefore, the target of this present study is to develop a concept for the measurement of the friction coefficient and a method for the protection strategy on the basis of the current state of the art and science. This is going to be tested and validated with a series-produced vehicle in real road tests. When recording the coefficient of friction, various sensors that are already installed in a series-produced vehicle are evaluated in relation to the coefficient of friction. From these sensors that have an influence on the friction coefficient, a networked mechatronic system is being researched with a focus on signal collection, processing and its fusion. A verification concept will be researched and created based on relevant customer use cases and expert interviews. Using a utility analysis, a vehicle function is selected on the basis of which the verification is performed. According to the current state of the art, systems that are described on a functional basis and independently perform the driving task cannot be effectively validated using existing methods. Therefore, a verification and validation strategy will be developed over the course of this work.

The final validation is done with several test drives on public roads. The route was chosen on the basis of the customer use cases in order to cover a customer usage profile as broad as possible. The results are used to iteratively improve the estimation algorithm. Finally, the results are acknowledged and fields of action for further scientific work are identified.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	III
Kurzfassung.....	V
Abstract .....	VI
Inhaltsverzeichnis .....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis .....	XIV
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
Nomenklatur .....	XVII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ziel und Aufbau der Arbeit.....	3
1.2 Problemstellung.....	5
1.3 Stand der Technik .....	6
2 Reifen, Fahrbahn und Reibwert.....	12
2.1 Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn .....	13
2.2 Fahrbahn .....	24
2.3 Zwischenmedium „Fahrbahnnässe“ .....	25
2.4 Geschwindigkeit und Temperatur .....	27
2.5 Reibwertermittlung.....	28
2.5.1 Lokale Reifeneffekte .....	32
2.5.2 Globale Radeffekte .....	32
2.5.3 Globale Fahrzeugeffekte.....	34
2.5.4 Optische Sensoren .....	35
2.5.5 Akustische Sensoren .....	36
2.5.6 Thermische Sensoren .....	36
2.5.7 Weitere wissenschaftliche Ausarbeitungen zur Reibwertschätzung .....	37
2.5.8 Fazit Stand der Technik .....	39
3 Grundlagen mechatronischer Systeme .....	40
3.1 Methodische Entwicklung mechatronischer Systeme.....	41

---

3.2	Produktentstehungsprozess mechatronischer Fahrwerkssysteme.....	44
3.2.1	Integration Steuergeräte, Hardware-Musterstände und Fahrzeugphasen .....	50
3.2.2	Freigaben.....	50
3.3	Grundlagen der Signalverarbeitung.....	51
3.3.1	Signalerfassung und Verarbeitung.....	51
3.3.2	Filterverfahren.....	53
3.3.3	Signalverarbeitung im Fahrzeug .....	58
3.3.4	Modellierung der Signale im Zustandsraum.....	60
3.4	Sensoren, Signalverarbeitung und mögliche Methoden zur Reibwertermittlung .....	62
3.4.1	Relevante Sensoren für die Erfassung der Umgebung.....	62
3.4.2	Fehlerarten und Zuverlässigkeit von Sensoren für das Kraftfahrzeug ...	64
3.4.3	Sensordatenfusion .....	67
4	Identifikation der Anforderungen .....	70
4.1	Use Case – Funktionsbeschreibung.....	71
4.2	Situationskatalog und Nutzwertanalyse.....	77
4.3	Reibwertinformation für die dynamische Längsregelung .....	79
4.4	Äquivalenzklassen der Reibwertschätzung .....	80
4.4.1	Sicherer Abstand .....	82
4.5	Sicherheitsanforderungen .....	91
4.5.1	Funktionale Sicherheit .....	93
4.5.2	Safety of the Intended Functionality.....	100
4.5.3	Best Practices.....	105
4.6	Ableitung der Anforderungen anhand Unfallanalysen .....	107
4.7	Fazit und technische Anforderungen .....	114
5	Methodik und weitere Vorgehensweise .....	116
5.1	Umsetzung .....	118
5.2	Funktionsbeschreibung und Algorithmus.....	119
5.2.1	Schnittstellen Eingangsdaten und Datentransfer .....	120
5.2.1	Aufbereitung des Referenzreibwertes.....	122
5.2.2	Modi-Manager.....	123
5.2.3	Fuzzy-Logik.....	124

---

5.2.4	Neuro-Fuzzy-Ansatz .....	126
6	Verifizierung und Validierung.....	129
6.1	V&V-Strategie.....	130
6.1.1	Statistische Tests.....	130
6.1.2	Szenariobasierte Versuche .....	131
6.1.3	Analyse von Kundenszenarien.....	133
6.2	Versuchsaufbau.....	133
6.2.1	Sensorik und Fusionsalgorithmus.....	133
6.2.2	Versuchsfahrzeuge .....	135
6.2.3	Referenzreibwert.....	136
6.3	Versuchsfahrten auf öffentlichen Straßen .....	137
6.3.1	Methodik der Datenerhebung.....	137
6.3.2	Auswertung der erhobenen Messdaten .....	139
6.3.3	Bewertung der Güte des Reibwertschätzers auf Autobahnen .....	149
6.4	Verifizierung des $\mu$ -Sprung-Szenarios.....	151
7	Zusammenfassung .....	156
7.1	Wissenschaftlicher Beitrag .....	157
7.2	Risikobilanz des Systems.....	158
7.3	Maßnahmen zur Verbesserung der Risikobilanz.....	159
7.4	Maßnahmen zur Verbesserung der V&V-Strategie .....	159
8	Literaturverzeichnis .....	163
9	Anhang.....	175

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Automatisierungsstufen nach SAE J3016 (Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) 2015) .....	1
Abbildung 1.2: Verteilung der Unfälle über Fahrbahnzustände (DESTATIS, 2021).....	2
Abbildung 1.3: SPA-Modell für HAF-Fahrzeuge adaptiert nach (Wood et al. 2019) .....	3
Abbildung 1.4: Anteil der Fahrzeuge mit Automatisierungsfunktion an den Neuzulassungen (Altenburg et al. 2018) .....	7
Abbildung 1.5: Bestandsdurchdringung bis 2050: Gesamtbestand (Altenburg et al. 2018).....	7
Abbildung 1.6: Exemplarische Darstellung von Sensoren in einem Fahrzeug (Porsche AG) ..	9
Abbildung 1.7: Fusionsmodell unter Berücksichtigung externer Informationen (Heizmann, et al., 2014) .....	11
Abbildung 2.1: Aufbau eines Radialreifens (Schramm, et al., 2018).....	13
Abbildung 2.2: Wirkende Kräfte zwischen Reifen und Fahrbahn .....	14
Abbildung 2.3: Hysterese- und Adhäsionsreibung, Kontakt von Reifen zu Fahrbahn (Schramm, et al., 2018).....	15
Abbildung 2.4: Verlauf von Verlustfaktor $\tan \delta$ über der Temperatur, für zwei Reifenmischungen, deren Kraftschluss auf nasser Straße und Rollwiderstand (Breuer, et al., 2017).....	16
Abbildung 2.5: Reibwert-Schlupf-Kurve (Klempau, 2003).....	18
Abbildung 2.6: Schubspannungen im Reifenlatsch (Fach, 2008) .....	19
Abbildung 2.7: Orientierungen, Kräfte und Momente am Reifen.....	20
Abbildung 2.8: Eingangs- und Ausgangswerte für ein Reifenmodell und gerader Straße .....	21
Abbildung 2.9: Kräfte und Momente am Rad, Erklärung Rollwiderstand (Schramm, et al., 2018).....	21
Abbildung 2.10: Magic Formula-Koeffizienten, Beschreibung einer Kennlinie .....	23
Abbildung 2.11: Wellenlängenspektrum der Oberflächenbeschaffenheit von Fahrbahnen (Klempau 2003).....	24
Abbildung 2.12: MARWIS Sensor, Firma Lufft GmbH.....	25
Abbildung 2.13: Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwerts (Gnadler, et al., 1995) .....	27
Abbildung 2.14: Temperaturabhängige Reibwerte (Klempau 2003) .....	28
Abbildung 2.15: Methoden zur Reibwertschätzung .....	29
Abbildung 2.16: Überblick der effektbasierten Verfahren zur Reibwertschätzung (Acosta, et al., 2017) .....	31
Abbildung 2.17: Reifensensor (li) und Signalausgabe bei verschiedenen Bremskräften (re), (Breuer, et al., 2017).....	32
Abbildung 2.18: Simulierte Zahnstangenkraft über Querschleunigung (Schmiedel, 2014) .....	33
Abbildung 2.19: Bremsdruckverlauf, Geschwindigkeitsabbau bei einer ABS-Bremung (Breuer, et al., 2017) .....	34
Abbildung 2.20: Mikroschlupf (Dieckmann, 1992).....	34

---

Abbildung 2.21: Globale Reibwertschätzung auf Fahrzeugebene (Witte, et al., 1995).....	35
Abbildung 3.1: Bestandteile der Mechatronik nach (Heimann, et al., 2016) .....	41
Abbildung 3.2: Mechatronisches System als Regelstrecke (Isermann, 2006) .....	42
Abbildung 3.3: V-Modell der Produktentstehung (Filler, 2019).....	43
Abbildung 3.4: Produktentstehungsprozess mechatronische Systeme (Porsche, 2017).....	45
Abbildung 3.5: Use-Case-orientiertes V-Modell (Porsche-AG, 2019) .....	46
Abbildung 3.6: Funktionaler Produktentwicklungsprozess (Porsche-AG, 2019) .....	49
Abbildung 3.7: Aufbau Sensorelement (Hering, et al., 2018).....	51
Abbildung 3.8: Systemgedanke „Black Box“ Eingangs- zu Ausgangssignal (Meyer, 2017) ..	52
Abbildung 3.9: A/D-Wandlung eines Signals mit Klassifizierung (Meyer, 2017) .....	53
Abbildung 3.10: System mit Filter (Meyer, 2017) .....	54
Abbildung 3.11: Maximalwertfilter für ein Reibwertsignal (Staiger, et al., 2019) .....	56
Abbildung 3.12: Modellierung des Kalman-Filters (Marchthaler, et al., 2017).....	58
Abbildung 3.13: Bussystem im Fahrzeug (Zimmermann, et al., 2014) .....	59
Abbildung 3.14: Der Regelkreis (Zacher, et al., 2017) .....	60
Abbildung 3.15: Wirkungsplan eines Systems mit Beobachter (Zacher, et al., 2017).....	61
Abbildung 3.16: Sensoren für Abstandserfassung (Reif, 2010) .....	62
Abbildung 3.17: Fehlerarten von Sensoren (Heimann, et al., 2016) .....	64
Abbildung 3.18: Verteilung Ausfallrate über Zeit (Reif, 2016) .....	66
Abbildung 4.1: User-Story – HAF-System mit Umweltinformation. In Anlehnung an (Porsche-AG, 2019) .....	72
Abbildung 4.2: Erstellung eines Epic (Porsche AG, 2018).....	74
Abbildung 4.3: Funktionale Architektur des Reibwertschätzers .....	76
Abbildung 4.4: Funktionsprinzip Umsetzung in Steuergerät ACC (Winner, et al., 2021) .....	79
Abbildung 4.5: Bremsweg bei unterschiedlichen Reibwerten .....	80
Abbildung 4.6: Darstellung des Kamm'schen Reibkreises.....	82
Abbildung 4.7: Vollbremsung, Sensitivität Reibwert – Bremsweg über Geschwindigkeit .....	84
Abbildung 4.8: Zulässige Verzögerung ACC nach ISO 15622.....	85
Abbildung 4.9: Sicherer Abstand (A) und unsicherer Abstand (B) .....	86
Abbildung 4.10: ACC-Bremsverlauf aus 130 km/h bei konstantem Ruck und max. Reibwert 0,8 .....	87
Abbildung 4.11: Bremskinematik des Ego-Fahrzeugs aus 130 km/h für verschiedene Reibwerte .....	89
Abbildung 4.12: Sichere Abstände für das Auffahren auf bremsenden LKW (80 km/h) über die Ausgangsgeschwindigkeit.....	90
Abbildung 4.13: Sichere Abstände für das Auffahren auf stationäres Hindernis über die Ausgangsgeschwindigkeit.....	90
Abbildung 4.14: Zeitliche Abfolge fault, error und failure.....	94
Abbildung 4.15: Bewertung der Indikatoren E, C und S.....	98

Abbildung 4.16: Einordnung einer ASIL-Klassifizierung und Reduktion des Risikos auf ein akzeptables Niveau .....	100
Abbildung 4.17: Differenzierung FuSi und SOTIF nach (Vector Informatik, 2019).....	101
Abbildung 4.18: Klassifikation der Szenarien und Zielbild nach SOTIF (ISO/PAS 21448:2019).....	102
Abbildung 4.19: SOTIF-Prozess nach (ISO/PAS 21448:2019).....	103
Abbildung 4.20: Dauerlaufleistung zur Absicherung von Ereignissen über die Auftretenswahrscheinlichkeit (t-Test mit gegebenem Konfidenzniveau, Nullhypothese: Der Mensch fährt sicherer als das HAF) .....	109
Abbildung 4.21: Summe Unfälle mit Personenschaden und Ursache niedriger Reibwert in Deutschland 2009–2019, Datenquellen: (Destatis, 2021).....	110
Abbildung 4.22: Jährliche Verkehrstote in Deutschland (Destatis, 2021) .....	111
Abbildung 4.23: Anteilige Unfallzahlen auf Autobahnen nach Unfallschwere und Reibwert (Destatis, 2021).....	112
Abbildung 4.24: Gegenüberstellung der Häufigkeiten von Unfällen mit Personenschaden ohne und mit Einfluss des Reibwerts nach Straßentyp (Destatis, 2021) ....	113
Abbildung 4.25: Vorgehensmodell der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an SOTIF .....	114
Abbildung 5.1: Sicherheit über Verfügbarkeit einer Funktion nach (Wood et al. 2019).....	117
Abbildung 5.2: Aufbau des Simulink-Modells .....	120
Abbildung 5.3: Schnittstellen, Eingangsdaten und Filter .....	121
Abbildung 5.4: Schnittstelle zu CANape.....	121
Abbildung 5.5: Bildung des Referenzreibwerts .....	122
Abbildung 5.6: Modi-Manager/Zustandsautomat zur Reibwertschätzung .....	123
Abbildung 5.7: Fuzzy-Logik – Zugehörigkeitsfunktion Wischermotor.....	124
Abbildung 5.8: Fuzzy-Logik – Zugehörigkeitsfunktion Nässesensor.....	125
Abbildung 5.9: Reibwert in Abhängigkeit von Außentemperatur und Nässelevel .....	126
Abbildung 5.10: Vergleich Netzstrukturen nach grid-partitioning (li) und subtractive clustering (re) .....	127
Abbildung 5.11: Auswertung einer Messung mit einer Neuro-Fuzzy-Logik.....	128
Abbildung 6.1: Porsche 911 Carrera 4S (Typ 992), Versuchsaufbau und Schnittstelle .....	134
Abbildung 6.2: Verknüpfung von Messfunktion und Simulink-Modell in CANape .....	135
Abbildung 6.3: Versuchsfahrzeuge – 911 Carrera 4S (Typ 992) .....	135
Abbildung 6.4: Geschätzter Reibwert (1), ausgenutzter Reibwert (2), Fahrzeuggeschwindigkeit in km/h (3).....	137
Abbildung 6.5: Visualisierung Schätzreibwert (1).....	138
Abbildung 6.6: Data-Mining-Interface.....	139
Abbildung 6.7: Beispielhafte Routen der Versuchsfahrten.....	140
Abbildung 6.8: Darstellung des genutzten (l.) und des geschätzten (r.) Reibwerts über die Strecke .....	141
Abbildung 6.9: ABS-Regelbremsung und Referenzkamerabild .....	141
Abbildung 6.10: Boxplot – Perzentile aller erhobenen Referenzwerte .....	142

---

Abbildung 6.11: Reibwerte über Nässelevel und Wischergeschwindigkeit .....	143
Abbildung 6.12: Referenzreibwerte über Temperatur, $R=0,28$ .....	144
Abbildung 6.13: Referenzreibwerte über Geschwindigkeit, $R=0,554$ .....	144
Abbildung 6.14: Klassifizierung der erfassten Reibwerte .....	145
Abbildung 6.15: Aufteilung der Datenpunkte auf die Äquivalenzklassen .....	146
Abbildung 6.16: Boxplot – Perzentile Referenzwerte auf Autobahnen.....	149
Abbildung 6.17: Referenzreibwerte über Temperatur .....	150
Abbildung 6.18: Referenzreibwerte über Geschwindigkeit.....	150
Abbildung 6.19: Kreisbahn Porsche AG; bewässerter Abschnitt in blau, Anfahstrecke in schwarz, Verzögerungsstrecke in rot .....	151
Abbildung 6.20: Prüfgelände Porsche AG, Bewässerter Streckenabschnitt .....	152
Abbildung 6.21: Prüfgelände Porsche AG, Übergangsbereich trocken zu nass (l), Wasserfilm Fahrbahn (r).....	153
Abbildung 6.22: Aufzeichnung Messfahrt auf dem Prüfgelände .....	154
Abbildung 7.1: Ebenensystem für Szenarien nach (Pegasus Project 2019).....	160
Abbildung 7.2: Optimierung der V&V-Strategie .....	161
Abbildung 9.1: Versuchsfahrzeug (Porsche-AG, 2019) .....	175
Abbildung 9.2: Fuzzifizierung Eingangsgrößen .....	182
Abbildung 9.3: Elemente des Fuzzy Reglers .....	183

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Gliederung der Arbeit .....	4
Tabelle 1.2: Anwendungsbewertung verschiedener Sensoren .....	10
Tabelle 2.1: Ursachenbasierte Ansätze zur Reibwertschätzung .....	30
Tabelle 3.1: Ansätze zur Datenfusion .....	68
Tabelle 4.1: Funktions- und Eigenschaftsableitung aus Epic .....	73
Tabelle 4.2: Vergleich der Eignung verschiedener Sensorik für Inputgrößen zur Fahrbahnzustandsbestimmung .....	74
Tabelle 4.3: Kurzfassung Funktionsbeschreibung .....	75
Tabelle 4.4: Nutzwertanalyse aus SitKat .....	78
Tabelle 4.5: Matrix: kritische Fehler und störende Fehler in Bezug auf die Reibwertschätzung .....	81
Tabelle 4.6: Normative und rechtliche (blau) Vorgaben für automobiler Sicherheitssysteme nach Ursprung des Sicherheitsrisikos .....	92
Tabelle 4.7: Definition des Schadensausmaßes .....	95
Tabelle 4.8: Eintrittswahrscheinlichkeit .....	96
Tabelle 4.9: Definition Fahrzeugbeherrschbarkeit durch den Fahrer, bei Eintreten eines Fehlers .....	97
Tabelle 4.10: Die zwölf Prinzipien des automatisierten Fahrens .....	105
Tabelle 4.11: Versuchsplattform für jeweilige Architekturelemente und Versuchszweck .....	107
Tabelle 4.12: Gemittelte Fahrleistung, Unfälle mit Personenschaden und Verkehrstote im Straßenverkehr in Deutschland, Mittelwerte der Jahre 2015 bis 2019 .....	108
Tabelle 5.1: Regelbasis, Bedingungen für Eingangsgrößen und gewichtete Konklusion für den Reibwert .....	125
Tabelle 6.1: Mögliche Äquivalenzklassen für externe Einflussparameter .....	132
Tabelle 6.2: Szenarientabelle zur Identifikation von Reibwertsprüngen .....	132
Tabelle 6.3: Bewertung der Güte des Reibwertschätzers auf allen Fahrbahntypen .....	147
Tabelle 6.4: Relative Häufigkeiten – störende und kritische Fehler .....	147
Tabelle 6.5: Aufprallgeschwindigkeiten nach Fehlerart .....	148
Tabelle 6.6: Bewertung der Güte des Reibwertschätzers auf Autobahnen .....	150
Tabelle 6.7: Auswertung Datensätze der Autobahnfahrten .....	151
Tabelle 6.8: Wetterbedingungen am Versuchstag, PAG Wetterstation Weissach .....	152
Tabelle 6.9: Versuchsfahrten Kreisbahn mit ABS-Regelbremsung .....	155
Tabelle 9.1: Sensorspezifikationen .....	176
Tabelle 9.2: Erhobene Messwerte .....	177

## Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control (eng. für Abstandsregeltempomat)
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems (eng. für Fahrerassistenzsysteme)
AEB	Autonomous Emergency Brake (eng. für Notbremsassistenten)
AG	Aktiengesellschaft
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
ASR	Antischlupfregelung
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Bus	Datenleitung zwischen Steuergeräten und Sensoren
CAN	Datenbus im Auto
Car-to-X	Online vernetztes Auto mit variablen Verbindungsmöglichkeiten
EPB	elektromechanische Parkbremse
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
E/E	Elektrik/Elektronik
FAS	Fahrerassistenzsystem
FIBEX	Field Bus Exchange Format (BUS-Protokoll)
FIR	Filter mit endlicher langer Impulsantwort (Finite-Impulse-Response)
FlexRay	Feldbusarchitektur für Fahrzeuge
FuT	Function under Test (eng. für getestete Funktion)
GLMW	Gleitender Mittelwert
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem
HAF	Hochautomatisiertes Fahren
HAL	gelenkte Hinterachse
HMI	Mensch-Maschine-Schnittstelle (eng. für Human Machine Interface)

IIR	Filter mit unendlich langer Impulsantwort (Infinite-Impulse-Response)
ISO	International Organisation for Standardisation
KNN	Künstliches neuronales Netz
LIDAR	Light Detection And Ranging (Optische Abstandserfassung mit Laserstrahlen)
LIN	Local Interconnected Network
LPTB	Letztmöglicher Bremspunkt (Last Point To Brake)
LPTS	Letztmöglicher Lenkpunkt (Last Point To Steer)
MDF	Measurement Data Format (Messdatenformat)
ML	Machine-Learning
MOST	Media Oriented Systems Transport
ODD	Operational Design Domain (eng. für: Operationsdomäne)
OEM	Original Equipment Manufacturer
OTA	Over The Air (eng. für kabellos)
PAS	Publicly Available Specification (Vorstufe zur ISO-Norm)
PDCC	Porsche Dynamic Chassis Control
PKW	Personenkraftwagen
RGB	Rot, Grün, Blau
SAE	Society of Automotive Engineers
SPA	Sense-Plan-Act
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
V&V	Verifizierung und Validierung
XiL	X in the Loop
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

## Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$F_N$	N	Normalkraft
$F_R$	N	Reibungskraft
$F_Z$	N	Zentripetalkraft
$F_x$	N	Reifenkraft in x-Richtung
$F_y$	N	Reifenkraft in y- Richtung
$G_i$	[]	Erfülltheitsgrad
$K(k)$	[]	Verstärkungsmatrix Kalman-Filter
$L$	[]	Verstärkungsmatrix Beobachter
$M_{\text{Antrieb}}$	Nm	Antriebsmoment
$P^-(k)$	[]	Kovarianz Kalman-Filter
$Q$	[]	Potenzialschwelle Neuron
$Q(k)$	[]	Kovarianzmatrix Kalman-Filter
$W(k)$	[]	Systemrauschen Kalman-Filter
$a_{\text{Brems}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Bremsbeschleunigung
$a_i$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Beschleunigung in Fahrzeugkoordinaten
$g$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Erdbeschleunigung
$k$	[]	Laufvariable/Zeitschritt
$k_x$	[]	Lineare Steigung der Schlupfkurve
$m$	[]	Steigung
$m_{\text{Fzg}}$	kg	Masse Fahrzeug
$m_i(x)$	[]	Einflussbreite Fuzzy-Menge
$q$	[]	Bereich der Zahlenwerte

---

$r_K$	m	Kurvenradius
$r_{\text{dyn}}$	m	Dynamischer Raddurchmesser
$s$	m	Strecke
$s_{\text{Abs.Fzg}}$	m	Abstandsfunktion ACC
$s_{\text{Brems}}$	m	Bremsstrecke
$t$	s	Zeit
$\text{tol}_F(x)$	[]	Toleranzbereich Fuzzy-Menge
$u(t)$	V	Stellgröße
$v(k)$	[]	Messrauschen Kalman-Filter
$v_K$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Kurvengeschwindigkeit
$v_o$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Anfangsgeschwindigkeit
$v_{\text{rel}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Relativgeschwindigkeit
$v_{\text{soll}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Zielgeschwindigkeit
$v_x$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Geschwindigkeit in x-Richtung
$x(t)$	V	Eingangssignal
$\hat{x}(t)$	V	Zustandsvektor Beobachter und Schätzgröße
$\dot{x}(t)$	V	Ableitung der Eingangsgröße
$x^{+/-}(k)$	[]	Zustände Kalman
$x_1(t)$	V	Relevanter Anteil Eingangssignal
$x_2(t)$	V	Unerwünschter Anteil Eingangssignal
$x_{\text{Gesetz}}$	m	Gesetzlich vorgeschriebener Abstand
$x_K$	[]	Eingabewert gleitender Mittelwertfilter
$x_{K+1}$	[]	Folgender Wert Nachbarschaft GLMW
$x_{K-1}$	[]	Vorhergehender Wert Nachbarschaft GLMW
$x_{\text{Wunsch}}$	m	Wunschabstand
$y(t)$	V	Ausgangssignal

$\hat{y}(t)$	V	Messwert des Beobachters
$y_1(t)$	V	Nutzsignal
$y_2(t)$	V	Gefilterter Anteil des Ausgangssignals
$y_K$	[]	Ausgabewert gleitender Mittelwertfilter
$y_i$	[]	Einzelschwerpunkte
$\delta$	[]	Horizontaler Versatz der $\mu$ -Schlupfkurve
$\theta$	[]	Ausgabe des künstlichen neuronalen Netzes
$\lambda$	[mm]	Wellenlänge
$S$	[]	Schlupf
$S_{\text{Antrieb}}$	[]	Antriebsschlupf
$S_{\text{Brems}}$	[]	Bremsschlupf
$\mu_A(e)$	[]	Zugehörigkeitsfunktion scharfe Menge
$\mu_{\text{Anforderung}}$	[]	Gefordertes Reibwertsignal
$\mu_{\text{Used}}$	[]	Genutzter Reibwert aus dem Kamm'schen Kreis
$\mu_{\text{UsedMax}}$	[]	Lokal maximal genutzter Reibwert
$\mu_F(X_i)$	[]	Zugehörigkeitsfunktion Fuzzy-Menge
$\mu_{\text{Haft}}$	[]	Haftreibung
$\mu_R$	[]	Reibwert Fahrbahn-Reifen
$\omega_R$	$\frac{1}{s}$	Umfangsgeschwindigkeit Rad



# 1 Einleitung

Die Anzahl an schwer verletzten und getöteten Personen im Straßenverkehr ist trotz erhöhtem Verkehrsaufkommen in den letzten Jahrzehnten stark gesunken. Einer der wesentlichen Entwicklungsschwerpunkte der Automobilindustrie ist es, die Anzahl der Unfälle noch weiter zu reduzieren. Dies gelingt mit einer stetigen Weiterentwicklung der sicherheitsbezogenen Fahrerassistenzsysteme (FAS <sup>1</sup>). Die heutigen FAS werden so weiterentwickelt, dass ein fließender Übergang von FAS zu hochautomatisierten Fahrfunktionen (HAF) entstehen kann. Der Begriff „autonomes Fahren“ wird allgemein unterschiedlich interpretiert. In der vorliegenden Arbeit und in der Automobilindustrie wird zur eindeutigen Definition der automatisierten Fahrfunktionen die Terminologie nach dem SAE Standard J3016 (SAE J3016, 2018) angewandt. Danach werden automatisierte Fahrfunktionen zwischen Stufe 0 und Stufe 5 klassifiziert (Abbildung 1.1).

Stufe 0 Driver only	Stufe 1 Assistiert	Stufe 2 Teilautomatisiert	Stufe 3 Hochautomatisiert	Stufe 4 Vollautomatisiert	Stufe 5 Fahrerlos
Fahrer führt dauerhaft Längs- und Querführung aus.	Fahrer führt dauerhaft Längs- oder Querführung aus.	Fahrer <b>muss</b> das System <b>dauerhaft</b> überwachen.	Fahrer <b>muss</b> das System <b>nicht</b> mehr <b>dauerhaft</b> überwachen.	Kein Fahrer erforderlich im spezifischen Anwendungsfall.	Kein Fahrer erforderlich.
					
Kein System aktiv.	System übernimmt die jeweils andere Funktion.	System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall.	System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall. Es erkennt Systemgrenzen und fordert den Fahrer zur Übernahme mit ausreichender Zeitreserve auf.	System kann im <b>spezifischen Anwendungsfall</b> alle Situationen automatisch bewältigen.	Das System übernimmt die Fahraufgabe vollumfänglich bei allen Straßentypen, Geschwindigkeitsbereichen und Umfeldbedingungen.

Abbildung 1.1: Automatisierungsstufen nach SAE J3016 (Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) 2015)

Je höher die Klassifizierung, desto umfangreicher ist die vom Fahrzeug übernommene dynamische Fahraufgabe. Stufe 5 beschreibt das vollautonome Fahren, wobei kein menschlicher Fahrer als Rückfallebene benötigt wird.

<sup>1</sup> Englisch: Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)

Systeme der Stufe 2 sind derzeit Stand der Technik. Bei der Entwicklung von Systemen ab Stufe 3 ist unter anderem die Interaktion des Reifens mit der Fahrbahn eine zentrale Informationsgröße.

Dabei ist der sogenannte Fahrbahnreibwert  $\mu$  der Wert, der maßgeblich für das Fahrverhalten und die Sicherheit der Insassen <sup>2</sup> herangezogen werden kann, wenn sich ein Fahrzeug ohne Überwachung des Fahrers fortbewegt. Diese Sensitivität wird in der Abbildung 1.2 mit dem Anteil der Unfälle, die auf nassen, verschneiten oder vereisten Fahrbahnen geschehen sind, nochmals deutlich (DESTATIS, 2021) (Schramm, et al., 2020).

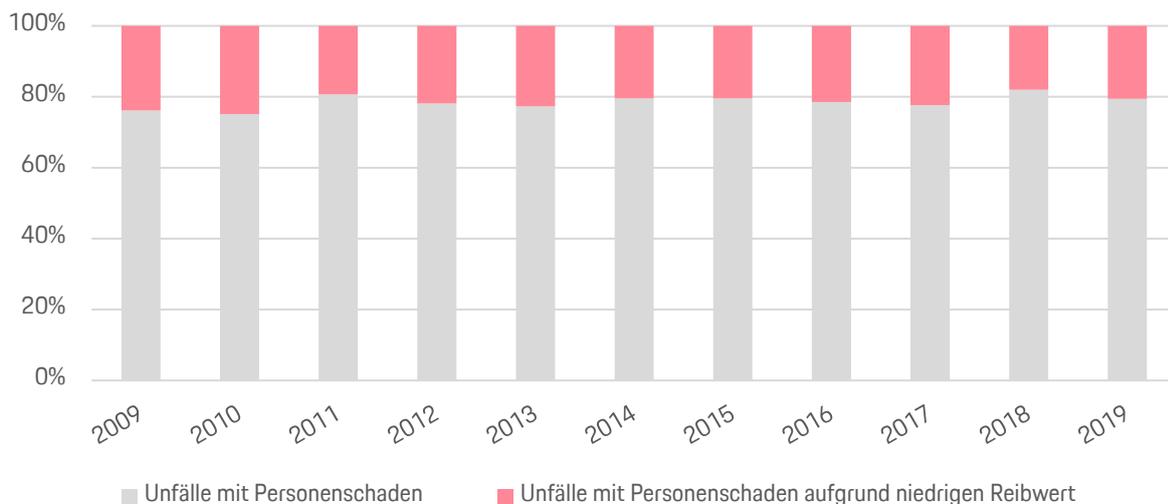


Abbildung 1.2: Verteilung der Unfälle über Fahrbahnzustände (DESTATIS, 2021)

Aus der Darstellung wird deutlich, dass die Erfassung der Reibwertinformation und deren Integration in kommende Fahrerassistenzfunktionen unabdingbar sind. Dabei wird eine wesentliche Herausforderung sein, das Umfeld und die Straßeneigenschaft zu erkennen. Die Erfassung kann auf der Funktionsebene im Kontext der Mechatronik als System aus den Schritten „Sense“, „Plan“ und „Act“ (SPA-System) beschrieben werden. Nach (Wood, et al., 2019) empfiehlt es sich, die Entwicklung von zukünftigen HAF Systemen in diese drei Phasen aufzuteilen.

<sup>2</sup> Zur besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Es wird das generische Maskulinum verwendet, wobei beide Geschlechter gleichermaßen gemeint sind.

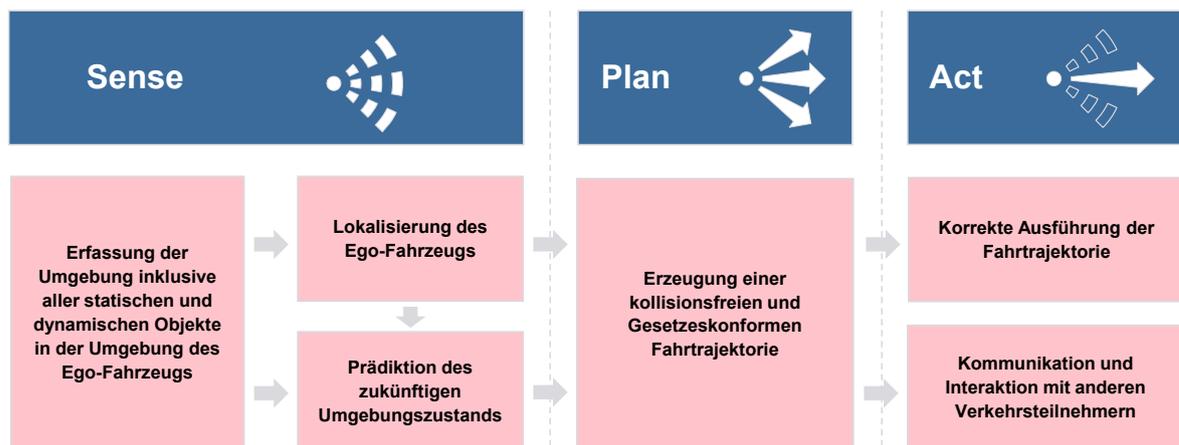


Abbildung 1.3: SPA-Modell für HAF-Fahrzeuge adaptiert nach (Wood et al. 2019)

Unter „Sense“ werden die Wahrnehmung der Umgebung, die Lokalisierung des eigenen Fahrzeuges (Ego-Fahrzeug) sowie die Prädiktion des Zielzustandes verstanden. Hierzu werden verschiedene Sensoren betrachtet und für die Anwendung bewertet. Unter Berücksichtigung der rechtlichen, der Sicherheits- und Komfortbedingungen wird in der zweiten Phase „Plan“ die Trajektorie definiert. Daraus werden in der dritten Phase „Act“ die Stellgrößen zur Erfüllung und Ausführung der Trajektorie bestimmt. Dieses Modell wird im Verlauf dieser Arbeit herangezogen, wenn es um die Weiterentwicklung von Systemen geht.

## 1.1 Ziel und Aufbau der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, im Sinne der mechatronischen SPA-Methode den Straßenzustand zu erkennen und auszugeben. Dazu wird das mechatronische Zusammenspiel von Sensorik, Elektronik, Signalverarbeitung in Verbindung mit zukünftigen Kundenfunktionen betrachtet. Das Gesamtziel kann in folgende Teilziele untergliedert werden:

- Literaturrecherche zu bereits vorhandenen Methoden,
- Analyse der vorliegenden Technik- und Sicherheitsanforderungen,
- Ermittlung eines Use Case für eine erste Integration der Reibwertinformation,
- Definition einer Methode zur Fusionierung mehrerer Signale zur Reibwertschätzung,
- Verifizierung und Validierung der Methodik.

Tabelle 1.1 stellt den Aufbau der Arbeit dar.

<b>Kapitel 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Stand der Technik zur Umsetzung des hochautomatisierten Fahrens</li> <li>○ Einordnung der Thematik Reibwerterfassung</li> </ul>
<b>Kapitel 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Technische Grundlagen und Einflussparameter des Reibwertes</li> <li>○ Wechselwirkungen Reifen und Fahrbahn</li> <li>○ Erläuterung der nicht beeinflussbaren Einflussgrößen</li> <li>○ Reibwertermittlung und bestehende Konzepte</li> </ul>
<b>Kapitel 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Grundlagen mechatronischer Systeme</li> <li>○ Signalverarbeitung und Fusionsmethoden</li> <li>○ Relevante Sensoren, Filterung, Ausfallraten und Fusionskonzepte</li> <li>○ Grundlagen zur Umsetzung anhand eines mechatronischen Systems</li> </ul>
<b>Kapitel 4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Anforderungen an die Straßenzustandserkennung</li> <li>○ Analyse des Kundennutzens anhand von Use Case Methode und Nutzwertanalyse</li> <li>○ Definition der Anforderungen aus Prüfkatalogen und der Funktionalen Sicherheit nach ISO 26262</li> <li>○ Neue Anwendung zur Ableitung von Anforderungen nach der Methode Safety of the Intended Functionality (SOTIF) und Best Practices im Kontext zu einer Unfallstatistik</li> <li>○ Neu definiertes Anforderungsmodell für die Reibwerterfassung</li> </ul>
<b>Kapitel 5</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Definition der Umsetzungsmethodik</li> <li>○ Ableitung einer Vorgehensweise</li> <li>○ Beschreibung des Funktionsbereichs (ODD) und Validierungsverfahren</li> <li>○ Umsetzung des Funktionsalgorithmus</li> <li>○ Festlegung der Eingangsdaten, Bildung der Referenzwertberechnung, Erstellung eines Zustandsautomaten, Umsetzung mit Fuzzy-Logik und Ausgabe Reibwert</li> <li>○ Erarbeitung der Funktionsbeschreibung und dessen Algorithmus</li> </ul>
<b>Kapitel 6</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Festlegung der Verifizierungs- &amp; Validierungsstrategie</li> <li>○ Aufbau Versuchsfahrzeug zur Validierung des Algorithmus auf Basis der erarbeiteten Kunden Use Cases</li> <li>○ Durchführung der Erprobungsfahrten</li> <li>○ Auswertung und Gegenüberstellung der geschätzten und tatsächlichen Reibwertdaten</li> <li>○ Bewertung der Schätzgüte, Klassifizierung der Schätzfehler und deren Auswirkungen</li> </ul>
<b>Kapitel 7</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Zusammenfassung der Arbeit</li> <li>○ Betrachtung und kritische Diskussion der Ergebnisse</li> <li>○ Verbesserung der Risikobilanz und V&amp;V Strategie für weitere wissenschaftliche Arbeiten</li> <li>○ Wissenschaftlicher Beitrag</li> </ul>

*Tabelle 1.1: Gliederung der Arbeit*

## 1.2 Problemstellung

Derzeitige Fahrerassistenzsysteme sind nach der Klassifizierung SAE Stufe 2 so beschrieben, dass der Fahrer dazu verpflichtet ist, die Funktion dauerhaft zu überwachen. Ab SAE Stufe 3 ist der Fahrer nicht verpflichtet, dauerhaft die Fahrsituation zu überwachen. Spätestens dann ist eine Methode zur funktionalen Absicherung unverzichtbar. Stand heute schließt die ISO 26262 alle Funktionen größer Stufe 2 explizit aus, da die Rückfallebene immer der Fahrer ist. Das heißt, mit der Einführung von neuen FAS nach SAE Stufe 3 ergeben sich neue Herausforderungen in Bezug auf die funktionale Absicherung, da die Rückfallebene nicht mehr der Fahrer ist. Der Fahrer kann temporär die Fahraufgabe vollständig an ein Fahrzeugführungssystem übergeben. Damit liegt die Verantwortung für die Fahraufgabe und Umfeldüberwachung beim System. Dieses muss nun in der Lage sein, auftretende Situationen zu erkennen und darauf zu reagieren. Vor allem die Umfelderkennung wird dabei von zentraler Bedeutung sein. Dabei ist eine andere zentrale Größe der Reibwert zwischen Reifen und Straße. Daher ergeben sich folgende Fragestellungen, die in der vorliegenden Arbeit bearbeitet und beantwortet werden:

- Was muss erfasst werden, der Fahrbahnzustand oder ein Reibwertverhältnis?
- Wie kann diese Information mit bestehender Fahrzeugtechnik erhoben werden?
- Wie gut muss die Güte des Reibwertsignals für eine automatisierte Fahrfunktion sein?

Auf dem bearbeiteten Gebiet, sind bereits einige Forschungsprojekte wie PEGASUS<sup>3</sup>, SEEROAD<sup>4</sup> oder SaFAD<sup>5</sup> durchgeführt worden. Mit dem Forschungsprojekt PEGASUS sollen die Resultate verschiedener Forschungs- und Entwicklungsprojekte sowie bereits existierende Fahrzeugprototypen zukünftig effizient und schnell in marktfähige Produkte überführt werden können. Im Rahmen des SaFAD-Projektes wurden Sicherheitsmethoden für die Entwicklung und Nachvollziehbarkeit von Funktionen veröffentlicht, die zu automatisiertem Fahren ab SAE Stufe 3 befähigen. Diese Erkenntnisse werden im Verlauf dieser Arbeit analysiert und wenn möglich zur praxisnahen Anwendung entwickelt. In SEEROAD wurde unter anderem untersucht, inwiefern die Information über den Fahrbahnzustand für die Optimierung von Fahrdynamiksystemen bis hin zum vollautomatisierten Fahrbetrieb geeignet ist. Ergebnisse waren unter anderem, dass die Information über den Fahrbahnzustand bereits in heutigen Systemen, die Sicherheit für Fahrzeuginsassen signifikant erhöht.

---

<sup>3</sup> Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen. ([Home - pegasus-EN \(pegasusprojekt.de\)](http://Home-pegasus-EN(pegasusprojekt.de)))

<sup>4</sup> BMWI Projekt: Sensorsystem zur autonomen Fahrbahnzustandserkennung. ([SEEROAD \(uni-due.de\)](http://SEEROAD(uni-due.de))).

<sup>5</sup> Safety First for Automated Driving. ([Safety First for Automated Driving \(mercedes-benz.com\)](http://Safety First for Automated Driving (mercedes-benz.com)))

### 1.3 Stand der Technik

Nach der Einleitung, Zielsetzung und Problemstellung werden im Folgenden der Stand der Technik sowie rechtliche Aspekte bis hin zur Interaktion von Mensch und Maschine dargestellt.

Nach (Altenburg, et al., 2018) werden zur Markteinführung des automatisierten Fahrens, neben dem technischen Reifegrad, die Faktoren Infrastruktur, rechtliche Aspekte und Trägheit der Bestandsflotte aufgeführt. Damit die Umsetzung bis hin zum SAE Stufe 5 gelingen kann, ist es notwendig, dass die Fahrzeuge untereinander („Car-to-Car“) und mit der Verkehrsinfrastruktur („Car-to-Infrastructure“) kommunizieren können. Da der Ausbau der Infrastruktur noch in der Umsetzung ist, können Fahrzeuge mit einem höheren Automatisierungslevel ausschließlich autark entwickelt und genutzt werden, was die Umsetzung der HAF-Stufe 5 verlangsamt (Leimbach, 2019).

Da mit der Entwicklung von HAF-Systemen finanzielle Risiken bei den Fahrzeugherstellern und Zulieferern entstehen, können rechtliche Aspekte entscheidend sein. Denn Systeme werden nur dann weiterentwickelt, wenn sie eine gewisse Wirtschaftlichkeit aufweisen. Dies kann nur der Fall sein, wenn die Zulassungsbeschränkungen, Produkt- und Herstellerhaftungen vom Gesetzgeber transparent vermittelt werden. Gerade die Entwicklung der Stufe 3 ist technologisch ein erheblicher Sprung, der mit vielen Chancen, aber auch Risiken in Verbindung gebracht wird. Bei dieser Umsetzung sollten staatliche Institutionen die Gesetzgebung so steuern, dass für den Kunden der größte Nutzen bei gleichzeitig minimalem Risiko entsteht.

Von der Bundesregierung wurde bereits ein erstes Regelwerk verabschiedet, das von einer Ethik-Kommission erstellt wurde. Dieses beinhaltet 21 Regeln zu Risikovermeidung, Risikoakzeptanz, Haftung und Datenschutz. Hierbei ist zu sehen, dass es derzeit noch unklare Regularien gibt und diese auch nach Regionen inhomogen sind. Nach (Reis, et al., 2019) ist davon auszugehen, dass die Weiterentwicklung der Gesetzgebung ein mit der Technologie wachsender und iterativer Prozess ist, der mehrere Gesetzesgebiete tangieren wird. Die für die vorliegende Arbeit relevanten Rechtsschriften und Normen werden in Abschnitt 4 im Detail erläutert.

Unter Trägheit der Bestandsflotte wird die langsame Umstellung der im Betrieb befindlichen Fahrzeuge verstanden. Das durchschnittliche Alter von Personenkraftwagen (PKW) liegt in Deutschland bei ca. zehn Jahren. Damit ist auch die Trägheit des Marktes ein Faktor, der die Entwicklung von HAF-Systemen beeinflusst (Altenburg, et al., 2018). Da mit neuen Systemen hohe Entwicklungs- und Investitionskosten verbunden sind, wird die Technik vor allem in den Segmenten der innovationstreibenden Oberklasse, der oberen Mittelklasse und der Sportwagen zu finden sein. Damit das Potenzial, die Entwicklung und der Anteil der Fahrzeuge mit HAF-Stufe 4 verdeutlicht werden können, wurden in Abhängigkeit von den Neuzulassungen

die Prognosen in den folgenden Abbildung 1.4 und Abbildung 1.5 erstellt. Bei der optimistischen Variante wurde eine schnellere Durchdringung in volumenstarken Segmenten unterstellt (Altenburg, et al., 2018).

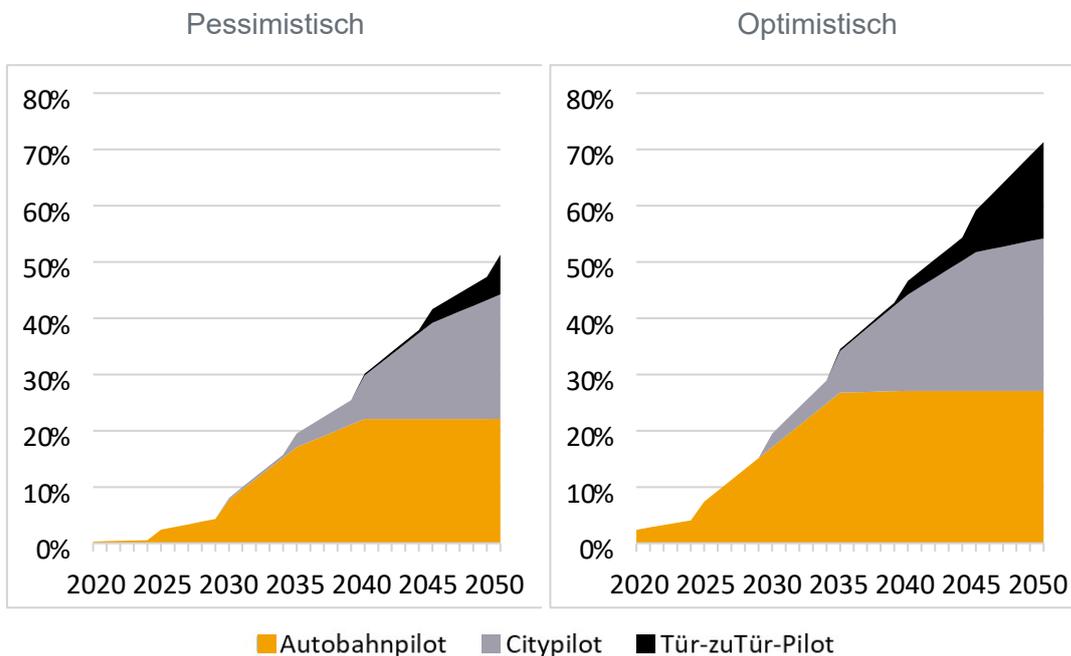


Abbildung 1.4: Anteil der Fahrzeuge mit Automatisierungsfunktion an den Neuzulassungen (Altenburg et al. 2018)

Unter diesen Randbedingungen und bei Verwendung eines Kohorten-Modells nach (Altenburg, et al., 2018) kann abgeschätzt werden, wie sich der Gesamtbestand bis 2050 entwickelt.

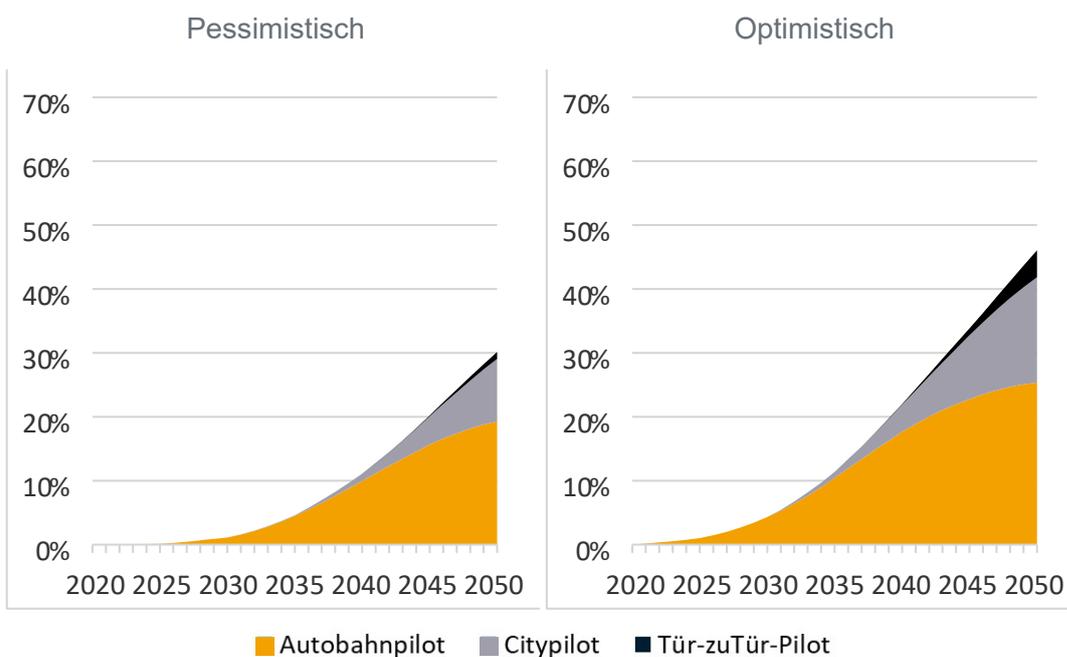


Abbildung 1.5: Bestandsdurchdringung bis 2050: Gesamtbestand (Altenburg et al. 2018)

Bei der Marktdurchdringung durch hochautomatisierte Fahrzeuge ist zu beobachten, dass als treibende Kraft nicht mehr allein die OEM agieren. Als weitere treibende Kraft sind große IT-Firmen zu nennen, die losgelöst von der traditionellen Fahrzeugentwicklung versuchen, das autonome Fahren zu entwickeln. Im Gegensatz zu den traditionellen Ansätzen, wie einer Evolution auf Basis bestehender Technologien, verfolgen IT-Firmen revolutionäre Ansätze. Dabei versuchen sie neue Geschäftsfelder zu erschließen und Produkte in Form von Dienstleistungen wie z. B. ein „Robo-Taxi“ anzubieten. Technologisch soll dies maßgeblich durch informationstechnische Kompetenzen wie das maschinelle Lernen und die Bildverarbeitung erreicht werden. Des Weiteren werden Dienstleistungen und produktspezifische Merkmale weiterentwickelt, die später „Over The Air“ (OTA) auf das jeweilige Fahrzeug gebucht werden können (Maurer, et al., 2015).

Nach (Masters, 2019) und (Moeller, et al., 2018) ist zu beobachten, dass auch die traditionellen OEM dem Trend der alternativen Mobilitätskonzepte und OTA-Strategien folgen und in Start-ups und Joint Ventures investieren. Mit diesen Investitionen können kurzfristig Kompetenzen erworben werden, die in der traditionellen Fahrzeugentwicklung bisher keinen großen Stellenwert hatten. Am deutlichsten wird dies bereits heute beim Wandel der E/E-Architekturen, die in Kapitel 3 näher erläutert werden.

In der Einleitung wurde bereits die Wirkkette der Wahrnehmung der Umwelt mit Sense-Plan-Act beschrieben. Damit Fahrzeuge weitere Fahraufgaben übernehmen können, sind die kommenden Fahrzeuge mit deutlich mehr Sensorik auszustatten, mit dem Ziel einer 360°-Überwachung der unmittelbaren und fernerer Umgebung.

Unterschiede gibt es zum einen bei der Anzahl an Sensoren sowie beim Einsatz der Lidar-Technologie je Derivat und Hersteller. Bei der Lidar-Technologie sind zum Beispiel im Vergleich zu kamerabasierten Systemen deutlich höhere Auflösungen und eine Objekterkennung von bis zu 200 Meter zu realisieren. Exemplarisch werden die derzeit verfügbaren Sensoren in der folgenden Abbildung 1.6 dargestellt.

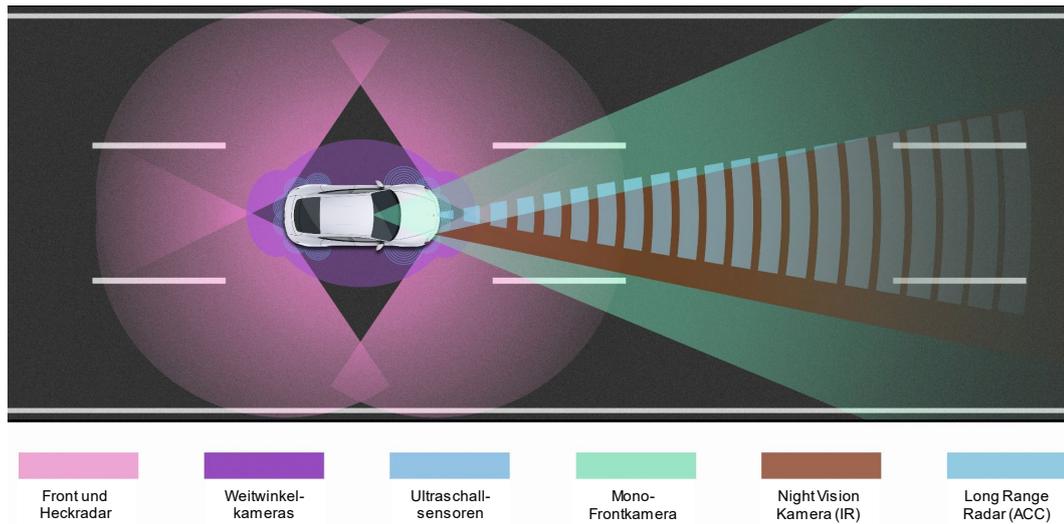


Abbildung 1.6: Exemplarische Darstellung von Sensoren in einem Fahrzeug (Porsche AG)

Nach (Moeller, et al., 2018) werden die einzelnen Sensortechnologien und deren Einsatz wie folgt beschrieben:

- Bei der Ermittlung der unmittelbaren Umgebung werden Ultraschallsensoren verwendet.
- Die Fahrzeuglokalisierung und Wahrnehmung des Verkehrsgeschehens erfolgt mittels Sensorfusionen, die auf physikalischen Wirkprinzipien beruhen.
- Um Objekte im Raum identifizieren zu können, werden optische Sensoren genutzt.
- Damit auch unter schlechten Umweltbedingungen wie Regen oder Nebel die Umgebung robust detektiert werden kann, wird das elektromagnetische Radar verwendet.
- Um die Erfassung der Umgebung bei Dunkelheit zu verbessern, werden Sensoren im infraroten Bereich genutzt.
- Die lasergestützten Lidar-Sensoren werden aus Kostengründen noch nicht flächendeckend eingesetzt. Es ist davon auszugehen, dass die Materialeinzelkosten in den kommenden Entwicklungsperioden sinken werden und die Verwendung aufgrund der nochmaligen Robustheitssteigerung zum Standard wird.

Damit die Eignung und der Einsatzbereich der verschiedenen Sensoren deutlich werden, ist in der Tabelle 1.2 das Ergebnis einer Anwendungsbewertung dokumentiert.

### Bewertung Sensorfunktion

● Gut ● Mittel ● Schlecht

	Optisch		Elektromagnetisch	Akustisch			
	Kamera	Lidar	Radar	Ultraschall	Radar und Lidar	Lidar und Kamera	Radar und Kamera
Objekterkennung	●	●	●	●	●	●	●
Objektklassifizierung	●	●	●	●	●	●	●
Distanzerkennung	●	●	●	●	●	●	●
Kantenerkennung	●	●	●	●	●	●	●
Fahrspurerkennung	●	●	●	●	●	●	●
Reichweite	●	●	●	●	●	●	●
Robustheit Umgebungsbedingungen	●	●	●	●	●	●	●
Robustheit Sichtverhältnisse	●	●	●	●	●	●	●
Kosten	●	●	●	●	●	●	●
Reifegrad	●	●	●	●	●	●	●

Tabelle 1.2: Anwendungsbewertung verschiedener Sensoren nach (Moeller et al. 2018)

Mit der Ausweitung der eingehend beschriebenen Car-to-X-Funktionen und OTA-Updates kann das zukünftige Ego-Fahrzeug Informationen aus zusätzlichen Quellen beziehen. So kann zum Beispiel die Routenplanung um extern erfasste Daten, wie die Wetterverhältnisse entlang der Route oder die Verkehrsinfrastruktur, ergänzt werden.

Damit die verschiedenen Informationen von mehreren Sensoren zielführend verarbeitet und ausgegeben werden können, sind Fusionsmodelle notwendig. Ziel ist hierbei die Erstellung eines *Weltmodells*, das unter Berücksichtigung des aktuellen Standorts die Aufgaben „Plan“ und „Act“ so ausführt, dass alle definierten Randbedingungen und Anforderungen an das System erfüllt werden. Ein vereinfachtes Modell der Fusionierung ist in Abbildung 1.7 dargestellt. Als externer Sensor werden die Informationen von Wetterstationen und Sensoren an Brücken

berücksichtigt. Da die Sensordatenfusion eine zentrale Rolle in der vorliegenden Arbeit einnimmt, wird diese in Abschnitt 3.4.3 explizit erläutert.

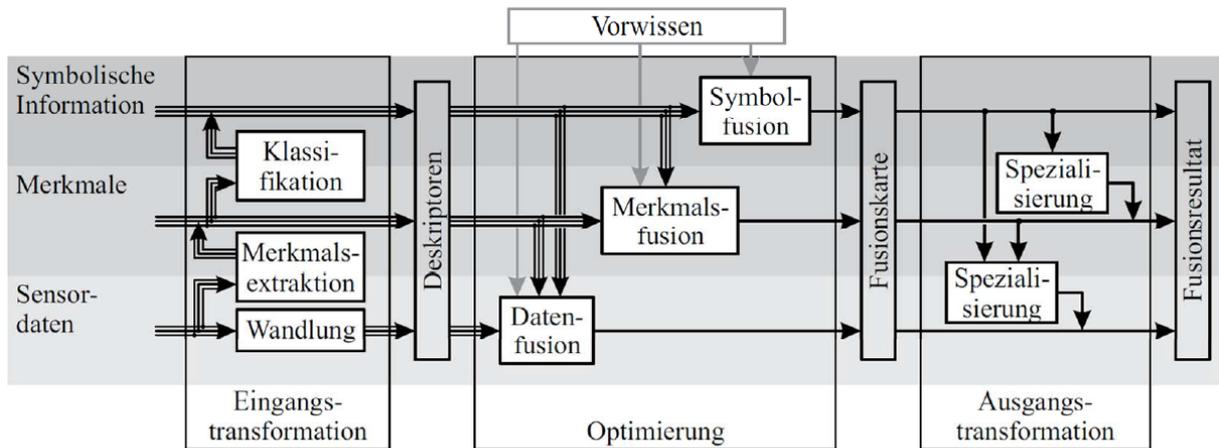


Abbildung 1.7: Fusionsmodell unter Berücksichtigung externer Informationen (Heizmann, et al., 2014)

Aus dem Stand der Technik wird sichtbar, dass für kommende HAF-Funktionen eine Vielzahl von technologischen Randbedingungen in Betracht gezogen werden muss. Speziell bei den Anforderungen an HAF-Systeme, der Identifikation der Umwelt und der funktional sicheren Entwicklung wird nach derzeitigem Stand der Technik Handlungsbedarf gesehen.

## 2 Reifen, Fahrbahn und Reibwert

In der Problembeschreibung wurde ausgeführt, dass automatisierte Fahrfunktionen ab SAE Stufe 3 nur sinnvoll umgesetzt werden können, wenn die Umwelt und vor allem das Reibwertverhältnis zwischen Reifen und Fahrbahn erfasst und klassifiziert werden kann. Hierfür werden in diesem Kapitel die notwendigen Grundlagen vermittelt. Zu Beginn werden der Reifen, dessen Aufbau, Eigenschaften sowie die Wechselwirkung mit der Fahrbahn beschrieben. Des Weiteren werden die am Reifen anliegenden Kräfte und Momente erläutert und dargestellt. Eine Möglichkeit zur Simulation der stationären Kräfte und Momente im zweidimensionalen Raum wird anhand des Reifenmodells nach Pacejka und Bakker vorgestellt.

Anschließend werden Einflüsse wie Fahrbahnstrukturen, Fahrgeschwindigkeiten, Umgebungstemperaturen und Fahrbahnnässe in Bezug zum Reibwertpotenzial gestellt. Dabei wird in der vorliegenden Arbeit zusätzlich zur vorhandenen Literatur ein Verfahren erläutert, mit dem der Fahrbahnzustand genau erfasst, ausgewertet und ausgegeben werden kann. Hierbei wird ein spezieller Sensor verwendet, der mittels verschiedener Frequenzen die Oberflächenbeschaffenheit klassifizieren kann.

Des Weiteren werden in diesem Kapitel die verschiedenen Methoden der Reibwernerfassung beschrieben und in effektbasierte und ursachenbasierte Methoden aufgeteilt. Nach dieser Aufteilung wird der aktuelle Stand von Technik und Wissenschaft erläutert. Auf dieser Basis wird abschließend ein Fazit gezogen und die weitere Vorgehensweise sowie Fokussierung dieser Arbeit thematisch eingegrenzt.

## 2.1 Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn

Der Reifen hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Reibwert, das Fahrverhalten des Fahrzeugs und die Sicherheit der Fahrzeuginsassen. Die Reifeneigenschaften sind unter anderem bedingt durch die Bauart, Abmessung, Gummimischung, Wahl von Winter- oder Sommerreifen und die Fülldrücke. Eine Veränderung dieser Parameter beeinflusst die makroskopische Verformung und hat einen sofortigen Einfluss auf das Flächenpressungsverhalten und die Spannungsverteilung in der Reifenaufstandsfläche. Bei jeglicher dynamischen Bewegung überträgt der Reifen die auftretenden Kräfte und Momente zwischen Reifen und Straße. Dieses Kraftschlussverfahren ist eine essenzielle Thematik bei der Reifenentwicklung. Neben konstruktiven und materialtechnischen Auslegungsgrößen sind für die Kraftübertragung auch die Faktoren Fahrbahnart und Fahrbahnzustand entscheidend. Der konstruktive Aufbau eines Radialreifens ist in der Abbildung 2.1 dargestellt. Radialreifen sind seit den 70er Jahre Standard im Bereich LKW und PKW. Diagonalreifen werden noch in der Agrarwirtschaft und als Motorradreifen verwendet. Die vorliegende Arbeit bezieht sich ausschließlich auf den Aufbau und die Verwendung von Radialreifen.

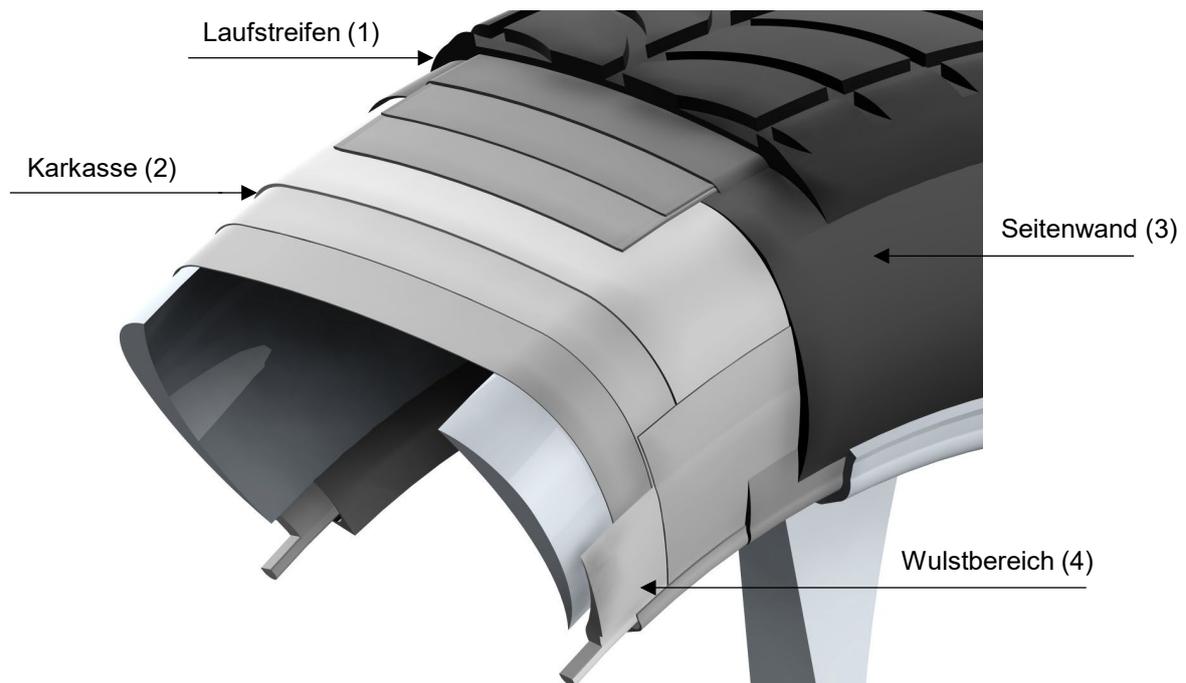


Abbildung 2.1: Aufbau eines Radialreifens (Schramm, et al., 2018)

Der Reifen setzt sich aus vielen verschiedenen Materialien zusammen und ist daher ein komplexes Bauteil (Abbildung 2.1). Dabei ist ein wesentlicher Bestandteil der Laufstreifen (1), der das Laufstreifenprofil beinhaltet. Das Laufstreifenprofil besteht aus den Profilstollen, einem Steg und den Profilrillen. Die Karkassenlagen (2) bestehen aus Rayon oder Polyester. Diese

sind in 90 Grad zur Laufrichtung angeordnet und mit Gummi ummantelt. Im Wesentlichen verleihen die Karkasse und der Luftdruck dem Reifen die notwendige Steifigkeit. Die Seitenwand (3) bildet die Verbindung zwischen Laufstreifen, Karkassen und Wulstbereich. Des Weiteren beeinflusst dieser Bereich die Fahrdynamik und den Fahrkomfort. Der angrenzende Wulstbereich (4) fixiert den Reifen und bildet die Dichtung zwischen Reifen und Felge.

Das mögliche Kraftschlussverhalten eines Reifens wird maßgeblich von dem Verhalten der Reibpartner, Gummi und Fahrbahnoberfläche definiert. Dabei werden alle wirkenden Kräfte durch die Kontaktzone des Reifens (Reifenlatsch) auf die Straße übertragen. Bei der Übertragung entsteht die Reibungskraft  $F_R$ , die sich nach dem Coulomb'schen Reibungsgesetz aus dem Produkt von Reibkoeffizient und Normalkraft  $F_N$  zusammensetzt. Daraus resultiert die maximale Reibkraft und somit das Kraftschlusspotenzial (1) (Müller, et al., 2017).

$$\mu = \left| \frac{F_R}{F_N} \right|$$

$$\mu_{max} = \max \left| \frac{F_R}{F_N} \right| \quad (1)$$

$$\mu_{max,x} = \max \left| \frac{F_x}{F_N} \right|$$

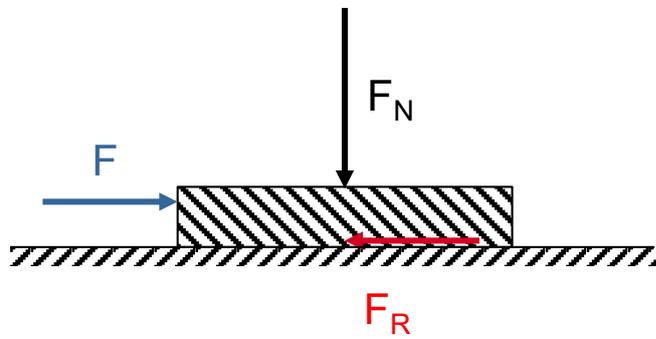


Abbildung 2.2: Wirkende Kräfte zwischen Reifen und Fahrbahn

Diese linearen Zusammenhänge sind nicht direkt auf die Reibkraft und die Radlast übertragbar, die am Reifen wirken. Nach (Meyer und Kummer 1964) beschreibt die Coulomb'sche Reibungstheorie die real wirkenden Effekte der Wechselwirkung von Reifen und Fahrbahn unzureichend. Damit auch die nichtlinearen Effekte beschrieben werden können, muss unter anderem die viskoelastische Gummireibungstheorie herangezogen werden (Meyer und Kummer, 1964) (Fach, 2000).

Dabei gibt es grundsätzlich zwei Wirkmechanismen beim Kraftübertrag. Die Adhäsionsreibung beschreibt den Kraftschluss zwischen Fahrbahn und Reifen im Bereich der Berührungsfläche. Der zweite Wirkanteil ist die Hysterese-Reibung. Diese beschreibt den Formschluss und die Verzahnungskräfte zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche. Die zwei Wirkmechanismen sind in Abbildung 2.3 illustriert.

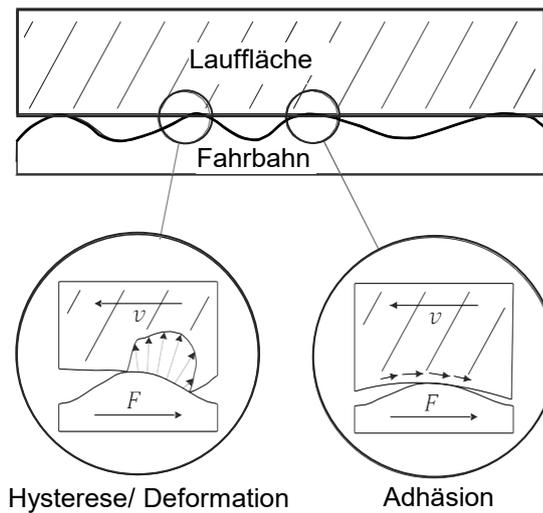


Abbildung 2.3: Hysterese- und Adhäsionsreibung, Kontakt von Reifen zu Fahrbahn (Schramm, et al., 2018)

Bei Verformung unter Belastung ist ein viskoses und elastisches Werkstoffverhalten zu sehen. Dabei werden die Polymerketten zum einen elastisch gedehnt und zum anderen relativ zueinander verschoben. Bei realen Anwendungsfällen liegen zyklische Beanspruchungen vor und somit eine Phasenverschiebung  $\delta$  zwischen Dehnung und Spannung. Die entstehende Energie wird in Wärme umgewandelt. Als Resultat kann die Spannung  $\sigma$  wie folgt berechnet werden.

$$\sigma(t) = E' \cdot \varepsilon + E'' \cdot \frac{1}{\omega} + \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2)$$

Die Hysteresereibung kann auch als Verlustreibwert ausgedrückt werden. Dieser beschreibt die innere Dämpfung, welche durch die äußere Anregung verursacht wird. Die Hysterese entsteht durch den Energietransfer, der durch die Verformungsarbeit des Reifens resultiert. Die dadurch entstehende innere Reibung wird hauptsächlich in Wärme gewandelt. Ein wesentlicher Einflussfaktor hierbei ist die viskoelastische Eigenschaft des Reifenelastomers.

$$D = \tan\delta = \frac{E''}{E'} \quad (3)$$

Des Weiteren gilt die Adhäsionsreibung als wesentlicher Bestandteil des Reibungsmechanismus. Wie beschrieben, resultiert die Adhäsionsreibungskraft aus der intermolekularen Bindung des Elastomers und der rauen Oberfläche der Fahrbahn. Das Haftpotenzial eines Reifens wird gesteigert, indem mehr Bindungen zwischen beiden Flächen eingegangen werden können. Das heißt, eine größere Reifenaufstandsfläche erhöht das Haftpotenzial. Ein Zwischenmedium wie z. B. Wasser reduziert die Anzahl der möglichen Bindungskräfte und somit auch das Haftpotenzial des Reifens (Persson, 2001).

Die Anteile der Adhäsions- und Hysteresereibung an der gesamten Reibung resultieren aus der Frequenz der Gummianregung, der Gleitgeschwindigkeit und Oberflächenstruktur der Reibpartner. Diesen Zusammenhang haben (Williams, Landel und Ferry) experimentell ermittelt. Seitdem ist der Zusammenhang auch bekannt als WLF<sup>6</sup>-Transformation und kann zur Entwicklung von Reifen genutzt werden, die ein bestimmtes Betriebsverhalten haben sollen (Breuer, et al., 2017). Dabei ist beschrieben, dass bei Absenkung der Temperatur von viskosen Werkstoffen eine Relaxation in Form einer Erhöhung der Frequenz erfolgt. Mit diesem Zusammenhang lassen sich prototypische Meisterkurven erstellen, die den Verlustreibwert bei konstanter Anregung über der Temperatur darstellen. Dieses Verhalten veranschaulicht Abbildung 2.4. Hierbei ist der Verlauf einer Rußlaufstreifenmischung im Vergleich zu einer Gummimischung mit Silica dargestellt. Im ersten Frequenzbereich von 100 Hz bis 10.000 Hz ist bei der Silica-Mischung im Vergleich zur Rußmischung ein höherer Verlustbeiwert zu sehen.

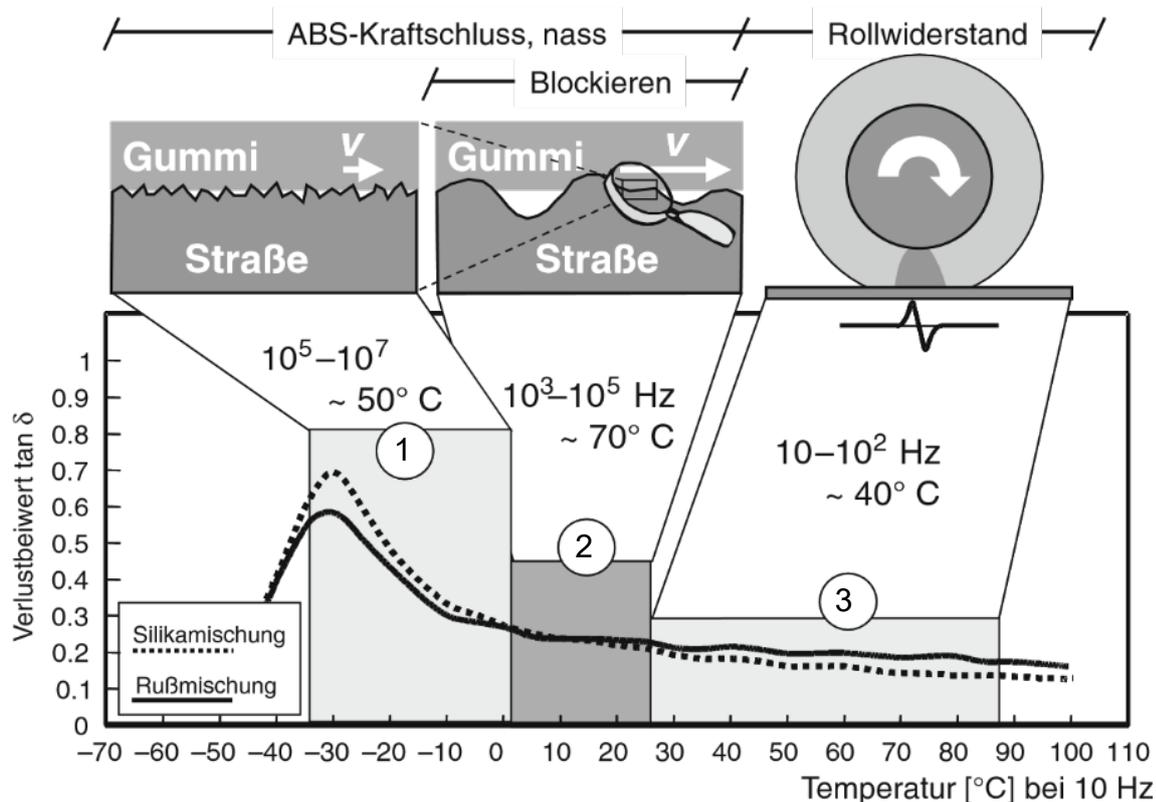


Abbildung 2.4: Verlauf von Verlustfaktor  $\tan \delta$  über der Temperatur, für zwei Reifenmischungen, deren Kraftschluss auf nasser Straße und Rollwiderstand (Breuer, et al., 2017)

Teilt man die Darstellung in drei Bereiche ein, so sind der erste und zweite Bereich relevant für Bremsvorgänge auf nasser Fahrbahn. Bereich eins, definiert den „Quasi-Haftbereich“ mit

<sup>6</sup> nach Williams, Landel, Ferry

den höchsten Anregungen und kleinen Gleitgeschwindigkeiten im vorderen Bereich des Reifenlatsches<sup>7</sup>. Der Bereich zwei stellt die mittleren Anregungen und somit die Hysteresereibung im Abschnitt der Längenskalen der Fahrbahnstruktur dar. Da beide Bereiche maßgeblichen Einfluss auf den Bremsvorgang haben, ist ein Ziel bei der Auslegung von Reifen, möglichst hohe Verlustreibwerte zu erzielen. Im dritten Bereich ist der niederfrequente Bereich bei dem Abrollen zu sehen. In diesem Bereich ist eines der Auslegungsziele die Minimierung des Rollwiderstands. Des Weiteren ist zu sehen, dass durch die Beimischung von Silikat das Verhalten in dem zweiten und vor allem im dritten Betriebsbereich optimiert werden kann.

Tritt ein Zwischenmedium wie zum Beispiel Wasser auf, so wird die molekulare Bindung beeinflusst. Dies kann bei geringer Drainage des Reifens oder großen Wasserfilmhöhen die Adhäsionsreibung so beeinflussen, dass das Fahrverhalten unkontrollierbar wird. Verantwortlich für dieses Verhalten ist wesentlich der viskose Reibanteil. Dieser Anteil beschreibt und beeinflusst maßgeblich die möglichen Scherkräfte, die aufgrund der auftretenden Zwischenschicht übertragbar sind. Beeinflusst wird der Anteil von der Viskosität der Zwischenschicht, der Gleitgeschwindigkeit und Schichtdicke. Kommt es zum vollständigen Verlust der Reibpartner, liegt ausschließlich viskose Reibung vor, die auch „Aquaplaning“ genannt wird.

Beim Antreiben und Abbremsen entsteht zusätzlich die Kohäsionsreibung in der Verzahnung der Reibpartner. Da diese nur einen sehr kleinen Anteil im Vergleich zu den anderen Effekten einnimmt, wird sie in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

Für die gesamte Reibkraft ergibt sich:

$$F_{\text{Reib}} = F_{\text{Hysterese}} + F_{\text{Adhäsion}} + F_{\text{viskose Reibung}} + F_{\text{Kohäsion}} \quad (4)$$

Da das Kraftschlusspotenzial von mehreren Faktoren wie Reifeneigenschaften, Relativgeschwindigkeiten, Temperaturen, Fahrbahneigenschaften und Schlupf abhängt, werden diese im Folgenden vorgestellt.

Die Relativbewegungen zwischen Fahrbahn und Reifen definieren über den Kraftschluss den Rollvorgang. Dieser wird in der Literatur als „Umfangsschlupf“  $S$  bezeichnet und definiert die normierte Differenz der Umfangsgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit im Radmittelpunkt:

$$S = \frac{\Delta v}{v} = \frac{\omega \cdot r_{\text{dyn}} - v}{v} \quad (5)$$

Bei detaillierter Betrachtung wird deutlich, dass sich der Umfangsschlupf aus Formänderungs- und Gleitschlupf zusammensetzt. Der Gleitschlupf beschreibt das Gleiten des Reifens im Rei-

<sup>7</sup> Kontaktfläche von Reifen und Fahrbahn.

fenlatsch. Der Deformationsschlupf wird verursacht durch die Verformung des viskoelastischen Laufstreifens (Schramm, et al., 2018). Nach (Bachmann, 1998) und (Klempau, 2003) zeigt der Schlupf bei der Beschleunigung ein fast linear ansteigendes Verhalten. Dieser Anstieg führt ausschließlich zu Deformationsschlupf. Dabei wird der Laufstreifen verformt und die Längsreibung steigt bis zum Reibwertmaximum  $\mu_{\text{Max}}$  an. In diesem Punkt sind die Profilelemente maximal vorgespannt. Wird der Gesamtschlupfzustand weiter gesteigert, verringert sich der Deformationsschlupf und es tritt vermehrt lokales Gleiten auf. Das Resultat sind verringerte Reibkräfte. Blockiert das Rad, so liegt ausschließlich Gleitschlupf vor ( $S = 100\%$ ). Dieser Verlauf ist qualitativ in Abbildung 2.5 dargestellt. Bei der Aufnahme der Kurve wurde ein PKW-Sommerreifen mit den Abmessungen 195/65/R15 bei trockener Fahrbahn verwendet.

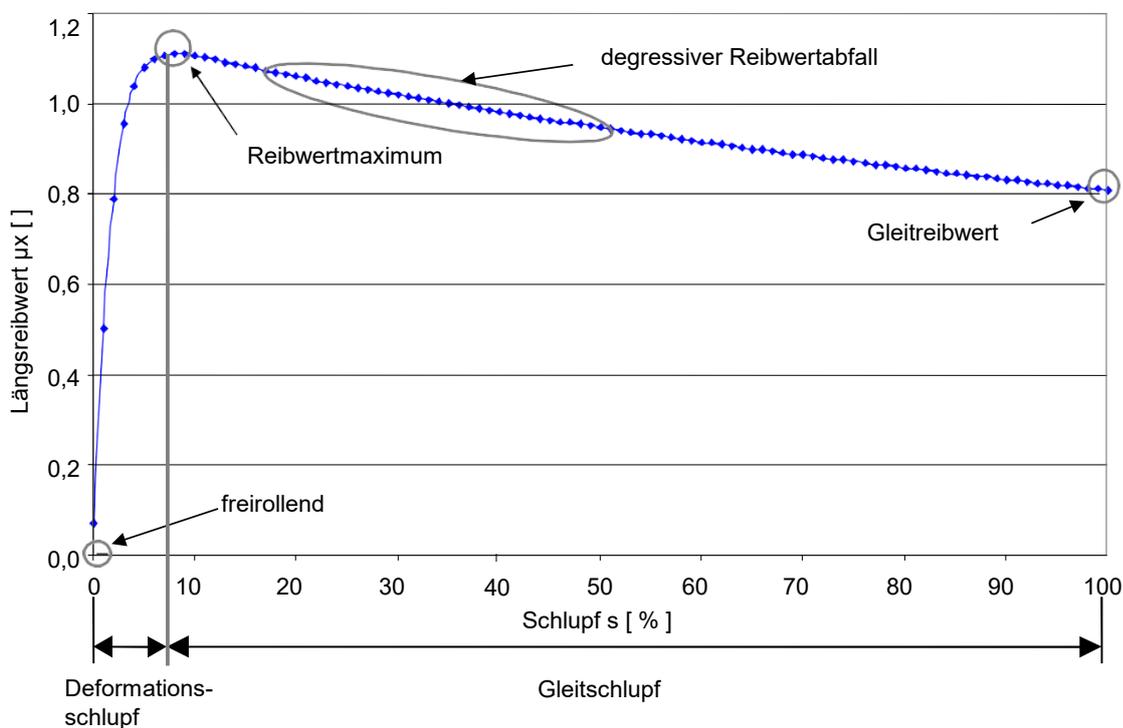


Abbildung 2.5: Reibwert-Schlupf-Kurve (Klempau, 2003)

Die Schlupfkurve startet bei null und steigt steil an. Der Steigungsgradient der Kurve ist primär von der Reifensteifigkeit abhängig. Gut nachvollziehbar ist das im Bereich der höheren maximalen Reibwerte. Des Weiteren ist bei niedrigem Kraftschlusspotential eine Korrelation zwischen der Anfangssteigung und den maximalen Reibwerten zu sehen. Die Begründung hierfür ist, dass bereits bei niedrigem Kraftschlusspotential und sehr geringen Schlupfwerten, lokales Gleiten vorliegt. Der maximal mögliche Reibwert kann variieren. Einflussgrößen sind unter anderem die Fahrbahn (z. B. Textur, Bauart, Zustand, trocken, nass, verschneit), der Reifen (z. B.

Mischung, Profil und Druck), der Fahrzustand (z. B. Radlast oder Schräglaufwinkel) und die Umgebungsbedingungen wie zum Beispiel die Temperatur.

Der Reibwertverlauf lässt sich über die Schubspannungsverteilung bei Brems- und Antriebsmomenten darstellen (Abbildung 2.6).

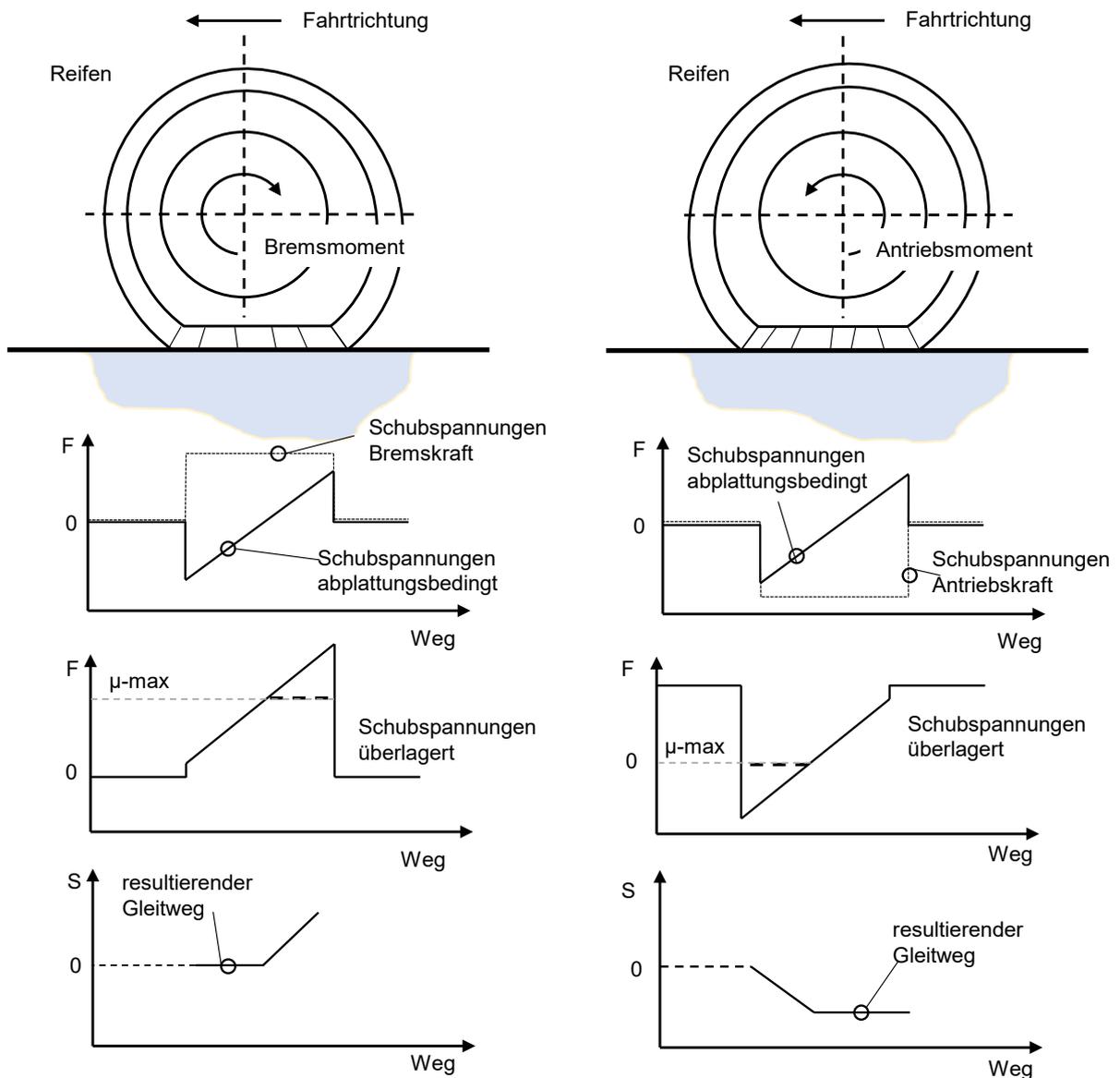


Abbildung 2.6. Schubspannungen im Reifenlatsch (Fach, 2008)

Abbildung 2.6 zeigt schematisch die Verformung der Reifenborsten bei auftretendem Brems- und Antriebsmoment. Darunter wird der Verlauf der Schubspannung in Brems- und Antriebsmoment aufgezeigt. Die Kräfte, die von außen einwirken und lokale Effekte herbeiführen, werden stark vereinfacht als Rechteckfunktion dargestellt. Im realen Anwendungsfall liegt im Einlaufbereich des Reifens eine ansteigende lokale Kraft vor. Der Grund hierfür ist, dass die Profilelemente eine gewisse Strecke benötigen, um eine gleichmäßig hohe Kraft aufzubauen. Der nächste Abschnitt zeigt die überlagerten Schubspannungen. Aus den Abbildungen ist zu

entnehmen, dass es bei beiden lokalen Kraftzuständen zu einer Überschreitung des maximal möglichen Reibwerts kommt. Je nach Belastungsfall des Reifens wird lokales Gleiten verursacht. Bei Bremskräften tritt Gleiten zum Ende des Reifenlatschs ein. Wird dieser Punkt weiter überschritten stellt sich vollständiges Gleiten ein, was zum Stillstand oder zu einem durchdrehenden Rad führt. Dabei liegt der maximale Reibwert auf dem Niveau des Gleitreibwerts (Burckhardt, 1993) (Gnadler, et al., 1995) (Fach, 2008).

Damit dieses Verhalten besser verstanden werden kann besteht die Möglichkeit, das Reifenverhalten zu modellieren. Dazu wird im ersten Schritt der Reifen mit einem Koordinatensystem versehen. Der Koordinatenursprung liegt im Reifenlatsch. Die x-Achse bildet sich aus dem Schnitt der Radebene mit der Straße und zeigt in Längsrichtung. Die z-Achse zeigt senkrecht von unten nach oben und hat ihren Ursprung im Mittelpunkt der Aufstandsfläche. Abgebildet wird das in der Abbildung 2.7.

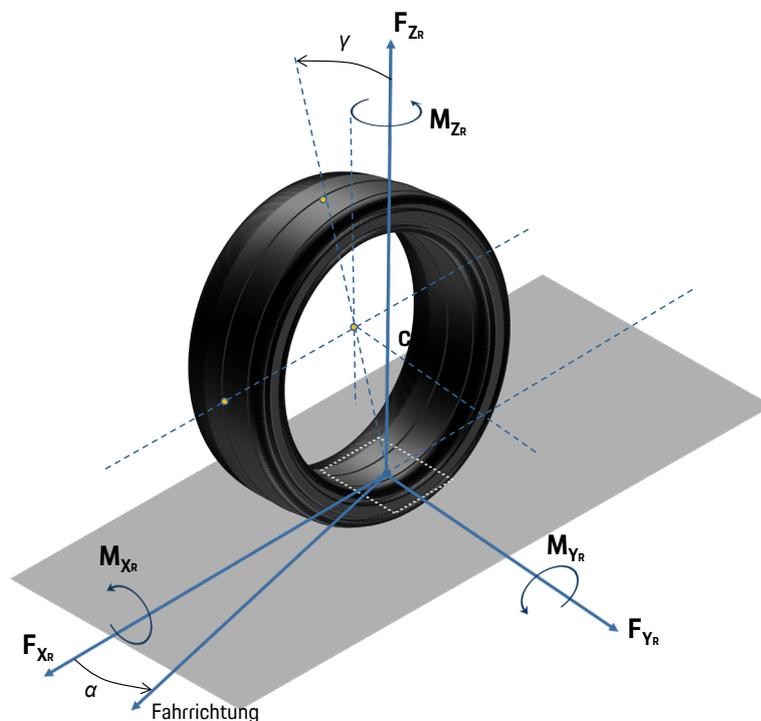


Abbildung 2.7: Orientierungen, Kräfte und Momente am Reifen

Die angreifenden Kräfte, Momente und die reibschlüssige Kraftübertragung sind identisch zu denen, die anfangs beschrieben wurden. Die Kraftübertragung zwischen Straße und Reifen erfolgt durch laterale und longitudinale Verspannung und Schlupf des Reifens. Die angreifenden Kräfte wirken dabei in zueinander senkrechten Richtungen ( $F_x; F_y; F_z$ ). Der Winkel  $\alpha$  beschreibt den Schräglaufwinkel,  $\gamma$  den Sturzwinkel. Beides sind wichtige Stellgrößen für die Fahrdynamik, anliegenden Kräfte und Momente am Reifen. Darüber hinaus sind weitere Parameter für eine Modellbildung wichtig. Diese sind in Abbildung 2.8 dargestellt.

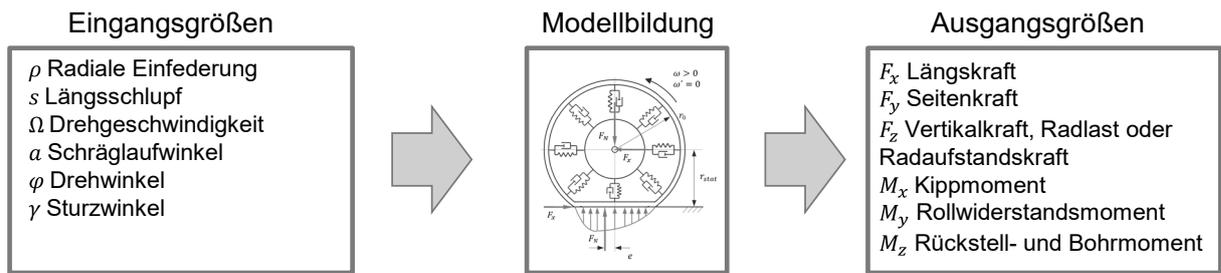


Abbildung 2.8: Eingangs- und Ausgangswerte für ein Reifenmodell und gerader Straße

Bei dieser Darstellung und den Ein- und Ausgangsgrößen wird angenommen, dass sich der Reifen in einer Ebene bewegt. Für die prinzipielle Erklärung der fahrdynamischen Effekte am rollenden Rad, werden im Folgenden die Grundlagen erläutert. Prinzipiell ist in diesem Modell der Reifen über Feder-Dämpfer-Elemente mit dem Rad verbunden. Die Eigenschaft der Dämpfung übernimmt das Gummimaterial. Die Pressung ist geschwindigkeitsabhängig und im Einlaufbereich des Reifenlatsch größer als im Auslaufbereich. Aufgrund des rollierenden Rades bleibt der Betrag der Normalkraft  $F_N$  fast unverändert. Aus diesem Grund kann auch der statische Reifenradius  $r_{stat}$ , der den Abstand zwischen Radaufstandsfläche und Radachsenmittelpunkt im statischen Zustand beschreibt, verwendet werden. Der Angriffspunkt der Normalkraft wird aufgrund der Verschiebung der Kräfte in den Einlaufbereich um den Betrag  $e$  ebenfalls aus der Mitte des Latschs nach vorne verlagert. Dieses Verhalten ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

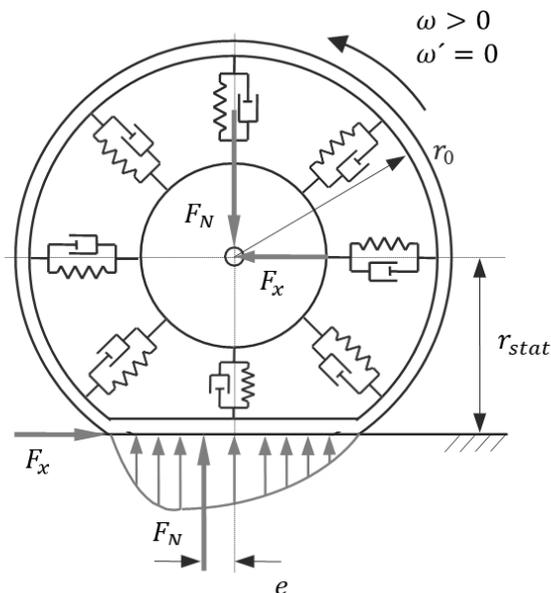


Abbildung 2.9: Kräfte und Momente am Rad, Erklärung Rollwiderstand (Schramm, et al., 2018)

Aus dem Momententengleichgewicht des beschleunigungsfrei rollenden Rads ergibt sich

$$F_x r_{stat} - F_N e = 0 \quad (6)$$

und daraus die Rollwiderstandkraft

$$F_R = F_x = \frac{e}{r_{stat}} F_N. \quad (7)$$

Bei radialem Druck auf den Reifen hat dieser eine federnde Komponente. Die Reifeneindrückung  $\rho$  in der z-Achse hat die Federsteifigkeit  $k_z$ . Die Federsteifigkeit ist maßgeblich abhängig von:

- der Radlast  $F_z$ ,
- dem Fülldruck  $P$ ,
- der Belastungsfrequenz  $f$ ,
- der Umfangsgeschwindigkeit  $\omega_R$  und
- dem konstruktiven Aufbau des Reifens

Die Berechnung der Reifensteifigkeit  $k_z$  im linearen Bereich kann vereinfacht wie folgt durchgeführt werden:

$$k_z = \frac{F_z}{\rho}. \quad (8)$$

### Reifenmodell Magic-Formula

Das Reifenmodell „Magic-Formula“ wurde ursprünglich von (Pacejka, et al., 1993) entwickelt und in (Pacejka, 2006) weiter verbessert. Dieses mathematische Reifenmodell wird benutzt, zur Simulation und Darstellung der Kräfte, die von dem Reifen auf die Achse, Lenkung und das Fahrzeug wirken. Anhand einer rein mathematischen Funktion wird der Kontakt von Rad zu Boden unter stationären Bedingungen beschrieben. Der Aufbau der Funktion ist phänomenologisch. Das heißt, dass die mathematische Beschreibung durch quasistatische Versuche approximiert wird. Die Magic-Formula Parameter können wie folgt interpretiert werden:

- C: Beeinflusst die Form der Kurve – Strecken in x-Richtung
- D: Maximale Kraft bzw. maximales Moment
- E: Zusätzliche Dehnung oder Kompression der Kennlinie
- BCD: Steigung der Kennlinien bei Nullschlupf (Steifigkeit)

Als Ausgangsgröße  $y$  können die Umfangskraft, Querkraft oder das Rückstellmoment berechnet werden. Eingangsgrößen sind der Längsschlupf  $S$  oder der Schräglaufwinkel  $\alpha$ .

Mathematisch ist folgende Formulierung die bekannteste:

$$y = D * \sin[C * \arctan\{B * x - E * (B * x - \arctan(B * c))\}]. \quad (9)$$

Damit die gesuchte Ausgangsgröße  $Y(X)$  zu einer Eingangsgröße  $X$  berechnet werden kann, wird unter Anwendung eines vertikalen Offsets  $S_v$  korrigiert. Daraus ergibt sich:

$$Y(x) = y(x) + S_v \quad (10)$$

Außerdem können die Kennlinien horizontal über einen Offset  $S_h$  positioniert werden:

$$x = X + S_h \quad (11)$$

Die Interpretation der Offsets, Steifigkeit und der maximale Wert wird in der Abbildung 2.10 dargestellt.

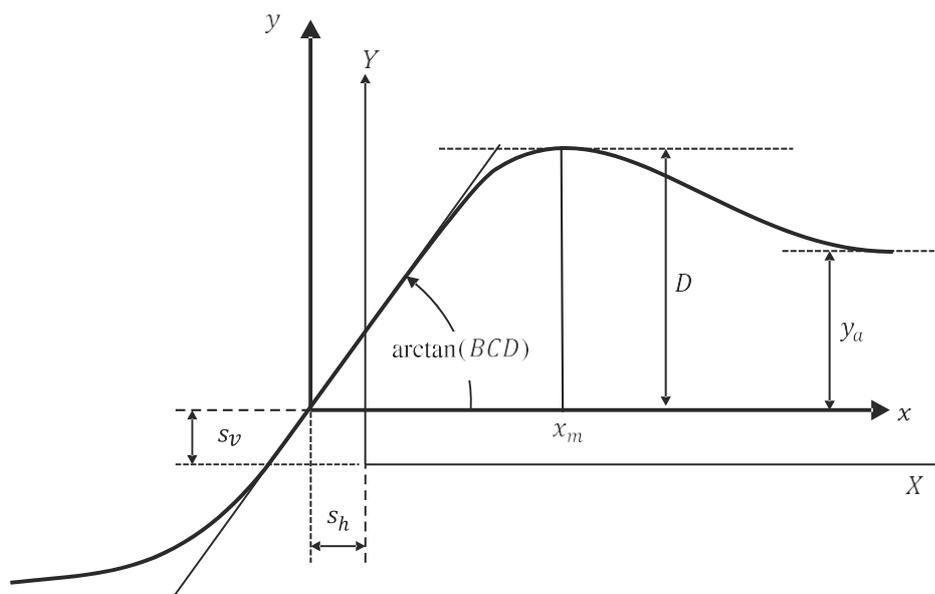


Abbildung 2.10: Magic Formula-Koeffizienten, Beschreibung einer Kennlinie

Des Weiteren werden bei diesem Reifenmodell Fahrbahn und Felge als starre Körper betrachtet, die über eine steife Reifenfeder miteinander verbunden sind. Der Kontakt von Reifen und Fahrbahn wird bei dieser Betrachtung als idealer Reifenaufstandspunkt definiert. Dass sich die Reifenflanke dabei verformt, wird in diesem Modell nicht in Betracht gezogen. Die Reduzierung des pneumatischen Nachlaufs bei zunehmendem Schräglaufwinkel wird berücksichtigt (Pacejka, 2006) (Adamski, 2014). Anzumerken ist, dass Vertikalkräfte nicht korrekt abgebildet werden. Die Ausgabe erfolgt in der Radmittelebene anstelle in Querrichtung des Reifenlatschs. Der Grund hierfür ist die Annahme eines idealisierten Aufstandspunkt des Reifens. Eine reale

Untersuchung von Vertikalkräften auf dreidimensionalen Fahrbahnen kann dieses Reifenmodell nicht leisten. Für eine zweidimensionale Modellierung bestehend aus Fahrtrichtung und Höhenprofil ist die Genauigkeit ausreichend. Stationäre oder quasistationäre Zustände wie zum Beispiel eine Lenkwinkelrampe auf ebenen Fahrbahnen können mit diesem Modell gut simuliert werden.

## 2.2 Fahrbahn

Eine weitere maßgebliche Größe für den maximalen Reibwert sind die Fahrbahnstrukturen und deren Griffigkeiten. Dabei wird grundsätzlich zwischen Mikro-, Makro-, Megatextur und Unebenheit unterschieden. Definiert wird die jeweilige Struktur über dessen Wellenlänge  $[\lambda]$ . Mikrotextrur:  $\lambda \leq 0,5\text{mm}$ , Makrotextrur:  $0,5\text{mm} < \lambda \leq 50\text{mm}$ , Megatextrur:  $50\text{mm} < \lambda \leq 0,5\text{m}$ , Unebenheit:  $0,5\text{m} < \lambda \leq 50\text{m}$ . Diesen Wellenlängen können Eigenschaften zugewiesen werden. Diese sind der Abbildung 2.11 zu entnehmen.

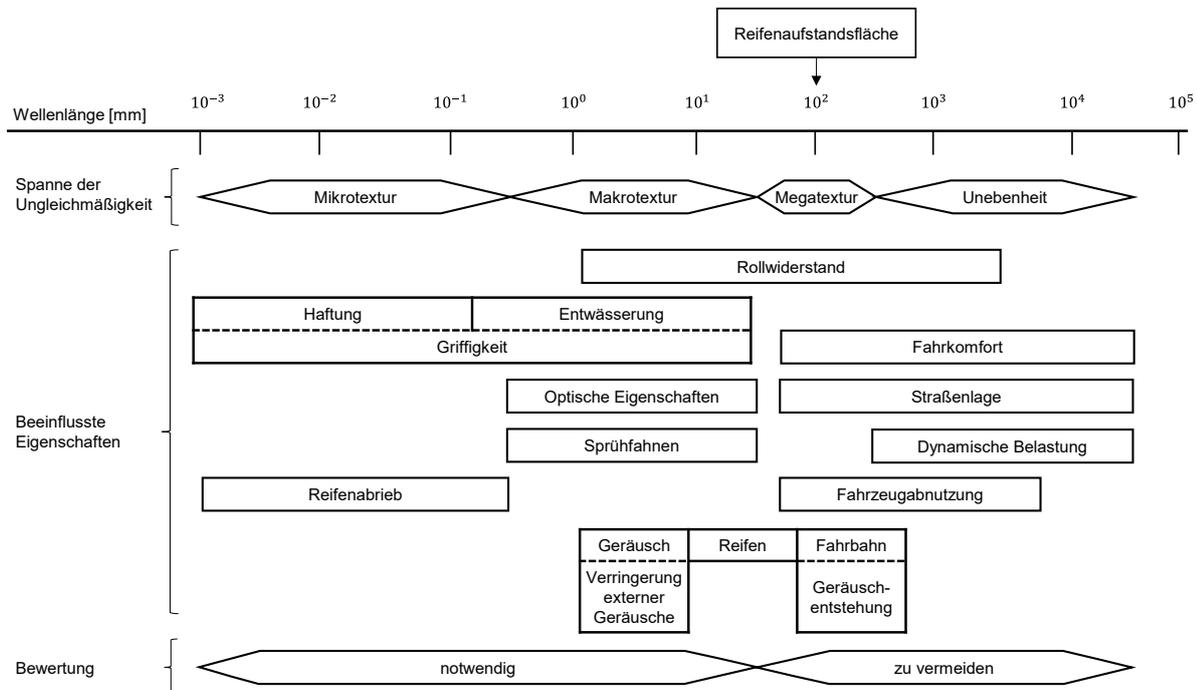


Abbildung 2.11: Wellenlängenspektrum der Oberflächenbeschaffenheit von Fahrbahnen (Klempau 2003)

Die Mikro- und Makrotextrur sind für die Griffigkeit der Fahrbahn verantwortlich. Die Megatextrur sowie Unebenheiten beeinflussen den Fahrkomfort und die Sicherheit.

In Bezug auf den Reibwert kann gesagt werden, dass bei trockener oder nasser Fahrbahn Asphaltoberflächen mit hoher Schärfe und grober Textur zu maximalen Reibwerten führen. Im Gegensatz dazu ist bei nasser Fahrbahn die Mikro- und vor allem die Makrotextrur zum Beispiel auf Kopfsteinpflaster sehr gering. Dies führt zu extrem abfallenden Reibwerten (Klempau, 2003) (Brückert, et al., 2012).

## 2.3 Zwischenmedium „Fahrbahnässe“

Damit die Wasserhöhe in absoluten Zahlen und deren Häufigkeitsverteilung aufgezeigt werden können, werden im Folgenden aufgenommene Daten von Glätte-Melde-Anlagen (GMA) ausgewertet. Bei den Meldeanlagen handelt es sich um ein Netz von Anlagen, bei denen Sensoren eingesetzt werden, welche die Wasserhöhe erfassen. Diese werden aus Kosten- und Effizienzgründen hauptsächlich auf Bundesautobahnen (BAB) eingesetzt (Lufft, 2018) (Holldorb, et al., 2015). Über den Deutschen Wetterdienst können die erfassten Daten abgerufen werden (Deutscher Wetterdienst, 2018).

Aus den Daten ist zu entnehmen, dass Wasserhöhen kleiner 0,6 mm des Öfteren vorkommen. Wasserhöhen größer als 1 mm wurden dagegen nur selten aufgezeichnet. Die Ursache hierfür können Drainagen oder Fahrbahnen ohne Spurrillen sein, bei denen das Wasser schnell versickert oder direkt abfließen kann. Damit diese Messreihe validiert und ausgebaut werden kann, wurde ein Versuch von der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG durchgeführt (Schmiedel, 2018). Dazu wurden Fahrzeuge mit einem MARWIS-Sensor der Firma Lufft GmbH ausgerüstet und im Straßenverkehr bewegt. Damit der Fahrbahnässegrad durch die Überrollung der Reifen nicht beeinflusst wird, liegt der Sensorbereich kurz vor der Vorderachse. In Abbildung 2.12 wird der Sensor und eine Signal-Interpretationstabelle dargestellt.



Abbildung 2.12: MARWIS Sensor, Firma Lufft GmbH

Als grundlegende Prämisse für die Fahrbahnaufzeichnung wurde festgelegt, dass der MARWIS-Sensor erst ab einer Wasserhöhe von 0,02 mm und einer Dauer von größer gleich 5 Sekunden aufzeichnet. Des Weiteren kann der Sensor bei der Aufzeichnung die Fahrbahntemperatur erfassen. Mit einer Abtastrate von 100 Hz ergaben sich circa 64 Stunden aufgezeichnete Daten. Diese Daten werden in folgende Fahrbahnzustände definiert: „feucht“, „nass“ und „chemisch nass“. Aufgezeichnet wurden hierzu Fahrbahntemperaturen kleiner 1,5 °C und

Wasserhöhen gemäß den oben genannten Schwellen. Dies wurde für eine weitere Unterteilung in die Fahrbahnzustände „Feucht und Nass“ und „Chemisch Nass“ genutzt. Dabei ist „Chemisch Nass“ wie folgt definiert: Die Eisbildung wird durch den Einsatz von Taumitteln verhindert. Die Wasserfilmhöhe liegt auf oder über der Feuchte-Schwelle und die Fahrbahntemperatur ist unter  $1,5^{\circ}\text{C}$  (Lufft, 2018). Die Auswertung der Daten ergab ein ähnliches Ergebnis wie das der Glätte-Melde-Anlagen (Schmiedel, 2018).

Des Weiteren wurde in (Schmiedel, 2018) ein Fahrversuch zur Ermittlung der vorliegenden Reibwerte durchgeführt. Die erreichten Beschleunigungen liegen hauptsächlich im Bereich von 0,7 bis 1,1. Außerdem lässt sich aus den Ergebnissen entnehmen, dass aufgrund der Wasserhöhe nicht auf den exakten Reibungsbeiwert referenziert werden kann. Trotz der Streuung und vereinzelter Ausreißer sind die Mediane für „Feucht und Nass“ (0,886) und „Chemisch Nass“ (0,825) sehr eng beieinander (Schmiedel, 2018). Diese Ergebnisse decken sich mit den Studien von (Müller, et al., 2015). Für die Verifizierungs- und Validierungsstrategie werden diese Ergebnisse nochmals aufgegriffen und verarbeitet.

## 2.4 Geschwindigkeit und Temperatur

Die Gleitgeschwindigkeit, die für Adhäsions- und Hysteresereibung relevant ist, ergibt sich aus der Fahrgeschwindigkeit und dem Schlupf. Mit zunehmender Geschwindigkeit verschiebt sich der Betriebspunkt hin zu einer höheren Anregungsfrequenz und überlagert sich mit der Temperatur im Reifenlatsch.

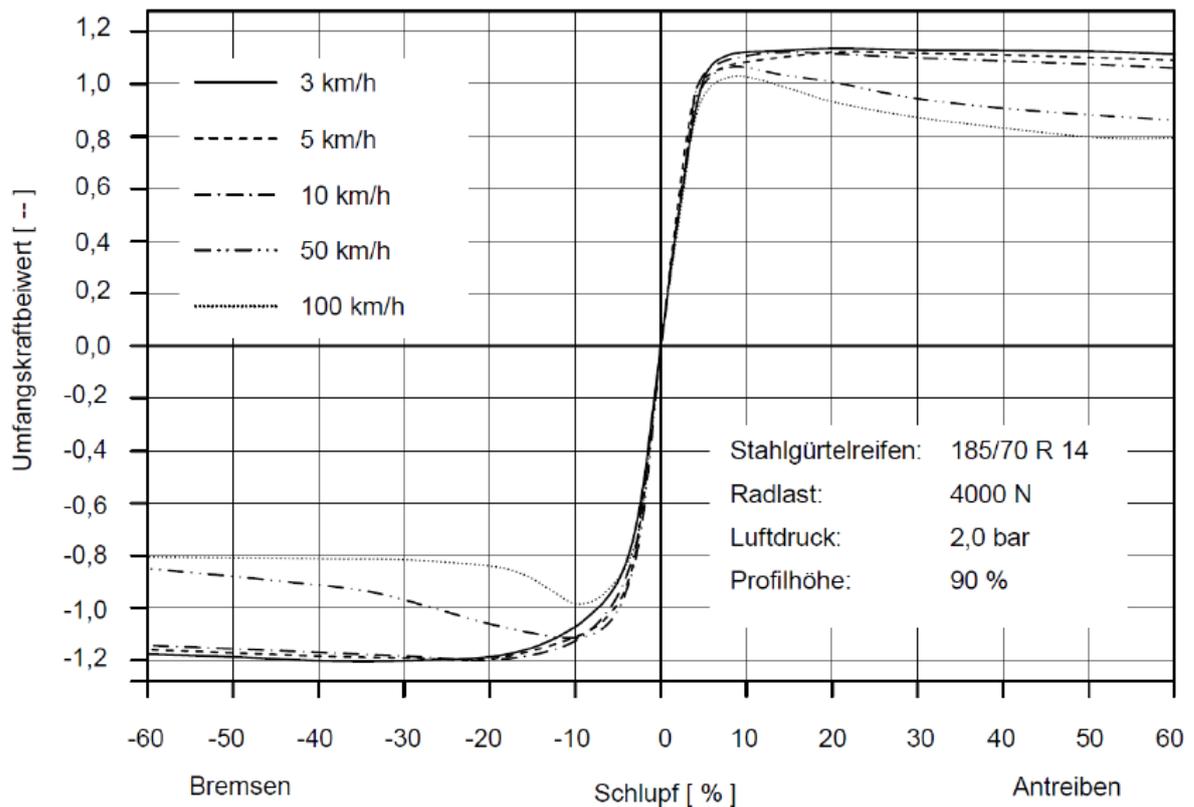


Abbildung 2.13: Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwerts (Gnadler, et al., 1995)

Das Drainagevermögen des Reifens und die Geschwindigkeit haben vor allem auf nassen Fahrbahnen einen korrelierenden Einfluss auf den möglichen Reibwert. Bereits geringe Wasserfilmhöhen haben bei Reifen mit unzureichenden Drainageeigenschaften einen starken negativen Einfluss auf den Reibwert. Der Grund hierfür ist die abnehmende Adhäsionsreibung.

Nach (Persson, et al., 2005) ist das viskoelastische Verhalten des Gummis am Laufstreifen stark von der Temperatur abhängig und variiert aufgrund der verschiedenen Gummimischungen. Generell gilt, dass die Reifensteifigkeit in Längsrichtung mit sinkender Temperatur abnimmt. Dadurch nimmt die Steigung der  $\mu$ -Schlupf-Kurve im Bereich Formänderungsschlupf zu. Als Resultat kommt die Schubspannung im Reifenlatsch schneller an die Haftgrenze, was zu einer Vergrößerung des Gleitbereiches und somit zur Reduzierung des maximalen Reibwerts führt. Dieses Verhalten ist in Abbildung 2.14 dargestellt.

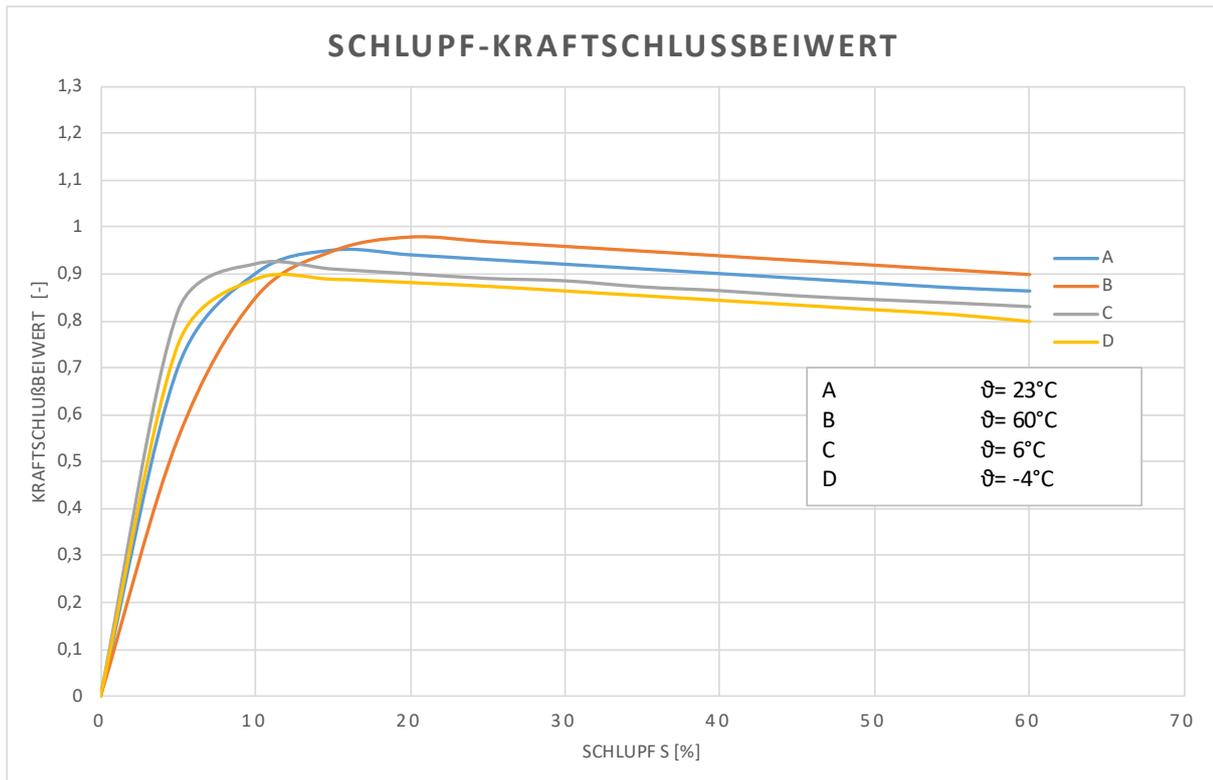


Abbildung 2.14: Temperaturabhängige Reibwerte (Klempau 2003)

Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, kommt es vor, dass das Wasser in der Zwischenschicht gefriert. Aufgrund der Flächenpressung wird eine sehr dünne Eisschicht aufgeschmolzen. Dadurch kommen Hystereseeffekte und viskose Reibung zum Tragen. Mit steigender Temperatur und Flächenpressung nimmt der Reibwert so lange ab, bis ausschließlich viskose Reibung vorliegt (Lahayne et al. 2016) (Klempau, 2003).

## 2.5 Reibwertermittlung

Zum heutigen Zeitpunkt gibt es kein serienreifes Konzept zur verlässlichen Reibwertermittlung. Es ist allerdings davon auszugehen, dass in naher Zukunft vielversprechende Ansätze und Konzepte zur Erfassung des Fahrbahnzustands veröffentlicht werden (Schramm, et al., 2020).

Im Kontext dieser Arbeit werden Verfahren beleuchtet, die serienmäßig verbaute Technik betreffen. Grundlegend können die Methoden zur Erfassung des Reibwerts in die zwei Kategorien effekt- und ursachenbasiert unterteilt werden.

Die ursachenbasierten Verfahren gründen auf der Beobachtung von Fahrbahneigenschaften und der Zwischenschicht. Mit Hilfe geeigneter Modellierungsverfahren kann aufgrund der Einflussgrößen ein Reibwert geschätzt werden.

Im Gegensatz dazu werden unter Berücksichtigung der Fahrdynamik die effektbasierten Verfahren genutzt, um den Reibwert zu berechnen. Dabei werden Messwerte extrapoliert und Schätzwerte für den vorliegenden maximalen Reibwert ausgegeben.

Somit liegt der grundlegende Unterschied darin, dass, im Gegensatz zu den ursachenbasierenden Verfahren, die effektbasierenden Verfahren verschiedene dynamische Fahrmanöver des Fahrzeugs für die Schätzung nutzen. Abbildung 2.15 stellt die zwei verschiedenen Ansätze dar.

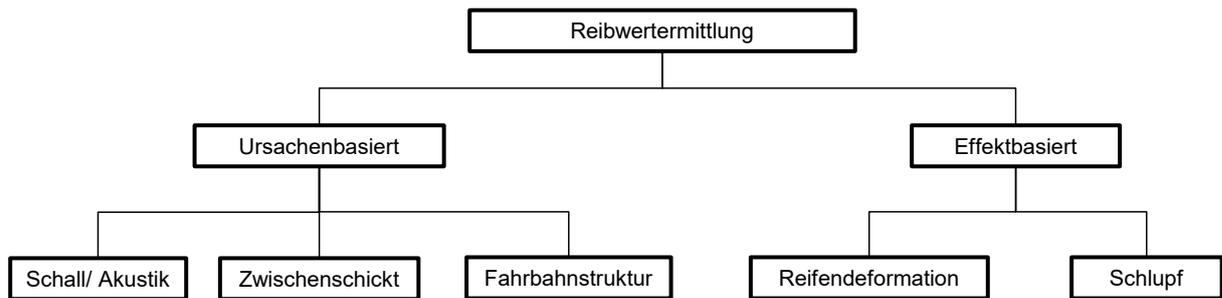


Abbildung 2.15: Methoden zur Reibwertschätzung

Die ursachenbasierten Verfahren benötigen eine spezielle Messtechnik und sind daher aufwändig und kostenintensiv für den Einsatz in der Serienproduktion. So kann die Fahrbahnstruktur mit dem Einsatz des Triangulationsverfahrens oder optischer Verfahren mit der Streifenlichtprobe gemessen werden. Durchgeführt werden diese Messungen mit speziellen Fahrzeugen, die den notwendigen Messaufbau verbaut haben, unter definierten Geschwindigkeiten sowie Streckenabschnitten (Müller, 2011) (Ullrich, et al., 1996).

Eine Möglichkeit, die Zwischenschicht zu detektieren, bieten optische Spektroskopie-Verfahren. Ein Beispiel hierfür ist der industrielle Sensor der Firma Lufft GmbH. Wie in Abschnitt 2.4 vorgestellt, werden die Höhe und Temperatur der Zwischenschicht erfasst (Lufft, 2018). Da die Kosten und der Bauraum nicht für den Serieneinsatz tauglich sind, werden diese Verfahren nicht weiterverfolgt. Alternativ geht die Entwicklung in Richtung Kamera- und Bildverarbeitungssysteme. Für die Verarbeitung dieser Daten werden Methoden der künstlichen Intelligenz genutzt. Dabei werden Fahrbahnausschnitte aufgenommen und auf der Grundlage von gelabelten Datensätzen trainiert und anschließend der Fahrbahnzustand klassifiziert. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick der Literatur, in der die ursachenbasierten Verfahren und deren Klassifikation eigesetzt werden.

Autor	Sensorik	Merkmale	Klassifikator	Klassifikation
(Holzmann et al. 2006)	Monokamera und Mikrofon	Grauwertematrix, Charakteristische Frequenzbänder	Statistische Korrelation mit vorgegebenen Klassen	Zustand: {Eis, Nässe, feuchtes Kopfsteinpflaster}
(Omer und Fu 2010)	Monokamera	RGB Histogramm, Gradienten	Support Vector Machine	Zustand: {trocken, Fahrspuren im Schnee, schneebedeckt}
(Nolte et al. 2018)	Monokamera	RGB Vollbilder	Überwacht lernende neuronale Netze	Zustand: {Schnee, Kopfsteinpflaster, Asphalt trocken/nass, Schotter}
(Schmiedel et al. 2019)	Körperschall	Fast Fourier Transformation (FFT)	Charakteristische Frequenzbänder	Zustand: {trocken, feucht, nass, sehr nass}
(Roychowdhury et al. 2018)	Monokamera	RGB Vollbilder	Überwacht lernende neuronale Netze	Zustand: {trocken, nass, Schneematsch, Schnee/Eis} Reibwert: {niedrig, mittel, hoch}

Tabelle 2.1: Ursachenbasierte Ansätze zur Reibwertschätzung

Bei den effektbasierten Methoden variiert der Aufwand zur Erfassung der relevanten Einflussgrößen stark. Einflussgrößen wie Schlupf, Nicken, Gieren oder Geschwindigkeit werden in modernen Fahrzeugen standardmäßig zur Regelung des Fahrverhaltens erfasst und können ohne weiteres verwendet werden. Des Weiteren sind moderne Fahrzeuge mit optischen Sensoren ausgestattet, die am oberen Rand der Windschutzscheibe verbaut sind. Diese werden heute noch nicht zur Erfassung des Straßenzustandes genutzt. Dennoch ist aus der Literatur zu entnehmen, dass die effektbasierten Methoden aufgrund Kosten, Effizienz und ihrer Robustheit zunehmend erforscht und weiterentwickelt werden. Einen guten Überblick zum Stand der Technik zeigt die Abbildung 2.16.

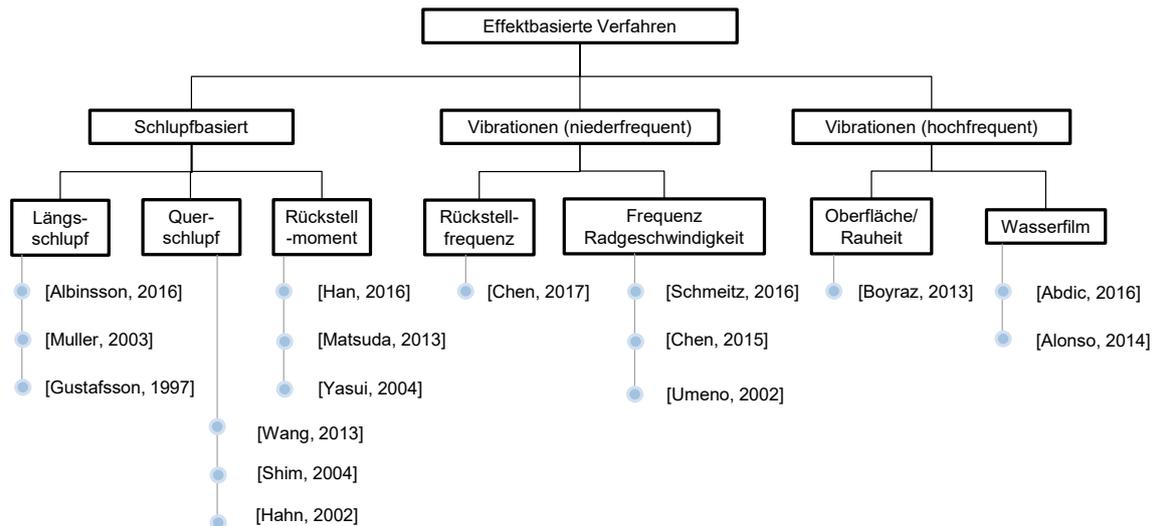


Abbildung 2.16: Überblick der effektbasierten Verfahren zur Reibwertschätzung (Acosta, et al., 2017)

Die Ausarbeitung von (Acosta, et al., 2017) gibt einen guten Überblick über die einzelnen Methoden und Ansätze sowie deren Ergebnisse. Eine weitere interessante Ausarbeitung ist die Ausarbeitung von (Eichhorn, 1994). Darin werden zur Erfassung und Beschreibung des Reibwerts verschiedene Effekte definiert und kategorisiert:

- Lokale Reifeneffekte: Es werden alle lokalen Effekte am Latsch genutzt.
- Globale Radeffekte: Es werden alle globalen Effekte, die am Rad anliegen, genutzt.
- Globale Fahrzeugeffekte: Der fahrzeugspezifische Fahrzustand wird genutzt.
- Parametergestützte Systeme: Erfassung, Verarbeitung der vorliegenden Einflussparameter und Rückkopplung zu dem Kraftpotenzial.

Im Folgenden werden die drei effektbasierten Effekte erläutert.

### 2.5.1 Lokale Reifeneffekte

Die Kraftübertragung erfolgt immer im Reifenlatsch. Daher kann mit den lokalen Reifeneffekten der Reibwert beschrieben werden. Eines der bekanntesten Verfahren hierzu ist die Verwendung des sogenannten Darmstädter Reifensensors, der in Abbildung 2.17 dargestellt ist.

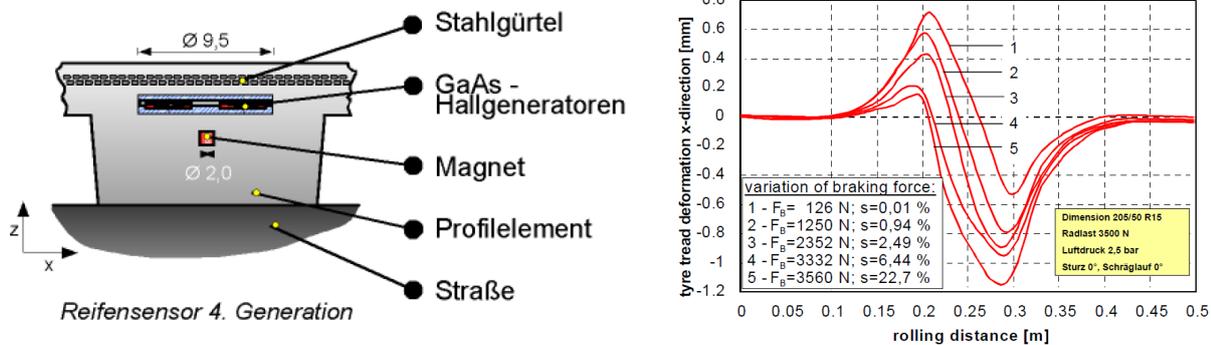


Abbildung 2.17: Reifensensor (li) und Signalausgabe bei verschiedenen Bremskräften (re), (Breuer, et al., 2017)

Der Sensor befindet sich in einem Profilelement und besteht unter anderem aus einem Permanentmagneten, einer Platine und bis zu fünf Hallsensoren, die sich auf der Innenseite des Reifengürtels befinden. Je nach Verformung des Profils kommt es zu einer Relativbewegung des Magneten. Aufgrund der Veränderung der magnetischen Flussdichte können die lokalen Kraftverhältnisse und deren Änderungen ermittelt werden. In Abbildung 2.17 rechts wird als positives Verformungssignal die Einlaufzone und als negatives die Auslaufzone dargestellt. Mit Zunahme des Schlupfs verschiebt sich die Deformationskurve. Aus diesem Zusammenhang kann der Reibwert ermittelt werden (Klempau, 2003) (Breuer, et al., 2002).

### 2.5.2 Globale Radeffekte

Globale Radeffekte sind die Effekte, die unmittelbar am Rad und dessen Aufhängung auftreten. Eine Möglichkeit, mit der die Kräfte ermittelt werden können, sind die Radrückstellmomente. Die auftretenden Kräfte können mit Dehnungsmessstreifen an den Spurstangen gemessen werden. Diese gemessenen Kräfte sind abhängig von der Achslast, Achskinematik, Geschwindigkeit, Reifendrücken, Lenkwinkel und Reibung aufgrund der Querkraft am Rad. Abbildung 2.18 zeigt den Verlauf der Zahnstangenkraft bei konstanter Kreisfahrt. Der Verlauf bei niedrigen Geschwindigkeiten und moderater Querbeschleunigung ist linear. Der nichtlineare Anteil tritt bei unterschiedlichen Reibwerten und Erhöhung der Geschwindigkeit bei gleichbleibenden Lenkwinkel unterschiedlich schnell auf.

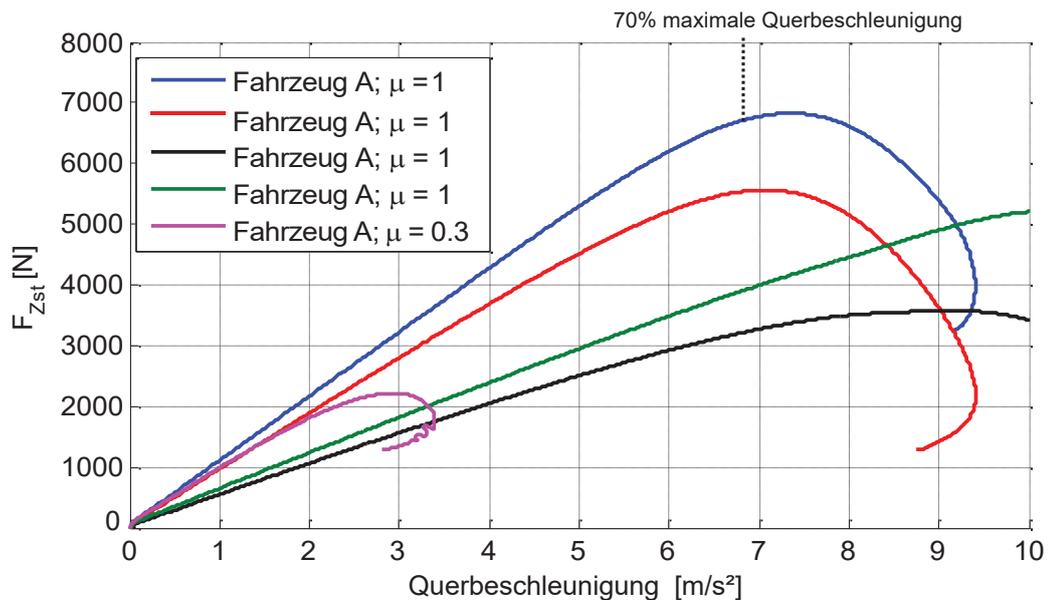


Abbildung 2.18: Simulierte Zahnstangenkraft über Querbeschleunigung (Schmiedel, 2014)

Die Verläufe der Kräfte über der Querbeschleunigung zeigen, dass bis zu der Ausnutzung der maximalen Querbeschleunigung von ca. 70% die Zahnstangenkraft linear über der Querbeschleunigung zunimmt. Des Weiteren wird bereits bei ca. 30 % der Kraftschlussausnutzung und bei einem Reibwert  $\mu$  von 0,3 die maximale Querbeschleunigung erreicht. Sofern die Spurstangenkraft bei hohen Reibwerten und über dem Verlauf der Querbeschleunigung bekannt ist, können niedrigere Reibwerte erkannt werden, bevor das Reibwertmaximum erreicht ist (Schmiedel, 2014) (Sprinzl, et al., 2009) (Fausten, 2014).

Die Ermittlung des Reibwerts aufgrund von ABS-, ESP- oder ASC-Eingriffen ist eine einfache und genaue Möglichkeit. Hierbei wird die Regelung der einzelnen Systeme an das Maximum des Reibwertes iterativ angenähert. Deutlich wird dies mit der Abbildung 2.19, wobei der Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeuges über dem Bremsdruckverlauf dargestellt wird. In der Abbildung ist der Bremsvorgang in drei Abschnitten dargestellt.

Abschnitt I ist vor dem Bremsvorgang, Abschnitt II die Bremsung ohne Regeleingriff und Abschnitt III die Bremsung mit Regeleingriffen. Abschnitt III zeigt, dass bei konstantem Pedal-Bremsdruck ( $P_{\text{Bet}}$ ) der anliegende Bremskolbendruck ( $P_{\text{R}}$ ) sich stufenweise an den maximal möglichen Schlupf annähert. Ist das Maximum erreicht bzw. überschritten, wird der anliegende Druck reduziert. Für die vorliegende Arbeit ist die Ermittlung des Reibwerts mit Regeleingriffen bedingt nutzbar, da der Reibwert nur in Grenzbedingungen voll ausgenutzt wird (Breuer, et al., 2017). Allerdings kann bei einer Fusion von mehreren Sensordaten ein Eingriff der Fahrdynamikregelsysteme eine gute Referenz bieten. Die Möglichkeit zur Einbindung wird in Kapitel 6 näher erläutert.

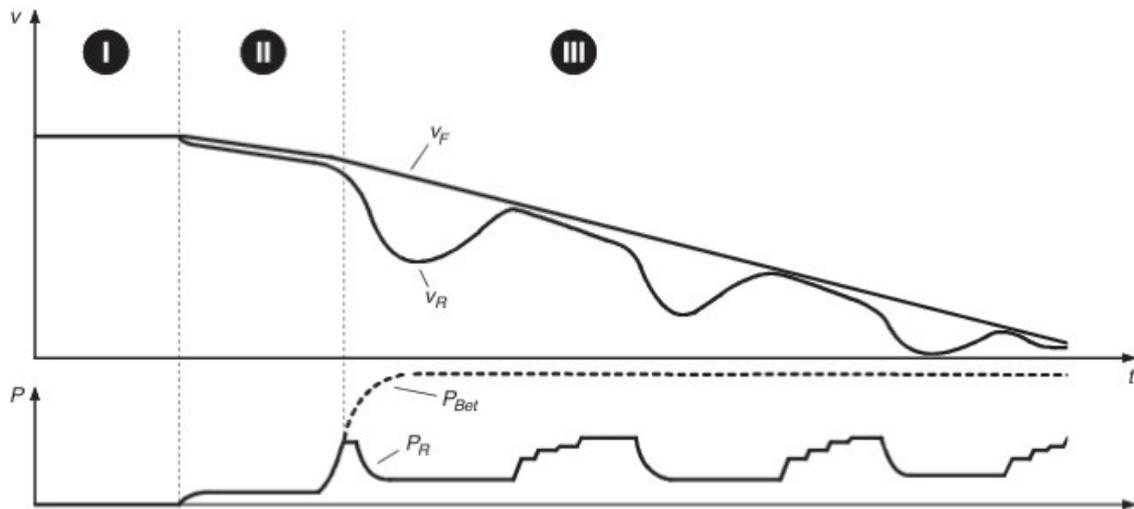


Abbildung 2.19: Bremsdruckverlauf, Geschwindigkeitsabbau bei einer ABS-Bremmung (Breuer, et al., 2017)

Des Weiteren kann nach (Grünberg, 1999) (Gustafsson, 1997) (Dieckmann, 1992) der Effekt des Reibwerts im Übertrag auf die Reibwert-Schlupf-Kennlinie genutzt werden, um den Reibwert zu ermitteln. Der Ansatz basiert auf einem linear verlaufenden Reibwertgradienten im Bereich von 0 bis ca. 1 %. Die Steigung im Mikroschlupfbereich ist bei trockener wie auch nasser Fahrbahn fast identisch. Allerdings gibt es einen signifikanten Unterschied bei glatten Fahrbahnen oder Aquaplaning ( $\mu < 0,4$ ). Damit

der Mikroschlupf erfasst und ausgewertet werden kann, ist eine hochauflösende Ermittlung des aktuellen Schlupfs des Reifens notwendig.

Erfolgen kann dies mit den Raddrehzahlsensoren und einem geeigneten Algorithmus. Leider kann auch bei diesem Verfahren keine stufenlose Vorhersage des Reibwerts erfolgen, da die Veränderung der Reifenkennliniensteigung nicht proportional zu dem vorhandenen Kraftschlusspotential vorliegt (Klempau, 2003).

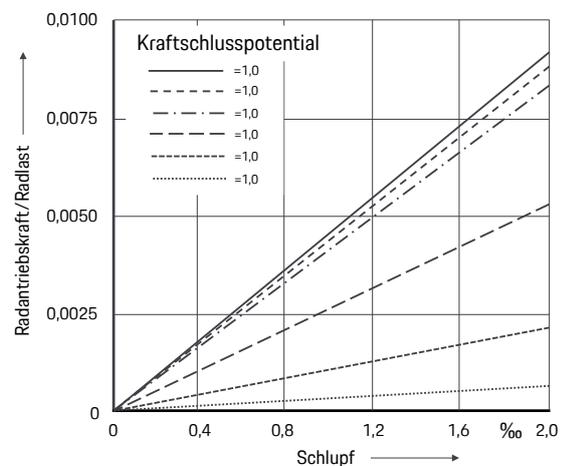


Abbildung 2.20: Mikroschlupf (Dieckmann, 1992)

### 2.5.3 Globale Fahrzeugeffekte

Das Konzept beruht hierauf, dass das Potenzial zum Kraftschluss in Längs- und Querrichtung anhand des Gradienten des Längsreibwerts (Schlupf) und Querreibwerts (Schräglaufwinkel) nahe dem Ursprung vorausgesagt werden kann. Zur Schätzung auf Längs- und Querdynamik dienen reale Messungen (mit einer Kraftmessfelge) der  $\mu - \alpha$  - und  $\mu - s$  - Kurven. Damit der Schlupf eindeutig bestimmt werden kann, ist es notwendig, den aktuellen Betriebspunkt des Reifens und den Schräglaufwinkel zu kennen. Bei dem Vorgehen werden folgende Sensoren

verwendet: Correvit zu Definition der Längs- und Quergeschwindigkeit, Beschleunigungsensoren für Längs- und Querrichtung, Giergeschwindigkeit-, Lenkwinkel-, Bremsdruck- und Raddrehzahlsensor. Mit diesen Sensoren und unter Kenntnis der statischen Radlasten werden die Einzelradlasten und -beschleunigung berechnet. Nun ist es möglich, mit Verwendung eines Reifenmodells die maximalen Reibwerte der jeweiligen Räder oder des Gesamtfahrzeugs zu berechnen (Witte, et al., 1995). Das Vorgehen ist in der Abbildung 2.21 dargestellt.

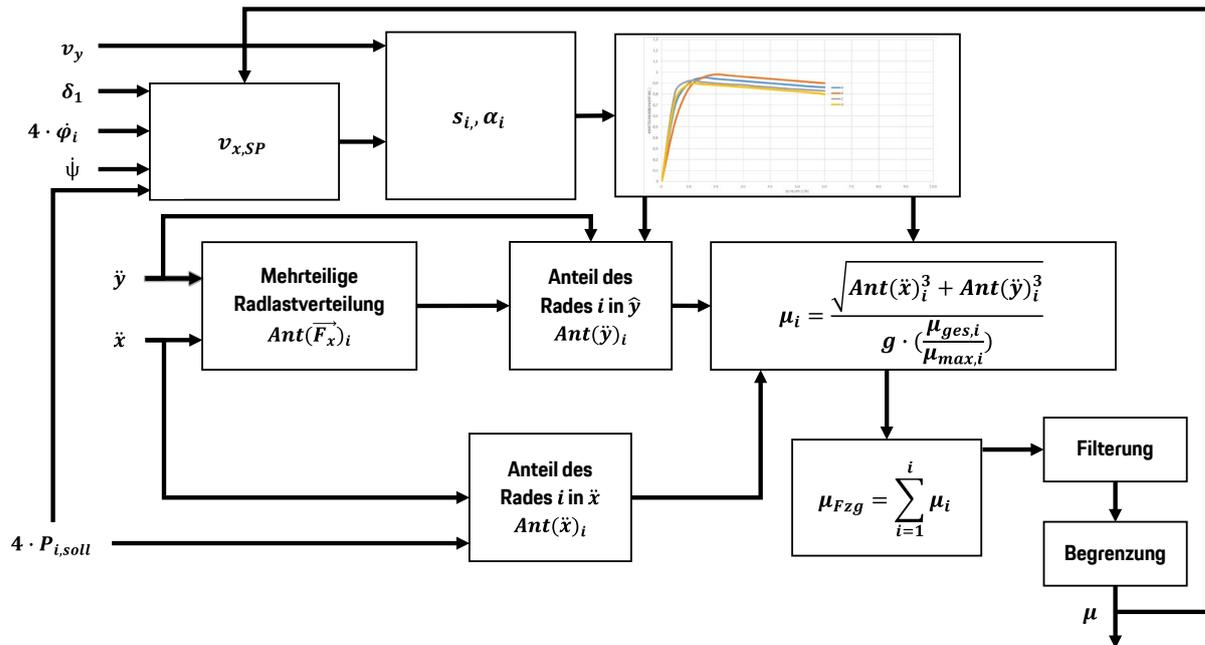


Abbildung 2.21: Globale Reibwertschätzung auf Fahrzeugebene (Witte, et al., 1995)

**Parametergestützte Systeme:** Hierbei wurde nach (Eichhorn, 1994) ein System entwickelt, das es ermöglicht, bei allen Fahrzuständen den Reibwert zu schätzen. Hierzu wird die Fahrbahnoberfläche nach verschiedenen Parametern mit diversen Sensoren erfasst und kombiniert bzw. fusioniert. Bei dem Schätzverfahren handelt es sich um ein ursachenbasiertes Vorgehen, wobei häufig optische Sensoren die Fahrbahntextur und ein Zwischenmedium wie z. B. Wasser erkennen. Auf dieser Basis kann der vorliegende Reibwert kategorisiert, aber nicht exakt bestimmt werden (Klempau, 2003).

Sensoren, die für die vorliegende Arbeit relevant sind, werden im Folgenden beschrieben.

### 2.5.4 Optische Sensoren

- Kamera: Nach dem aktuellen Stand der Technik werden Kamerasysteme hauptsächlich zur Objekterkennung und als Einparkhilfe genutzt. In (Schmiedel, 2014) wird gezeigt, dass sich eine Rückfahrkamera unter Verwendung einer Intensitätsanalyse und

einer Analyse des Frequenzraumes zur Gischterkennung eignet. Allerdings wurde erkannt, dass sich das Verfahren wegen wechselnder Licht- und Umgebungsverhältnisse nur begrenzt zur Reibwerterkennung eignet.

- Infrarot: Durch das spektrale Absorptionsverhalten von Substanzen, die mit verschiedenen Wellenlängen analysiert werden, kann der Fahrbahnzustand ermittelt werden. So können zum Beispiel Wasser und die Wasserhöhe auf der Fahrbahn erfasst werden. Mit anschließender Weiterverarbeitung ist es möglich, eine Reibwertkategorie auszugeben.
- Light Detection and Ranging (LIDAR): Nach (Koskinen, et al., 2009) lassen sich mit Verwendung der Lasertechnologie Abstände und Objekte erkennen. Durch eine höhere Auflösung ist die Bildqualität besser als bei kamerabasierten Sensoren. Außerdem können Objekte bis zu einer Entfernung von 200 Metern erfasst werden.
- Radio Detection and Ranging (RADAR): Durch unterschiedliche Frequenzen und eine Polarisation kann ebenfalls der Reibwert kategorisiert werden. So können nach (Koskinen, et al., 2009) bei 76 Gigahertz (GHz) Feuchtigkeit, bei 24 GHz Wasser, Eis und Schnee erfasst werden.

Alle vorgestellten Sensoren haben den Nachteil, dass mit ihnen kein exakter Reibwert ermittelt werden kann. Der Reibwert kann nur einzelnen Klassen zugeordnet werden. Als großen Vorteil bieten diese Sensoren die Möglichkeit, vorausschauend eine Veränderung zu detektieren, was im Zusammenhang mit HAF unabdingbar ist.

### **2.5.5 Akustische Sensoren**

Akustische Sensoren wie zum Beispiel Körperschallsensoren werden in der Automobilindustrie bereits heute in Serie verbaut. Ein Anwendungsfall ist der Verbau von Sensoren in den Radhäusern, um auf Aquaplaning zu erkennen. Dabei wird auftretendes Spritzwasser anhand des akustischen Signals aufgenommen und in verschiedene Klassen eingeteilt. Ein Anwendungsbeispiel ist in (Schmiedel, 2018) dargestellt. Hier wird geringe Nässe im Radhaus, mittlere Nässe am Schweller und starke Nässe über den Unterboden detektiert und ausgegeben. Wie bei den optischen Sensoren ermöglichen akustische Sensoren lediglich eine Klassifizierung des vorliegenden Reibwerts.

### **2.5.6 Thermische Sensoren**

Mit thermischen Sensoren können stationäre Messungen von Oberflächentemperaturen der Fahrbahn durchgeführt werden. Beispiele hierfür sind Wetterstationen an Brücken. Diese erfassen und versenden unter anderem die Oberflächentemperatur der Fahrbahn. Im Verlauf

dieser Arbeit wird geprüft, ob es sinnvoll ist, diese Informationsquellen als externe Sensoren zur Quantifizierung der lokalen Fahrzeugdaten zu nutzen. Außerdem kann der fahrzeuginterne Temperatursensor verwendet werden, um einen analysierten Reibwert zu plausibilisieren.

Mit den vorgestellten Sensorkonzepten können einzelne Zustände aufgenommen und der Reibwert in Klassen unterteilt werden. Zur Steigerung der Güte ist es sinnvoll, die einzelnen Ergebnisse geeignet zu filtern und zu fusionieren. Wie dies im Einzelnen erfolgen kann, wird im weiteren Verlauf erarbeitet. Dabei wird zusätzlich eine neue Methode als Beitrag zur Reibwerterfassung entwickelt.

### **2.5.7 Weitere wissenschaftliche Ausarbeitungen zur Reibwertschätzung**

Die Erfassung und Bestimmung des aktuell vorliegenden Reibwertpotenzials wird bereits sehr lange erforscht. Ferner gab es europaweit große Projekte wie *Prometheus* und *FricTi@n* (Koskinen, et al., 2009), die dazu beigetragen haben, das Reibwertpotenzial detektieren zu können und damit die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Das Forschungsziel von *Prometheus* war das autonome Fahren zu ermöglichen. Die Erfassung des Straßenzustandes mittels Sensorik war dabei ein Teilprojekt, das in (Breuer, et al., 1994) beschrieben wird.

In (Lex, et al., 2016) wird der verfügbare Reibwert als Grundvoraussetzung für automatisierte Fahrfunktionen beschrieben. Der Ansatz der Erfassung des Reibwertes basiert auf vorhandener Fahrzeugsensorik. Hierzu wird für längsdynamische Vorgänge mit einem rekursiven Bayes'schen Zustandsschätzer und quer zum Fahrzeug mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate ein Fahrbahnreibwert geschätzt.

In (Singh, et al., 2012) wird ein intelligenter Reifensensor verwendet, der anhand der Vibrationen der Lauffläche den derzeitigen Schlupf erkennt. Mit dieser Information könnte die Effizienz des ABS-Reglers gesteigert werden.

(Li, et al., 2014) bestimmen den verfügbaren Reibwert in einem Fusionsmodell, das auf Werten der Fahrdynamikregelung und weiteren Fahrzeugsensoren basiert. Die Gewichtung der Eingangsgrößen und der Fusion wird hierbei durch eine Fuzzy-Logik umgesetzt.

In (Gustafsson, 1997) wird der Ansatz verfolgt, mit Hilfe eines Kalman-Filters die Parameter der Schlupfkurve abzuschätzen und somit auf einen verfügbaren Reibwert rückzuschließen. Dieser Ansatz wurde in (Müller, et al., 2003) aufgegriffen und mit Fahrbahninformationen aus ABS-geregelten Bremsvorgängen und dem Kamm'schen Kreis robuster gestaltet.

Ein Verfahren, das mit Hilfe neuronaler Netze den linearen Bereich der Schlupfkurve schätzt, wird in (Matusko, et al., 2007) vorgestellt. Zusätzlich wird ein Zustandsbeobachter eingebracht, der die Ergebnisse plausibilisiert.

(Halgamuge, et al., 1993) kombinieren viele der vorgestellten Methoden miteinander und ergänzen sie um einen Sensor, der die Reifenverformungen aufnimmt und mit Hilfe einer Fuzzy-Logik den Fahrbahnzustand schätzt. Zusätzlich wird für die Erstellung der Regelbasis ein neuronales Netz genutzt.

In (Raste, et al., 2019) wird schließlich eine Methodik beschrieben, welche die im Fahrzeug verbaute Sensorik verwendet, um den Reibwert in die vier Klassen trocken, nass, verschneit und vereist einzuteilen. Dabei wird der lokale Reibwert über die Schlupf-Erfassung bei Bremsungen, Traktionsregelung und Querstabilisierung geschätzt. Als weiterer Sensor wird die Kamera verwendet; dazu wird ein Algorithmus genutzt, der mittels Mustererkennung Kontrastunterschiede so auflöst, dass Nässe, Schnee oder Gischt erkannt werden kann. Damit auch Aquaplaning detektiert werden kann, wird ein Beschleunigungssensor verwendet, der im Reifen verbaut ist. Als externe Quelle wird eine Cloud genutzt, die Informationen über die zu befahrende Strecke enthält. Diese Daten werden fusioniert und klassifiziert ausgegeben.

### 2.5.8 Fazit Stand der Technik

Zusammengefasst wird deutlich, dass bereits verschiedene Methoden erarbeitet wurden, um einen lokalen Reibwert zu bestimmen. Dabei wird in fast allen Arbeiten auf bestehende Sensorik und Algorithmen zurückgegriffen. Eine Steigerung der Signalverfügbarkeit und Güte ist durch die Fusion von mehreren Sensoren und Methoden möglich, was auch zuletzt in den Arbeiten von (Raste, et al., 2019), (Schmiedel, 2018), (Lex, 2015), (Hartmann, et al., 2017) und (Jung, et al., 2018) nachgewiesen wurde. Außerdem wurde deutlich, dass der lokale Fahrbahnreibwert bei gewöhnlicher dynamischer Fahrt auf öffentlichen Straßen gut bestimmt werden kann, während die Reibwertschätzung unmittelbar vor dem Fahrzeug Verbesserungspotenzial aufweist. Einen guten Überblick über die bestehenden Methoden und deren Ergebnisse liefert (Acosta, et al., 2017) oder auch (Haudum, et al., 2018). Des Weiteren konnten die Entwicklungen der Firma Continental AG positive Versuchsergebnisse in (Raste, et al., 2019) ausweisen. Bei diesem Ansatz wurde unter anderem die Fahrbahnkamera genutzt, um den Reibwert vor dem Fahrzeug zu klassifizieren. Diese Methode ist in Bezug auf die Prädiktion von Reibwerten ein guter Ansatzpunkt für weitere Forschungsarbeiten.

Die Erkenntnisse, die aus diesem Kapitel abgeleitet werden können, werden genutzt, um den Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit weiter zu schärfen. Viele Arbeiten zeigten, dass sich eine Fusion von mehreren Eingangsgrößen für die Steigerung der Güte und Schätzung anbietet. Außerdem wird deutlich, dass neuronale Ansätze gute Ergebnisse liefern, sofern eine bestimmte und ausreichende Datenbasis vorhanden ist.

Basierend auf den Erkenntnissen dieses Kapitels wird, für die vorliegende Arbeit alternativ eine Fuzzy-Logik für die Fusion der Eingangsparameter verwendet. Des Weiteren werden bei der Auswahl der Eingangsparameter nur Signale verwendet, die bereits in einem serienmäßigen Porsche 911 Carrera (Typ 991) zur Verfügung stehen. Unter Anwendung der Fuzzy-Logik können diese Eingangsparameter fusioniert und iterativ im Fahrzeug ausgegeben und optimiert werden. Aufgrund dieser Möglichkeit ist eine gewisse Prädiktion des Reibwerts darstellbar. Damit die Schätzung und Ausgabe validiert werden kann, wird als weitere Abgrenzung zu den bestehenden Arbeiten eine Methode zur Verifikation und Validierung entworfen. Abschließend werden die Reibwertschätzung und die Validierungsmethode auf der Basis von Versuchsfahrten bewertet und kritisch betrachtet.

Für das allgemeine Verständnis und den Verlauf der vorliegenden Arbeit ist es notwendig, einige Grundlagen im Bereich von mechatronischen Systemen und der Signalverarbeitung zu haben. Diese werden im folgendem Kapitel erläutert.

### 3 Grundlagen mechatronischer Systeme

Neue Fahrzeugfunktionen werden heutzutage auf der Basis von mechatronischen Systemen entwickelt. Ein Beispiel hierfür sind Funktionen für das assistierte Fahren. Bei diesen Funktionen spricht man meist von vernetzten mechatronischen Systemen. Die für das Verständnis notwendigen theoretischen Grundlagen werden in diesem Abschnitt erklärt. Da die Entwicklung von zukünftigen, neuen Funktionen stark auf den Kunden-Use-Case zugeschnitten wird, muss auch der Produktentstehungsprozess angepasst werden. Daher wird zunächst erläutert, wie ein Fahrzeugprojekt und dessen Funktionalitäten entwickelt und freigegeben werden. Im Anschluss daran wird gezeigt, wie zukünftige Funktionen und Eigenschaften mit dem Fokus auf dem Kundennutzen in den Produktentstehungsprozess integriert und entwickelt werden können.

Da für die vorliegende Arbeit die Signalverarbeitung und -güte eine wichtige Rolle einnehmen, wird darauf nochmals explizit eingegangen. Zum einen werden die Grundlagen dazu dargelegt und zum anderen diese anhand von vorliegenden Messdaten aus einer Erprobung in Schweden angewandt. Durch die Anwendung können verschiedene Filtermethoden identifiziert werden, die sich für die weitere Verwendung eignen.

### 3.1 Methodische Entwicklung mechatronischer Systeme

In der Vergangenheit wurden bei der Entwicklung von Fahrzeugen die Anforderungen von einem Gesamtsystem auf die einzelnen Hardwarekomponenten heruntergebrochen. Dieser Ansatz wurde überarbeitet. Heute wird der Fokus auf die Entwicklung von Kundenfunktionen gelegt. Dabei wird von einem Funktionsverantwortlichen die Funktion von der Entstehung bis zum Kundenerlebnis verantwortet. Die Umsetzung der Funktionen basiert auf mechatronischen Systemen. Ein mechatronisches System beruht auf der Interaktion einzelner Disziplinen, der Mechanik, Elektronik und Signalverarbeitung. In der vorliegenden Arbeit wird die Definition nach dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) verwendet:

*„Mechatronik bezeichnet das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie bei der Prozessgestaltung“ (VDI 2206, 204).*

Mittlerweile sind mechatronische Systeme im Fahrzeugbau weit verbreitet. So kam zum Beispiel 1989 das Antiblockiersystem (ABS) als eines der ersten mechatronischen Systeme zum Einsatz. Heute werden allein im Fahrwerk komplexe mechatronische Systeme wie z. B. die gelenkte Hinterachse (HAL), elektromechanische Servolenkung (EPS) oder elektromechanische Parkbremse (EPB) verbaut. Zukünftige, neue mechatronische Systeme werden vor allem beim assistierten Fahren eingesetzt werden. Hierbei ist die Wechselwirkung der einzelnen Komponenten wie Aktorik, Sensorik, Prozessrechen-technik von zentraler Bedeutung. Diese Komplexität lässt sich mit der Hilfe von geeigneten Modellierungssystemen darstellen und vorab testen (Heimann, et al., 2016). Abbildung 3.1 verdeutlicht das Zusammenspiel der einzelnen Disziplinen.

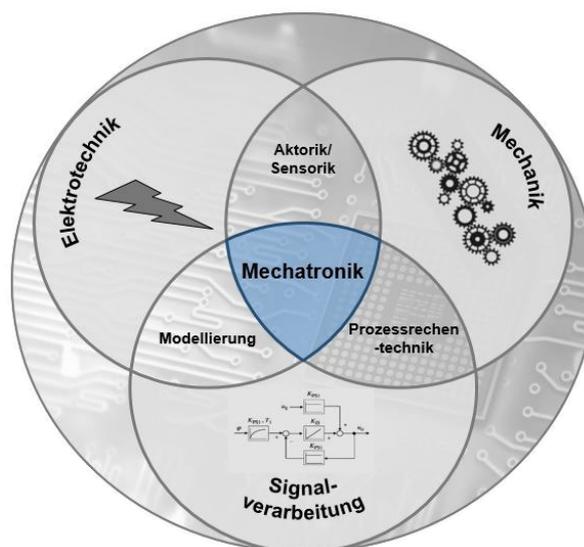


Abbildung 3.1: Bestandteile der Mechatronik nach (Heimann, et al., 2016)

Betrachtet man ein Längsregelsystem wie das ACC<sup>8</sup>, so ist die Umsetzung der Systemanforderung „Bremseingriff“ eine Regelaufgabe aus zwei verschiedenen Flussgrößen. Diese beiden Flussgrößen, welche in der Regel elektrische Ströme sind, teilen sich auf in einen mechanischen und einen elektrischen Fluss. Diese Wirkrichtungen und Komponenten werden zum besseren Verständnis in Abbildung 3.2 als Regelkreis dargestellt. Entlang der Wirklinien werden die Interaktion der einzelnen Disziplinen und der Regeleingriff veranschaulicht (Isermann, 2006).

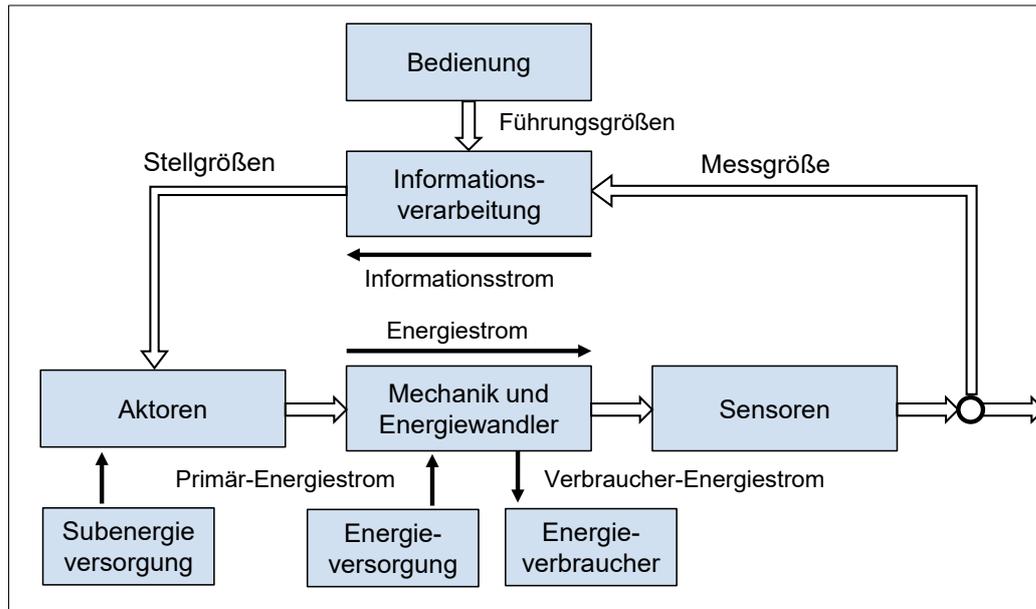


Abbildung 3.2: Mechatronisches System als Regelstrecke (Isermann, 2006)

Diese Art der Modellierung ermöglicht es, komplexe Funktionen und deren Zusammenhänge zu beschreiben. Anhand dieser Beschreibung können im Anschluss mögliche Problemstellen identifiziert und optimiert werden. Gerade für zukünftige mechatronische Systeme, die für das automatisierte Fahren notwendig sind, werden die Modellierung und Überprüfung auf der Softwareebene essenziell sein, um spätere Fehlfunktionen vermeiden zu können. Je mehr der Fahrer von seiner Fahraufgabe entbunden wird, desto wichtiger sind die Verfügbarkeit und Verlässlichkeit eines mechatronischen Systems (Robert Bosch GmbH, 2007). Damit diese Anforderungen erfüllt werden können, werden in der Praxis verschiedene Methoden zur Entwicklung von mechatronischen Systemen angewandt.

Eine der bekanntesten Methoden ist die eingangs erwähnte Entwicklungsmethode nach (VDI 2206, 204), die aus der Softwareentwicklung abgeleitet ist. Zur Entwicklung eines mechatronischen Systems wird die Gesamtanforderung in einzelne Teile zerlegt und in Form eines „V“ dargestellt. Hieraus stammt auch der Begriff „V-Modell“. Dieses Modell ist mit Abbildung 3.3 dargestellt und teilt sich in zwei grundlegende Pfade auf, zum einen den Systementwurf und

<sup>8</sup> ACC steht für Adaptive Cruise Control: Passt die Geschwindigkeit an Vorfahrende an

zum anderen die Systemintegration. Zu Beginn des Systementwurfs steht die Kundenanforderung. Diese wird technisch beschrieben und bis hin zu einem Labormuster ausgearbeitet. Die Systemintegration startet mit den Komponententests und endet mit der Vorserienproduktion. Durch dieses Vorgehen in einzelnen Teilschritten und Iterationsschleifen nimmt die Reife des Gesamtproduktes stufenweise zu. In der vorliegenden Arbeit wird dieses Vorgehen genutzt, um die Gesamtfunktion „Reibwertgestützte Fahrfunktion“ zu gliedern. Dies hat den Vorteil, dass jede dazugehörige Einzelkomponente und deren Signalfluss in Einzelprüfgruppen zerlegt und fokussiert bearbeitet werden können. Diese Einzelkomponenten werden sukzessive zu einem Gesamtsystem vereint und auf der Gesamtfahrzeugebene mit definierten Feldversuchen validiert. Der Reifegrad wird in iterativen Schritten und mit geeigneten Maßnahmen so lange erhöht, bis die geforderte Verlässlichkeit gegeben ist (Bosch, 2015) (Bertsche, et al., 2009) (Heimann, et al., 2016).

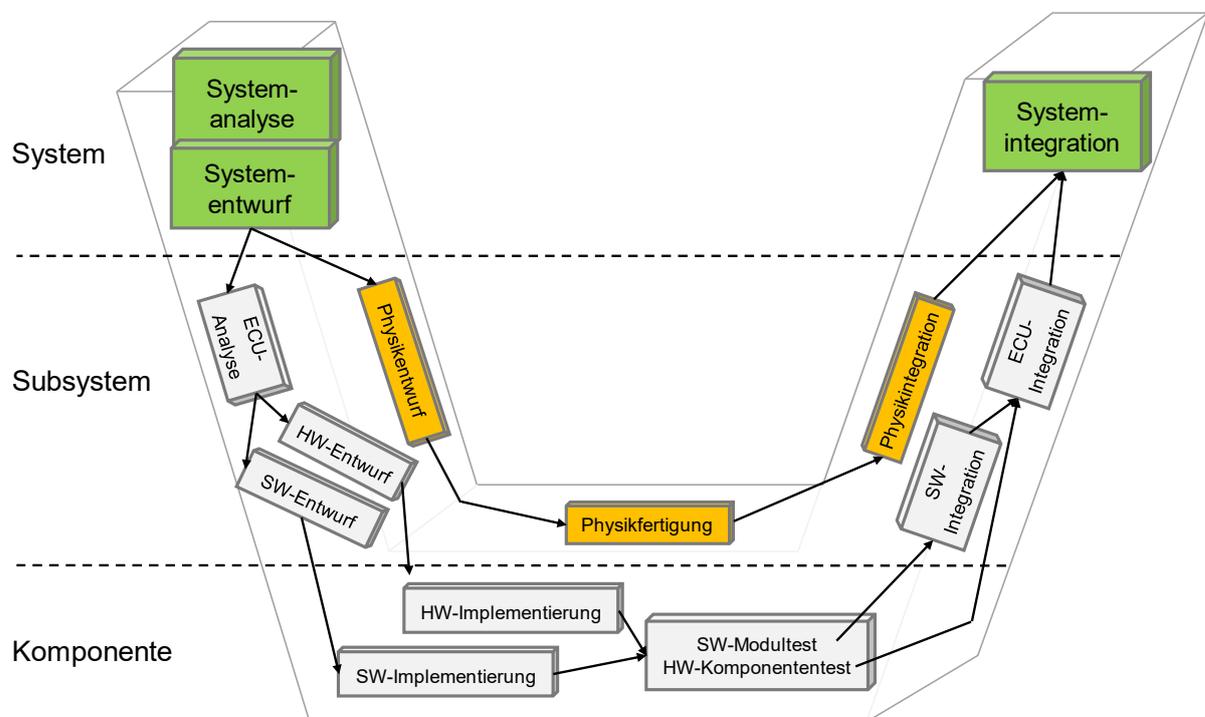


Abbildung 3.3: V-Modell der Produktentstehung (Filler, 2019)

Des Weiteren werden rechnergestützte Methoden aus verschiedenen Bereichen und in entsprechenden Entwicklungssystemen genutzt. Eines der bekanntesten Systeme, das auch in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung kommt, ist MATLAB/Simulink. Mit Hilfe des Systems werden die einzelnen Teilschritte nach wissenschaftlichen Grundlagen modelliert und nicht-kausal zueinander beschrieben. Anschließend können die einzelnen Schritte simuliert und optimiert werden, bevor kostspielige Hardware aufgebaut wird oder sogar Versuche gefahren werden. Die integrative und simulative Entwicklung der Software wird auch als Software-in-

the-Loop (SiL) bezeichnet. Ist das elektronische Modul (ECU) <sup>9</sup> in Form von der Zielhardware vorhanden und die Softwareentwicklung fortgeschritten, kann auf leistungsstarken Rechnern der Verbund in Echtzeit simuliert werden. Bei diesem Vorgehen können extreme Betriebs- und Umfeldsituationen wie z. B. mögliche Fehlfunktionen, die im realen Umfeld zu gefährlichen Situationen führen können, aufgeschaltet und untersucht werden. Dieses Vorgehen ist auch bekannt als Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulation. Bei der Durchführung kann zur Erhöhung der Simulationsgüte die Zielhardware (Sensoren und Aktoren) verwendet werden. Ein großer Vorteil dieses Vorgehens sind die synchrone Entwicklung der einzelnen Teilkomponenten und deren kostengünstige Absicherung.

### 3.2 Produktentstehungsprozess mechatronischer Fahrwerkssysteme

Nachfolgend werden die grundlegenden Entwicklungsprozesse eines OEM bei der Entwicklung mechatronischer Grundlagen vermittelt. Dazu wird die Entwicklung der mechatronischen Systeme im Kontext des Produktentstehungsprozesses (PEP) und der Fahrzeugentwicklung erläutert. Die grundlegenden Phasen und Inhalte des PEP zeigt Abbildung 3.4. Des Weiteren werden in 4.5 die Funktionssicherheit, in Abschnitt 3.2.1 die Integration der Steuergeräte und die Hardwarephasen sowie die Fahrzeugphasen beschrieben. In Abschnitt 3.2.2 wird die Freigabe des Gesamtsystems erläutert.

Der übergreifende PEP, der in unterschiedlichen Ausprägungen in der Automobilindustrie zum Einsatz kommt, ist ein Projektterminplan, der das gesamte Fahrzeugprojekt beschreibt. Dementsprechend sind innerhalb dieses Planes verschiedene Zusammenhänge definiert. Ein Zusammenhang ist die Entwicklung eines mechatronischen Systems mit den drei Phasen der Gesamtfahrzeugentwicklung.

Der erste Teil ist die *Konzeptphase*, in der das Gesamtfahrzeugkonzept mit Hilfe eines Steckbriefes erarbeitet, ausgearbeitet, definiert und bestätigt wird. In einem Projektsteckbrief werden unter anderem in Abhängigkeit des jeweiligen Wettbewerbsumfeldes die strategische Produktausprägung für jedes Entwicklungsressort <sup>10</sup> und deren Plattform definiert. Je nach Umfang des Konzeptes erstreckt sich diese Phase über eine Dauer von bis zu 24 Monaten.

Ist diese Phase erfolgreich abgeschlossen und bestätigt, wird die weitere Entwicklung an die *Serienentwicklung* übergeben. In der Zeit von bis zu 30 Monaten wird das Konzept zur Serien-

---

<sup>9</sup> Electronic Control Unit

<sup>10</sup> Ressort: Karosserie, Elektrik, Fahrwerk, Antrieb und Gesamtfahrzeug

reife und Funktionsfähigkeit entwickelt. Abgeschlossen wird die Entwicklung mit der *Produktionsanlaufphase*, die innerhalb von sechs Monaten die Serienherstellung der Fahrzeuge absichert.

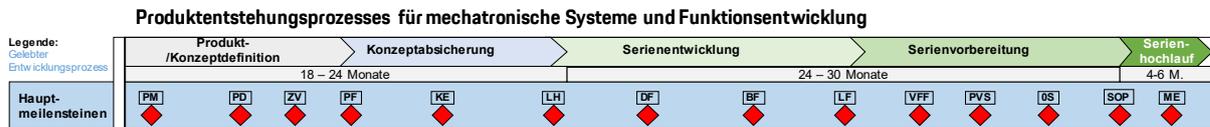


Abbildung 3.4: Produktentstehungsprozess mechatronische Systeme (Porsche, 2017)

Das Abschließen einer Phase wird mit dem Durchschreiten eines Meilensteins (MS) beschrieben. Diese Bestätigung kann nur erteilt werden, wenn die notwendigen und definierten Meilensteininhalte erfolgreich erbracht wurden. Der erste Meilenstein *Projektsteckbrief* wurde bereits erläutert. Der nächste ist die *Produktdefinition*. Hierfür wird ein Lastenheft mit den Inhalten der Zieleigenschaften, Finanzziele, Vertriebswege und der technischen Produktbeschreibung (TPB) erstellt und innerhalb der Organisation als bindendes Dokument verteilt. Der Meilenstein *Projektmachbarkeit* bestätigt die technische und finanzielle Zielfähigkeit des Projektes. Des Weiteren wird der Produktionsstandort definiert und die ersten Frontloading-Umfänge<sup>11</sup> werden vergeben. Die Frontloading-Umfänge sind aufgrund ihrer Komplexität und Dauer der Entwicklung vor der eigentlichen Lieferantenvergabe zu vergeben. Die Konzeptphase schließt mit dem Meilenstein *Konzeptdefinition* ab. Zu diesem Abschluss muss z. B. das Maßkonzept für das Interieur und Exterieur definiert sein, die Ziele für Fahrleistungen, Verbräuche und Gewicht müssen bestätigt werden und die Herstellbarkeit in der Produktion muss abgesichert sein.

Die Phase der Serienentwicklung beginnt mit dem Meilenstein *Designfestlegung*. Hauptinhalte dieses Meilensteins sind: Definition des Stylings für Exterieur und Interieur, Platzierung der einzelnen Komponenten im Fahrzeug, Erstellung und Bestätigung des Lastenhefts. Anschließend wird die *Teileverfügbarkeit für die Produktion* durch einen weiteren Meilenstein abgefragt und abgesichert. Bei der Abfrage werden die erforderliche Menge und Qualität der Bauteile ermittelt, die zur Herstellung der Fahrzeuge benötigt werden. Zum Ende der Serienentwicklung stehen zwei weitere Meilensteine an. Erstens ist dies die *Vorserie* (VS), die das erste Fahrzeug zeitlich und qualitativ beschreibt. Außerdem wird mit der Vorserie die Lieferantenprozesskette abgesichert und das produzierende Werk auf den Anlauf vorbereitet. Abschließend kommt die *Produktionsvorserie* (PVS), die weiterhin die Produktion auf die Serienproduktion vorbereitet. Die Produktion fertigt ab diesem Meilenstein mit seriennahen Bauteilen und freigegebenen Betriebsmitteln. Abweichungen vom Zielstand werden nur in einzelnen Fällen und mit einer Dokumentation der Abweichung genehmigt.

<sup>11</sup> Englisch: Vorverteilungs-Umfänge/ Langläufer-Umfänge

Die Produktionsanlaufphase beginnt mit dem Start of Production (SOP). In den drei Monaten der Hochlaufzeit werden Fahrzeuge für Händlerveranstaltungen, Einführungsfahrzeuge, Breitenabsicherung und Messen produziert. Erfolgt der Marktstart, werden Fahrzeuge nach erfolgreicher Homologation für die jeweiligen Märkte produziert, an den Handel gegeben und den Kunden ausgeliefert (Duesterloh, 2018) (Braess, et al., 2013) (Heißing, et al., 2013) (Porsche-AG, 2019).

Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der mechatronischen Systeme, deren Vernetzung und Komplexität wurde auch der Produktentwicklungsprozess angepasst. Bei der Anpassung hat man darauf geachtet, dass die in Abschnitt 4.1 beschriebene Use-Case-Methode und damit die Berücksichtigung des Kundenwunsches im Vordergrund steht. Außerdem sind die Anforderungen an künftige Systeme in Bezug auf die Nachverfolgbarkeit, Sicherheit, Homologation und Integration deutlich gestiegen und mussten in den Produktentstehungsprozess integriert werden. Das zuvor beschriebene V-Modell und der Produktentwicklungsprozess sind nach dem Anforderungs-, Realisierungs- und Integrationsmanagement so aufgesetzt, dass es möglich ist, von der Kundenidee bis hin zum Kundenerlebnis einen schlüssigen Prozess entstehen zu lassen. Dazu kann im ersten Schritt das V-Modell in Anlehnung an die Use-Case-Methode überarbeitet werden. Zum besseren Verständnis ist dies in Abbildung 3.5 dargestellt.

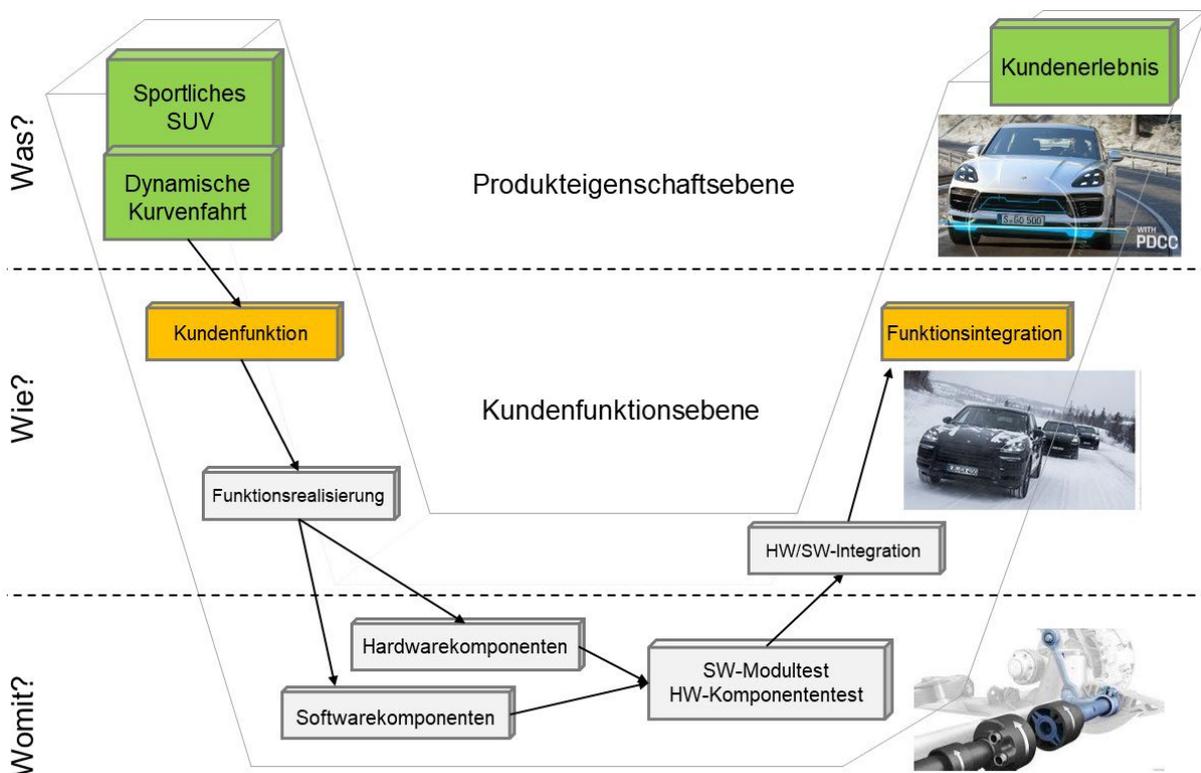


Abbildung 3.5: Use-Case-orientiertes V-Modell (Porsche-AG, 2019)

Das dargestellte V-Modell zeigt, dass die zukünftige Entwicklung stark auf der funktionalen Ebene basiert. Dementsprechend benötigt man zu Beginn eines Fahrzeugprojekts einen funktionalen Gesamtfahrzeugsteckbrief, der das Fahrzeug auf der Ebene der Produkteigenschaften beschreibt. Abgeleitet davon müssen die einzelnen Funktionen spezifiziert werden. Dies kann analog zu den heutigen Lastenheften auf funktionaler Ebene erfolgen. Dabei ist darauf zu achten, dass messbare Produktziele auf der Eigenschaftsebene beschrieben werden. Des Weiteren sind Kundenfunktionen häufig mit anderen Funktionen vernetzt. Diese Schnittstellen müssen explizit und priorisiert beschrieben sein, damit das Kundenerlebnis in jeder Situation erfolgen kann. Schlussendlich ist es zur Umsetzung jeder Funktion nötig, die einzelnen Hardware- und Softwarekomponenten zu beschreiben. Vereint man dies zu einem funktionalen Produktentstehungsprozess, so folgt ein funktionaler Produktentwicklungsprozess wie in Abbildung 3.6 dargestellt.



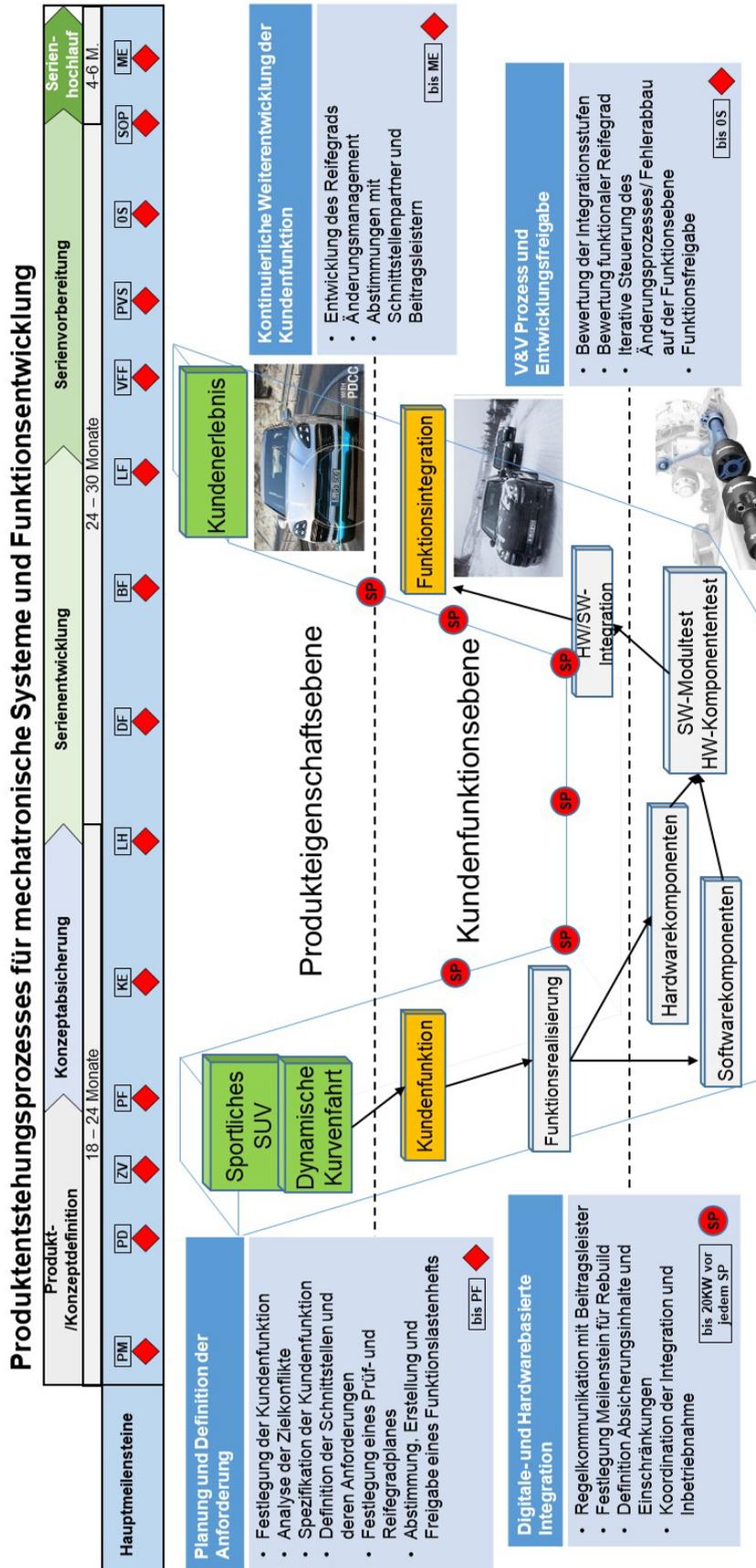


Abbildung 3.6: Funktionaler Produktentwicklungsprozess (Porsche-AG, 2019)

### 3.2.1 Integration Steuergeräte, Hardware-Musterstände und Fahrzeugphasen

Eingangs wurde beschrieben, dass die Anzahl und die auszuführenden Funktionen sowie die domänenübergreifende Charakteristik von mechatronischen Systemen stark zunehmen. Aus diesem Grund wurde eine Systematik für die übergreifende Integration der Anforderungen an Karosserie, Elektrik/Elektronik, Fahrwerk, Antrieb und Gesamtfahrzeugfunktionen etabliert. In Abbildung 3.6 werden diese Punkte als Verbundrelease (VR) dargestellt. Die VR-Planung wird zu jedem Projektbeginn fachbereichsübergreifend abgestimmt und zeitlich eingeplant. Ziel dieser Planung ist es, zu jedem Verbund die inhaltliche Entwicklung des einzelnen Steuergerätes sowie dessen Kommunikation im Verbund sicherzustellen. Dazwischen plant jeder einzelne Fachbereich seine individuelle Steuergeräte-Integration (SI). Inhaltlich sind das die Planung des Entwicklungsfortschrittes und die Prüfung der Kommunikation mit anderen Steuergeräten im Verbund. Des Weiteren werden zu jedem neuen VR signifikante Software- und Hardwarehäbe erwartet. So startet der VR 1.0 mit klassischen Grundfunktionalitäten und einem geringen Reifegrad. Die Inhalte werden bis zur Produktionsvorserie weiterentwickelt, zum Beispiel über ein Rebuild, in dem partiell Software und Hardware erneuert werden, abgesichert und zum Start der dann anstehenden Homologation mit einer Verbundrelease-Klausur und einem Gesamtverbundsigel beendet. In der Vergangenheit wurden anstatt Rebuilds neue Hardwarestufen im Sinne von neuen Prototypen (PT) aufgebaut. Diese sind im Vergleich zu einem Rebuild sehr teuer und stehen oft zu spät zur Verfügung. Die Vorserien (VS) sind die ersten Fahrzeuge in der breiten Masse, die Hardwarebauteile aus einem Serienwerkzeug und kundennahe Softwarestände bekommen. Die anschließende PVS bildet qualitative und eigenschaftsbasierte Kundenfunktionen ab und wird zur Homologation verwendet. Abschließend wird die 0-Serie zur Freigabe des Start of Production (SoP) genutzt (Porsche-AG, 2019).

### 3.2.2 Freigaben

Damit der beschriebene Ablauf funktionieren kann, werden im Laufe der Entwicklung verschiedene Freigaben erteilt. So werden zu jedem Software-, Verbundrelease- oder Hardware- Integrationsstand die neuen spezifischen Umfänge freigegeben. Diese Freigaben werden generell unterschieden in „K“ für Kundenfreigabe und „E“ für Entwicklungsfreigabe. Die erste große Freigabe auf Gesamtfahrzeugebene ist die Baustufen-Freigabe. Mit ihrem Vorliegen wird bestätigt, dass das grundlegende Konzept so weit entwickelt ist, dass die Beschaffungsfreigabe erteilt und somit die Entwicklung der Serienwerkzeuge beauftragt werden kann. Darüber hinaus gibt es Bauteile, die aufgrund ihrer Komplexität und ihres technologischen Anspruchs als „Langläufer-Bauteile“ eingruppiert sind. Diese müssen separat und vor der eigentlichen Beschaffungsfreigabe beauftragt werden. Auch der PEP wurde im Laufe der Zeit optimiert. Daher

bleibt für die Entwicklung mit Hardwareständen nur begrenzt Zeit. Diese Entwicklung macht deutlich, dass auch der Einsatz von virtuellen Entwicklungsmethoden und Prüfständen notwendig ist, um die geforderte Produktreife trotz steigender Komplexität sicherzustellen. Mit der Konstruktionsfreigabe wird der Abschluss der Bauteilentwicklung bestätigt. Der anschließende Teil des PEPs befasst sich mit dem Produktionshochlauf des Fahrzeugprojektes. Die folgende SOP-Freigabe muss von den Fachbereichen Entwicklung, Produktion, Qualität, Vertrieb und Beschaffung erteilt werden, bevor die Markteinführung erfolgen kann. Weiterführende Literatur zum Thema Freigabe- und Dokumentationsprozess kann in (Duesterloh, 2018) nachgeschlagen werden.

### 3.3 Grundlagen der Signalverarbeitung

In der Mechatronik nimmt die Signalverarbeitung eine zentrale Rolle ein. Daher werden im Abschnitt 3.3.1 die Aufgabe und Einteilung in Signalklassen sowie Aufbereitung der Signale grundlegend beschrieben. Im Anschluss wird die Anwendung im Fahrzeug erläutert. Im weiteren Verlauf der Arbeit sind diese Grundlagen der Ausgangspunkt für die Bewertung eines funktionsierten Signals.

#### 3.3.1 Signalerfassung und Verarbeitung

Nach (Hering, et al., 2018) ist ein Signal eine physikalische Größe, wie zum Beispiel die elektrische Spannung oder die Motordrehzahl eines Antriebes. Signale werden als Informations- und Energieträger genutzt. Aufgenommen, verarbeitet, verstärkt und weitergegeben werden diese Informationen durch Sensoren. Der prinzipielle Aufbau und Ablauf der Informationsverarbeitung eines Sensors sind in Abbildung 3.7 zu sehen.

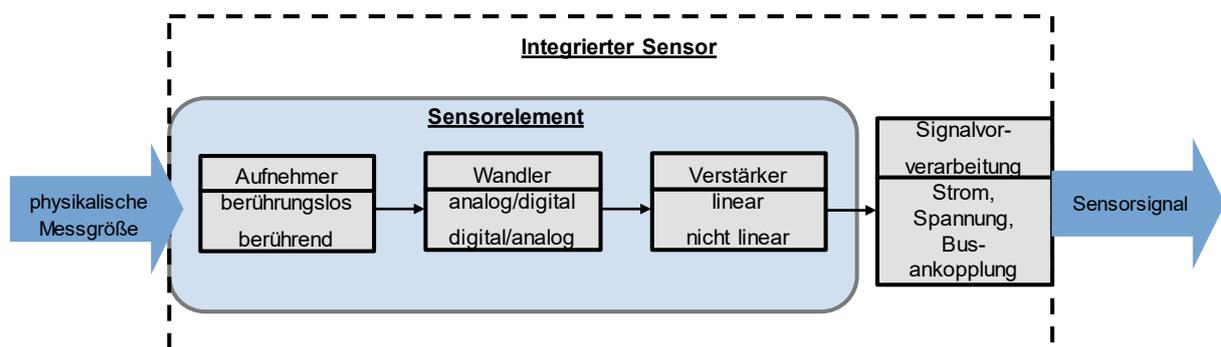


Abbildung 3.7: Aufbau Sensorelement (Hering, et al., 2018)

Grenzt man einen Sensor mit den zugehörigen In- und Output-Größen definiert ab, kann man bei der Verarbeitung der jeweiligen Größen von einem System sprechen. Typisch werden solche Systeme als „Black Box“-Systeme bezeichnet. Gegenüber der Umgebung zeigt jedes System gewisse Eigenschaften und Merkmale, die als Attribute bezeichnet werden. Ziel eines

Systems ist, den Funktionszusammenhang zwischen Attributen und Systemansatz zu identifizieren und mit Hilfe von mathematischen Gleichungen zu beschreiben. Dieses Vorgehen wird auch Modellierung genannt (Roddeck, 2014). In der kommenden Abbildung 3.8 wird das Attribut zeitabhängiges Eingangssignal als  $x(t)$  in das zeitabhängige Attribut Ausgangssignal  $y(t)$  gewandelt (Meyer, 2017).

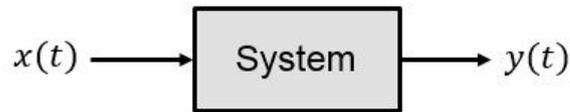
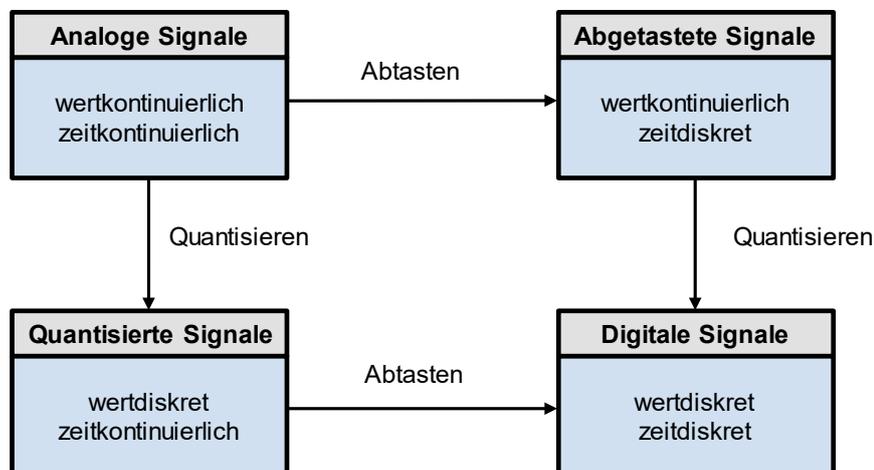


Abbildung 3.8: Systemgedanke „Black Box“ Eingangs- zu Ausgangssignal (Meyer, 2017)

Mit Hilfe der Signalverarbeitung werden Informationen aus Messgrößen gefiltert. Dabei werden die vom Sensor kommenden Signale um ihren Störanteil bereinigt. Des Weiteren soll die Messgröße auf Plausibilität geprüft werden. Als plausibel kann ein Signal erachtet werden, wenn es zum Beispiel innerhalb eines gewissen Bereichs liegt. Im vorliegenden Fall sind mehrere Einzelsysteme vorhanden, die verschiedene Varianten von Eingangssignalen  $x(t)$  abbilden. Prinzipiell werden Signale nach (Meyer, 2017) in analoge und digitale Signale unterschieden. Ein analoges Signal, wie das Ausgabesignal eines Sensors, weist einen zeitkontinuierlichen Verlauf auf, der einen beliebigen Wert annehmen kann. Zur weiteren Verarbeitung, wie z. B. in einem Fahrzeugsteuergerät, müssen die analogen Signale abgetastet und in digitale Signale überführt werden. Je nach Anwendungsfall und zur Reduzierung des Quantisierungsfehlers wird die Anzahl der Abtastwerte nach dem Abtasttheorem von Nyquist-Shannon ausgelegt. Dieses besagt, dass die maximal vorkommende Frequenz  $f_{max}$  mit einer Abtastrate  $f_{abgetastet}$  wird, sodass  $f_{abgetastet} > 2 * f_{max}$  ist. So wird die Umwandlung von analog auf digital (A/D) eindeutig abgebildet. Durch die definierte Abtastrate und Quantisierung in Digitalwerte ergeben sich wert- und zeitdiskrete Signale. Dieses Vorgehen wird in Abbildung 3.9 verdeutlicht (Meyer, 2017).



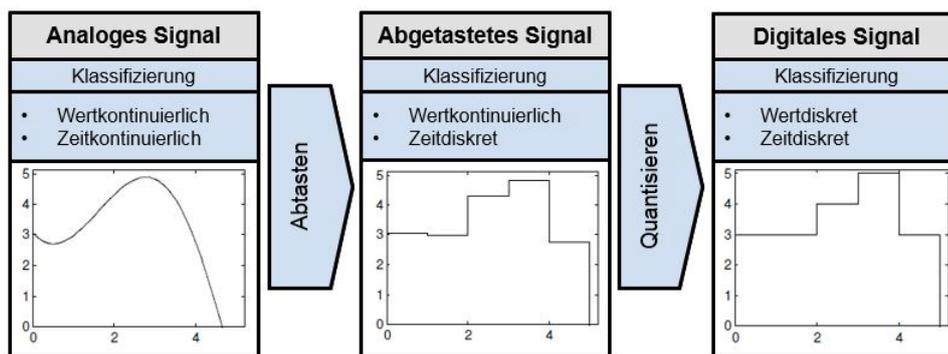


Abbildung 3.9: A/D-Wandlung eines Signals mit Klassifizierung (Meyer, 2017)

Außerdem kann die Form der Signale in deterministisch und stochastisch unterschieden werden. Die deterministischen Signale sind eindeutig über einen Funktionswert  $x(t)$ , eine mathematische Gleichung und prädiktives Verhalten beschrieben. Stochastische Signale definieren sich über einen nicht vorhersehbaren Verlauf. Bei der Beschreibung verwendet man statistische Kenngrößen wie z. B. den Effektivwert, Mittelwert oder die Amplitudenverteilung. In der vorliegenden Problemstellung sind die Einflussparameter wie das Wetter, die Nässe auf der Fahrbahn oder auch die Temperatur stochastische Signale (Böhme, 1998). Aufgrund der hohen Dynamik dieser Signale sind sie häufig verrauscht oder mit Störsignalen überlagert. Aus den verschiedenen Signalen resultiert das sogenannte Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Dieses beschreibt die Verteilung von Nutzsignalen zu verrauschten Signalen. Mit Hilfe von diesem Verhältnis werden die Vorverarbeitung und die notwendigen Verarbeitungsglieder definiert. Hierbei werden bei der Aufbereitung eines Signals verschiedene Filterverfahren herangezogen. Die für die vorliegende Arbeit angewandten Filter werden im kommenden Abschnitt näher erläutert. Weitere Grundlagen der Signalverarbeitung können unter anderem in (Heimann, et al., 2016), (Stotz, 2019) und (Möder, 2018) nachgeschlagen werden.

### 3.3.2 Filterverfahren

In der modernen Fahrzeugtechnik kommt hauptsächlich die digitale Signalverarbeitung zum Einsatz. Da, wie zuvor beschrieben, die meisten der vorliegenden Signale von analog auf digital gewandelt werden müssen, empfiehlt es sich trotzdem, die analogen Filter zu betrachten. Am häufigsten werden noch analoge Tiefpassfilter eingesetzt, um eine bessere Grundlage für die digitale Filterung zu bekommen. Die analogen Filter lassen sich mathematisch mit der Induktivität und mit Kondensatoren beschreiben (Heimann, et al., 2016) (Karrenberg, 2017).

Zur vollständigen Darstellung wird das zuvor beschriebene „Black Box“-System mit dem Eingangssignal  $x_1(t)$  um den realen Störanteil  $x_2(t)$  und das Ausgangssignal  $y(t)$  bzw. das Nutzsinal  $y_1(t)$  um  $y_2(t)$  vervollständigt. Um ein nutzbares Signal zu bekommen, wird nun das

System mit einem Sperr- und Durchlassbereich versehen. In Abbildung 3.10 ist das Beschriebene veranschaulicht. Als Ergebnis liegt ein Nutzsignal vor, das weiter verwendet werden kann (Meyer, 2017).

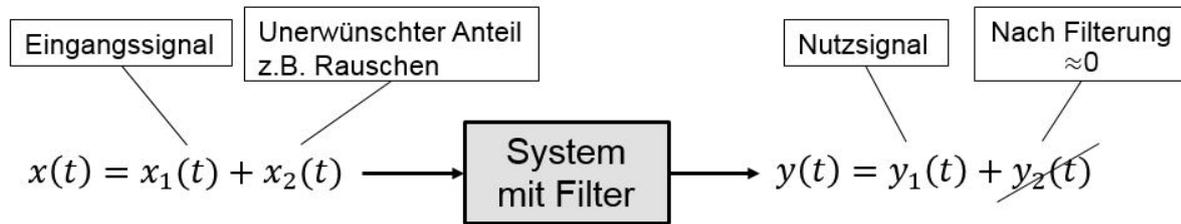


Abbildung 3.10: System mit Filter (Meyer, 2017)

Da die Anforderungen an ein Signal unterschiedlich sein können, werden auch verschiedene Filter benötigt. In (Kuttner, 2015) werden die gängigsten und die für diese Arbeit relevanten erläutert:

- Tiefpass: Tiefe Frequenzen passieren, Sperrung hoher Frequenzen
- Hochpass: Hohe Frequenzen passieren, Sperrung tiefer Frequenzen
- Bandpass: Passieren eines bestimmten Frequenzbands, Sperrung aller weiteren Frequenzen
- Bandsperre: Sperrung eines bestimmten Frequenzbands, Passieren aller weiteren Frequenzen

Nach (Meyer, 2017) wird bei der Filterung zwischen rekursiven und nichtrekursiven Filtern unterschieden. Klassisch beschreibt die Rekursion die Rückführung des Ausgangs- zum Eingangssignal. Diese Rückführung hat eine dementsprechende Auswirkung auf die Impulsantwort, die bei solchen Systemen unendlich lang ist. Diese Art ist in der Literatur auch bekannt als „*Infinite Impulse Response*“ (IIR)-Filter. Dieser Filter basiert auf einem analogen Filter. Mittels Transformationsmethoden werden die analogen Signale in digitale übertragen. Den Ausgang dazu bildet immer ein analoger Tiefpassfilter, der das Signal in einen der genannten Filter wandelt. Systeme ohne Rückführung haben eine endlich lange Impulsantwort und werden als „*Finite Impulse Response*“ (FIR)-Filter bezeichnet. Ohne Rückkopplung weicht die Synthese des Filters ab. Die Abweichung wird mit einer Approximation angenähert. Dabei kann ein stets konstantes Fehlverhalten eingestellt werden. Die FIR-Filter sind leistungsstärker, benötigen jedoch mehr Verarbeitungsleistung, Integrationsaufwand und sind aufwendiger im laufenden System zu ändern. In der vorliegenden Arbeit werden der gleitende Mittelwert, Maximalwertfilter und das Kalman-Filter zur Anwendung kommen.

### Gleitender Mittelwertfilter

Die ausgegebenen Sensorsignale, die während einer Fahrt erfasst werden, sind meist veräuscht und durch die Dynamik kommt es des Öfteren zu Ausreißern oder Ausschlägen, die nicht plausibel sind. Damit diese Störanteile in der weiteren Verarbeitung das Ergebnis nicht verfälschen, kann mit der Anwendung des Mittelwertfilters <sup>12</sup> das Nutzsignal optimiert werden. Bei der Umsetzung werden die Bereiche betrachtet, die in unmittelbarer Nähe des eigentlichen Wertes  $x_k$  liegen. Diese Werte werden als Nachbarschaftswerte bezeichnet und basieren auf dem vorhergegangenen Wert  $x_{k-1}$  und dem nachfolgenden Wert  $x_{k+1}$ . Daraus resultiert der Ausgabewert  $y_k$  (12). So ergibt sich nach (Runkler, 2015) und der Definition des Betrachtungsfelds für den Zahlenwert  $q \in \mathbb{N}^+$ :

$$y_k = \frac{1}{q} \sum_{i=k-\frac{q-1}{2}}^{k+\frac{q-1}{2}} x_i \quad (12)$$

### Maximalwertfilter

In Kapitel 4 wird die Ableitung des Reibwerts anhand des Kamm'schen Kreises beschrieben. Der abgeleitete Wert beschreibt den ausgenutzten Reibwert und kein Maximum. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, einen Filter einzusetzen, der die maximal erfassten Reibwerte ausgibt. Dazu werden die erfassten Datenpunkte unter Anwendung der linearen Funktion (13) und der Kurvendiskussion (14), die Maximalwerte durch Nullsetzen der Ableitung berechnet.

$$y = mx + t \quad (13)$$

$$\mu_{\max} = f'(\mu_{\text{Reibwert}}) = 0 \quad (14)$$

Beispielhaft dafür wurde ein Datensatz verwendet, der auf einer Winterfahrt auf einem Eissee erfasst wurde und unter Anwendung dieser Gleichungen und eines definierten Abtastbereichs mit MATLAB-Simulink simuliert wurde. Dies ist mit der Abbildung 3.11 verdeutlicht.

<sup>12</sup> Auch bekannt als FIR-Tiefpassfilter erster Ordnung

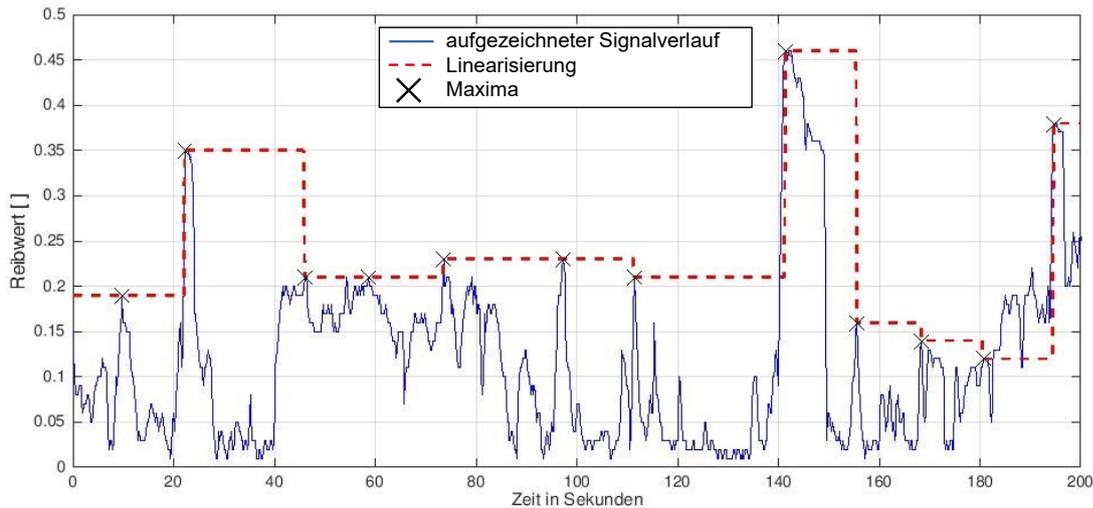


Abbildung 3.11: Maximalwertfilter für ein Reibwertsignal (Staiger, et al., 2019)

Die Erprobungsdaten der Winterfahrt weisen sehr niedrige Reibwerte auf, die so für die weitere Verarbeitung nicht genutzt werden können. Nach der Filterung und Linearisierung liegt der ausgenutzte Reibwert so vor, dass er für weitere Untersuchungen und Integrationen in andere Systeme wie zum Beispiel das Brems-Regelsystem verwendet werden kann.

### Kalman-Filter

Der Kalman-Filter ist ein Optimalfilter, der keine Beschränkung zulässt und geeignet ist für lineare Systeme. Das Funktionsprinzip basiert auf der *Prädiktion* und *Korrektur*. Dabei wird zuerst das reale Systemverhalten unter Anwendung eines Modells simuliert (*Prädiktion*). Im Anschluss wird der Schätzfehler ermittelt und mit Hilfe einer Gewichtungsmatrix  $k$  linear auf die Schätzung zurückgeführt (*Korrektur*). Die Gewichtungsmatrix wird auf der Basis des Vertrauensbereichs von Modellierungsfehler, Messrauschen und Konfidenz aufgestellt (Marchthaler, et al., 2017) (Steinmeyer, 2014). Nach (Meyer, 2017) wird die Anwendung in fünf Rechenschritte unterteilt. Dabei wird die *Prädiktion* in zwei Teilschritte gegliedert: erstens die *A-priori*-Schätzung für den Erwartungswert  $\hat{x}^-(k)$  und zweitens die *A-priori*-Kovarianz  $P^-(k)$  für den Zeitschritt  $k$ . Für diese Berechnung wird ein lineares System verwendet, mit  $A(k)$  als Systemmatrix, den Ein- und Ausgangsmatrizen  $B(k)$  sowie  $C(k)$ . Unsicherheiten wie zum Beispiel Messrauschen können in der  $W(k)$ -Matrix und Kovarianzen in der  $Q(k)$ -Matrix berücksichtigt werden. Dementsprechend ergibt sich nach (Marchthaler, et al., 2017) für die Prädiktion:

$$\hat{x}^-(k+1) = \mathbf{A}(k) * \hat{x}(k) + \mathbf{B}(k) * u(k) \quad (15)$$

$$\mathbf{P}^-(k+1) = \mathbf{A}(k) * \mathbf{P}^+(k) * \mathbf{A}^T(k) + \mathbf{W}(k) * \mathbf{Q}(k) * \mathbf{W}^T(k) \quad (16)$$

Sobald ein zukünftiger Messwert  $y(k)$  erfasst wurde, kann die Korrektur des geschätzten Zustandes  $\tilde{x}^+(k)$  und der Kovarianz  $\mathbf{P}^+(k)$  erfolgen. Diese A-priori-Schätzung kann je nach Messrauschen  $\mathbf{V}(k)$  und Anfangskovarianz  $\mathbf{P}(k)$  durch eine Verstärkungsmatrix (Kalman-Gain)  $\mathbf{K}(k)$  angepasst werden. Daraus ergeben sich folgende drei Schritte der Korrektur:

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}^-(k) * \mathbf{C}^T(k) * (\mathbf{C}(k)\mathbf{P}^-(k)\mathbf{C}^T(k) + \mathbf{V}(k) * \mathbf{R}(k) * \mathbf{V}^T(k))^{-1} \quad (17)$$

$$\tilde{x}^+(k) = \hat{x}^-(k) + \mathbf{K}(k) * (y(k) - \mathbf{C}(k) * \hat{x}^-(k)) \quad (18)$$

$$\mathbf{P}^+(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) * \mathbf{C}(k)] * \mathbf{P}(k) \quad (19)$$

Liegt ein nichtlineares System vor, kann ein *Extended-Kalman-Filter* verwendet werden. Dabei wird die *Jacobi-Linearisierung*

$$\mathbf{A}_K = \left. \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x} \right|_{\hat{x}_k, u_k} \quad \mathbf{C}_K = \left. \frac{\partial h(x_k, u_k)}{\partial x} \right|_{\hat{x}_k, u_k} \quad (20)$$

genutzt, damit die Kovarianzmatrix und die Kalman-Verstärkung berechnet werden können. Damit die Prädiktion gegeben ist, kann die nichtlineare Systemdynamik angewandt werden, sodass die notwendige Kalman-Verstärkung erreicht wird. Zur Verdeutlichung ist diese Berechnung in Abbildung 3.12 dargestellt. Zusätzlich wurde ein Verzögerungsglied  $q^{-1}$ , das die Ausgabe um eine Abtastung zurückhält, integriert. Dies bietet den Vorteil, dass die zeitliche Abweichung von Prädiktion zu Messwert unterdrückt wird und somit die Daten in Echtzeit vorliegen. Vertiefende Literatur zu weiteren Filterverfahren ist in (Meyer, 2017), (Puente León, et al., 2017), (Meffert, et al., 2018), (Schmidt, et al., 2014) und (Karrenberg, 2017) nachzuschlagen.

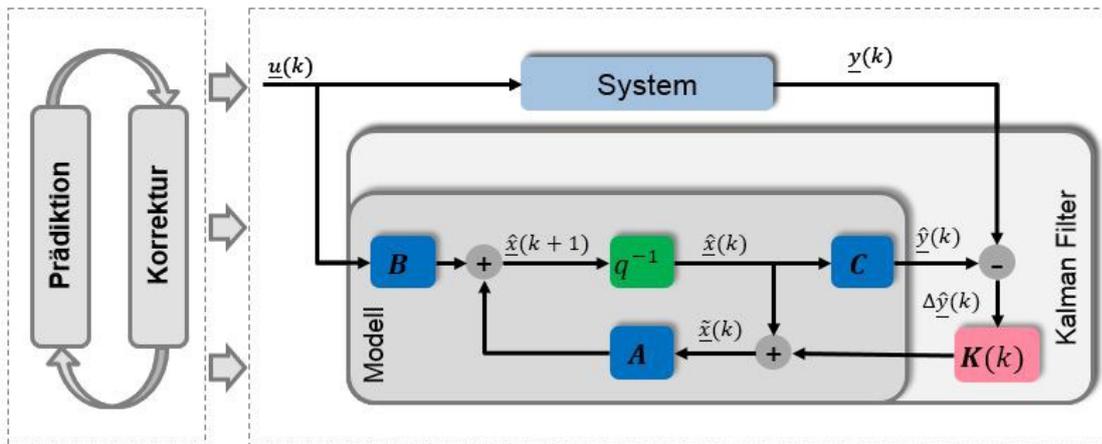


Abbildung 3.12: Modellierung des Kalman-Filters (Marchthaler, et al., 2017)

### 3.3.3 Signalverarbeitung im Fahrzeug

Das Bordnetz eines Fahrzeuges hat sich in den vergangenen Jahren aufgrund der gestiegenen Anforderungen stark verändert. Heute ist das Bordnetz das Nervensystem eines Fahrzeuges, das aus vielen einzelnen Steuergeräten besteht. Vor allem die Anforderungen der neuen FAS erhöhen den Bedarf an leistungsstarken Kommunikationsverbindungen. Sie werden in den kommenden Jahren noch weiter steigen. Um den Anforderungen gerecht zu werden, sind neue Entwürfe notwendig. Aktuelle Forschungen befassen sich mit Ansätzen wie Echtzeit-Ethernet-Backbones. Betrachtet man die heutigen Fahrzeugbordnetze, wird deutlich, dass sich in den vergangenen Jahren diverse domänenspezifische Bussysteme wie Controller-Area-Network (CAN), Local Interconnected Network (LIN), FlexRay oder Media Oriented Systems Transport (MOST) etabliert haben (Steinbach, 2019). Jedes dieser Bussysteme hat eine spezifische Aufgabe. Die hauptsächlichen Unterschiede liegen dabei in:

- Bandbreite
- Protokoll
- Topologie (Bus/Stern)
- Steuerung (Ergebnis/Zeit)
- Anschaffungs-, Applikations- und Wartungskosten

Je nach Anwendungsfall werden die Bussysteme ausgewählt, zum Beispiel LIN für einfache Vernetzung von Sensor und Aktor, MOST für die Übertragung von Video-, Sprachsignalen und Multimediaanwendungen. CAN ist derzeit noch das am meisten genutzte Netzwerk im Fahrzeug. Bei einer Bandbreite von bis zu 1 MBit/s können Datenrahmen mit einer Nutzlast von 0–8 Bytes übertragen werden. Des Weiteren können Nachrichten eindeutig adressiert und priorisiert werden. Gerade im Fahrwerk und Antrieb ist es notwendig, Signale bzw. Informationen

zu haben, die wenige Bytes lang sind, periodisch mit hoher Frequenz und zuverlässig mit geringer Latenz vorliegen. Dazu wurde CAN zum CAN mit flexibler Datenrate (CAN FD) weiterentwickelt. Die Nutzdatenlänge wurde auf bis zu 64 Bytes verlängert und die Datenübertragungsrate deutlich verkürzt. Aufgrund der deutlich höheren Bandbreite (bis 10 Mbit/s) werden bei neuen Fahrzeuggenerationen vermehrt FlexRay und Ethernet eingesetzt (Rausch, 2007) (Zimmermann, et al., 2014) (Mayer, 2006). Zur Kommunikation der einzelnen Bussysteme untereinander wird ein Gateway benötigt. Als Beispiel wird in der Abbildung 3.13 ein Bussystem dargestellt.

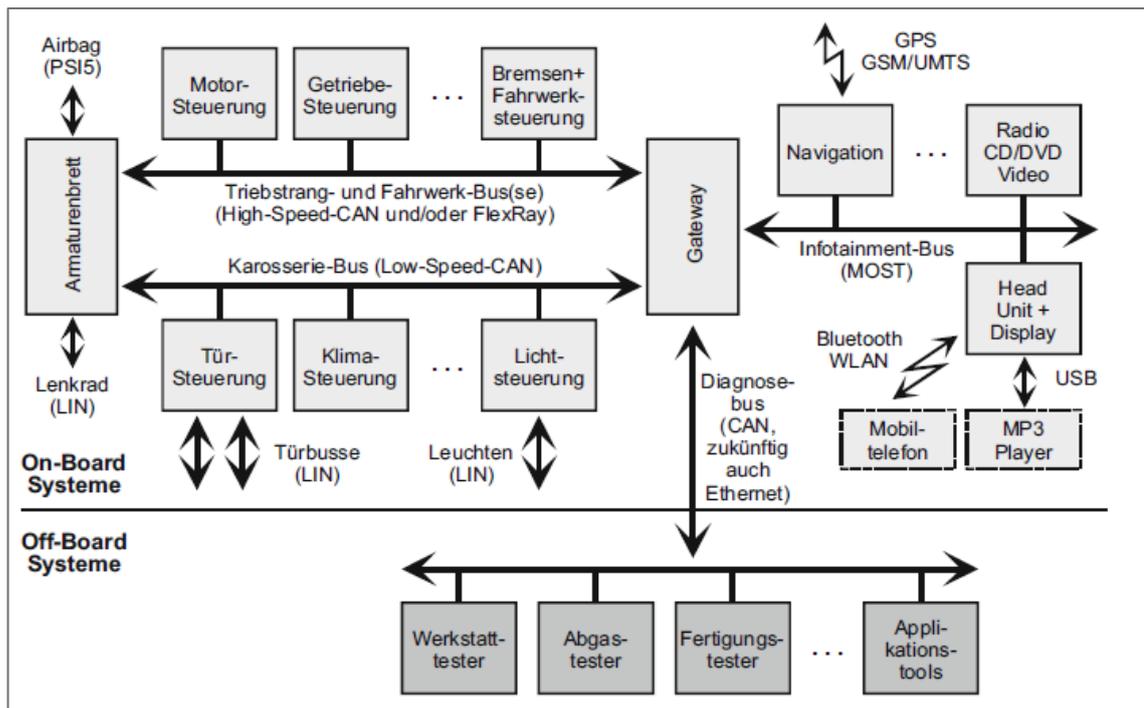


Abbildung 3.13: Bussystem im Fahrzeug (Zimmermann, et al., 2014)

Die Signale, die in der vorliegenden Arbeit benötigt werden, werden mit zwei verschiedenen Fahrzeugen erzeugt. Zum einen ist dies ein Porsche 911 Carrera (Typ 991) und zum anderen das aktuelle Modell 992. Die Informationen laufen dabei auf verschiedenen Steuergeräten. Die Informationsverarbeitung kommt aus der Regelungstechnik, welche die Aufgabe hat, ein technisches System funktionell konstant zu halten. Dabei werden von außen kommende Störgrößen korrigiert (Zacher, et al., 2017). Nach (Czichos, 2019) wird die Regelung wie folgt beschrieben:

- Da die Regelungstechnik nach dem Prinzip der Rückführung arbeitet, sind die Prozess- und Störgrößen durch Sensoren zu erfassen.
- Mit zwei Baugliedern kann die Vielzahl technischer Systeme auf die Grundform des Regelkreises zurückgeführt werden.
- Die Regelstrecke wird von der vorgegebenen technischen Anlage definiert.

- Der Regler kontrolliert das Zeitverhalten der Strecke und korrigiert.
- Der Aktor (Stellglied) bildet das Bindeglied zwischen Regelstrecke und Regler. Je nach Steuersignal wird sofort der zu regelnde Zustand beeinflusst.

In Abbildung 3.14 ist der geschlossene Regelkreis dargestellt.

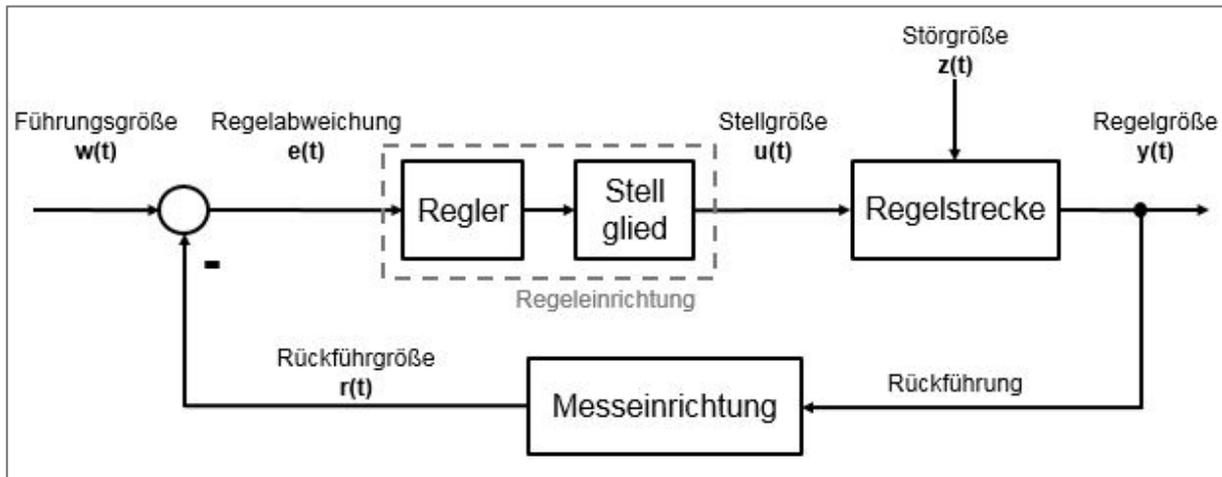


Abbildung 3.14: Der Regelkreis (Zacher, et al., 2017)

### 3.3.4 Modellierung der Signale im Zustandsraum

Die Modellierung von linearen Systemen wird im Zustandsraum beschrieben. Hierzu muss das zu betrachtende System anhand einer Differenzialgleichung dargestellt und anschließend mit der Hilfe einer Übertragungsfunktion in den Zustandsraum überführt werden. Damit dies erfolgen kann, muss das Verhalten des Systems bekannt sein. Dabei wird das System mit physikalischen Grundgleichungen wie zum Beispiel den Kirchhoff'schen Gesetzen oder der Energieerhaltung als Modell beschrieben. Ein zweiter Ansatz bildet die Differenz zwischen Ein- und Ausgangsgröße und nähert sich experimentell an (Lunze, 2016). Beide Varianten beschreiben das System anhand von Differenzialgleichungen und können folgendermaßen dargestellt werden: Eingangsgrößen  $x(t)$  und  $u(t)$  werden in den Matrizen  $A$ ,  $B$  und  $C$  zusammengefasst, anschließend übertragen in die Zustandsgleichung (21) und die Beobachtungsgleichung (22).

$$\dot{x}(t) = A * x(t) + B * u(t) \quad (21)$$

$$y(t) = C * x(t) \quad (22)$$

Damit die wirkenden Störgrößen kompensiert werden können, wird in das Modell ein Beobachter  $\hat{x}(t)$  eingeführt. Die mathematische Formulierung ist annähernd identisch zum realen Modell, da der Aufbau und die Stellgrößen gleich sind. Die Rückführung weicht vom ersten Modell ab, da der Differenzbetrag der Ausgangsgröße  $y(t)$  mit einer Verstärkung  $L$  multipliziert wird

(Zacher, et al., 2017). Die Gleichungen (23) und (24) und die Abbildung 3.15 zeigen die Umsetzung des Luenberger-Beobachters.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A * \hat{x}(t) + B * u(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (23)$$

$$\hat{y}(t) = C * \hat{x}(t) \quad (24)$$

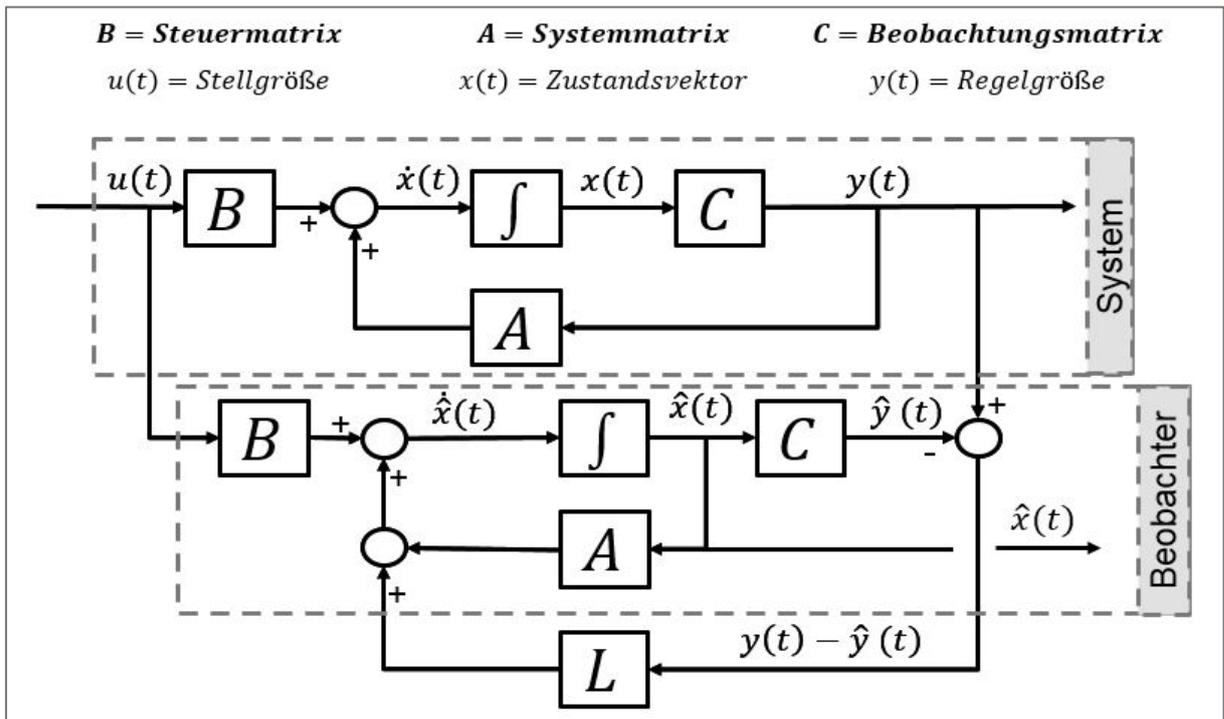


Abbildung 3.15: Wirkungsplan eines Systems mit Beobachter (Zacher, et al., 2017)

Kommen zu den deterministischen Störgrößen noch stochastische Einflüsse dazu, wird der asymptotische Beobachter keine korrekten Ergebnisse ausgeben (Fröhlich, 2007). Aus diesem Grund ist die Anwendung für den vorliegenden Fall nicht geeignet. Im kommenden Abschnitt werden diese Grundlagen vertieft und anhand Aufzeichnungen von Erprobungsdaten veranschaulicht.

### 3.4 Sensoren, Signalverarbeitung und mögliche Methoden zur Reibwertermittlung

Für die Umsetzung automatisierter Fahrfunktionen muss das Fahrzeug die Umwelt erfassen und richtig interpretieren. Damit dies gelingt, können verschiedene einzelne Sensoren zum Einsatz kommen. Eine Übersicht der möglichen Sensoren, die mittlerweile in Serienfahrzeugen zu finden sind, zeigt Abbildung 3.16. Die für die vorliegende Arbeit relevanten Sensoren werden im kommenden Abschnitt erläutert. Weitere Grundlagen zu der Entwicklung und zum Anwendungsbereich verschiedener Sensoren kann unter anderem in (Reif, 2016), (Hesse, et al., 2018) und (Dixon, 2018) nachgeschlagen werden.

#### 3.4.1 Relevante Sensoren für die Erfassung der Umgebung

Für die maschinelle Erfassung der Umgebung werden Sensoren verwendet, die in drei Prinzipien unterteilt werden können: erstens elektromagnetisch, zweitens optisch und drittens akustisch. Bei der Erfassung werden physikalische Größen erfasst, die in elektrische Signale gewandelt werden (Bosch, 2015).

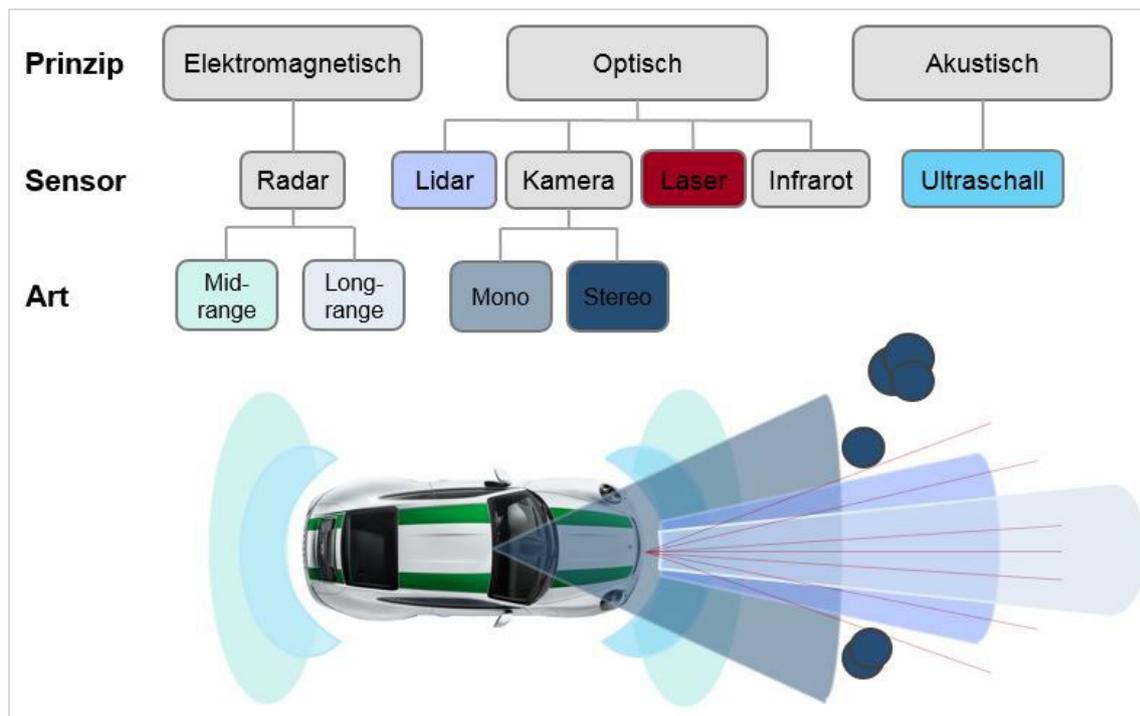


Abbildung 3.16: Sensoren für Abstandserfassung (Reif, 2010)

Die Wetterbedingungen haben auf das vorliegende Zwischenmedium einen großen Einfluss. Um einen möglichen Regen zu erfassen, wird der Regensensor, der in der Windschutzscheibe angebracht ist, als Eingangsgröße für eine weitere Verwendung definiert. Dieser Sensor erkennt bereits feinste Wassertropfen und steuert in Abhängigkeit von der festgestellten Was-

sermenge automatisch den Betrieb des Scheibenwischers. Für die Funktion werden eine optische Sende-Empfangsstrecke, eine Leuchtdiode und Fotodiode benötigt. Trifft ein Tropfen in diesem Bereich die Scheibe, wird die Lichtbrechung entlang einer definierten Strecke von der Fotodiode erfasst. In Abhängigkeit vom empfangenen Signal wird dann die Drehzahl des Scheibenwischermotors gesteuert (Bosch, 2015). Der direkte Abgriff der Wischergeschwindigkeit hat eine gute Korrelation zum tatsächlichen Niederschlag.

Als weitere wichtige Informationsgröße wird die Umgebungstemperatur definiert. Sensoren hierfür sind mehrfach im Fahrzeug verbaut. Die Temperatur lässt sich anhand der Änderung des elektrischen Widerstandes von unterschiedlichen Materialien bestimmen. Für die Plausibilisierung des Reibwertes wird die Außentemperatur einen Beitrag leisten.

In Fahrzeugen wie zum Beispiel dem neuen 911 ist serienmäßig eine Nässesensorik verbaut. Diese wird für die Funktion „*Porsche Wet Mode*“ verwendet. Hierbei liefern Körperschallsensoren, die in den Radhäusern verbaut sind, die Nässeinformation. Das von den Reifen aufgewirbelte Spritzwasser wird dabei in drei Untergruppen unterteilt: Tröpfchengischt, Schwallgischt und frontale Verdrängung. Mit Hilfe des Bandpassfilters lassen sich die erfassten Daten so filtern, dass aus der Anregung der Fahrbahnnässegrad abgeleitet werden kann (Schmiedel, 2018).

Die Frontkamera wird im Verlauf der Arbeit mit Hilfe einer USB-Kamera substituiert. Mittels photoelektrischer Effekte werden das einfallende Licht und lichtempfindliche Bildsensoren in elektrische Signale gewandelt. Diese Signale werden mit der passenden Bildverarbeitungssoftware ausgewertet. Vor allem die Lichtkontraste, die ausgewertet werden können, werden verwendet, um eine Fahrbahneigenschaft zu detektieren (Freuer, 2016). Damit eine Aussage über die Prädiktion zur Erfassung des Straßenzustandes gegeben werden kann, werden in Abschnitt 6.1 verschiedene Varianten für Erprobungsfahrten definiert und abgefahren.

Abschließend kann erwähnt werden, dass externe Sensoren, die zum Beispiel an Brücken die Straßentemperatur und den Wasserstand messen, über das vernetzte Fahrzeugsystem eingebunden werden können. Außerdem könnte aus den gesammelten Daten anderer Verkehrsteilnehmer eine Reibwertkarte erstellt werden, die wiederum als Input für das individuelle Fahrzeug genutzt werden kann. Eines der größten Projekte hierzu wird derzeit von der Firma NIRA Dynamics betrieben (Steiger, 2016).

### 3.4.2 Fehlerarten und Zuverlässigkeit von Sensoren für das Kraftfahrzeug

Sensoren werden im Fahrzeug nach ihrer Aufgabe und Anwendung ausgewählt. Prinzipiell können sie unterteilt werden in: funktionelle Sensoren (wie z. B. Temperatur), Sensoren für die Sicherheitstechnik (wie z. B. Auslösung Airbag) und Sensoren für die Überwachung des Fahrzeugs (wie z. B. Verschleissensorik). Ferner wird ihre Auswahl auch an der Umgebungssituation, den Kosten und am Bauraum definiert. Wie beschrieben, erfassen Sensoren einen bestimmten Zustand und wandeln diesen in elektrische Signale. Bei der Ausgabe wird die Soll-Kennlinie mit der Ist-Kennlinie verglichen. Gibt es eine Abweichung zwischen Eingangsgröße/Anzeigewert  $y_{anz}$  und dem Sollwert  $y_{wahr}$ , spricht man von einem Fehler  $F$ . Analog zu jeder anderen Messung spricht man auch bei Sensoren von zufälligen und systematischen Fehlern. Der wahre Wert kann nur mit einem Messmittel aufgenommen werden, das von seiner Genauigkeit mindestens eine Klasse besser ist als der verwendete Sensor.

$$F = y_{anz} - y_{wahr} \quad (25)$$

Der absolute Fehler  $F_{abs}$  stellt bei der Darstellung immer den Betrag der Abweichung dar. Dieser kann in vier Kategorien eingeteilt werden (Heimann, et al., 2016):

- Die Nullpunktverschiebung ist eine Parallelverschiebung. Diese kann durch verschiedene physikalische Abhängigkeiten der Messgröße entstehen. Zufällige Fehler (tief- und hochfrequentes Rauschen) und Alterungseffekte.
- Der Steigungsfehler ist eine Änderung der Steigung.
- Die Linearitätsfehler sind Abweichungen zu der Soll-Linie. Die zum Beispiel durch Schwingungen des Abnehmers entstehen.
- Der Hysteresefehler ist eine Abweichung von dem Ausgangssignal aufgrund eines bestimmten Stimuluswertes. Abhängig von der Richtung der Annäherung.

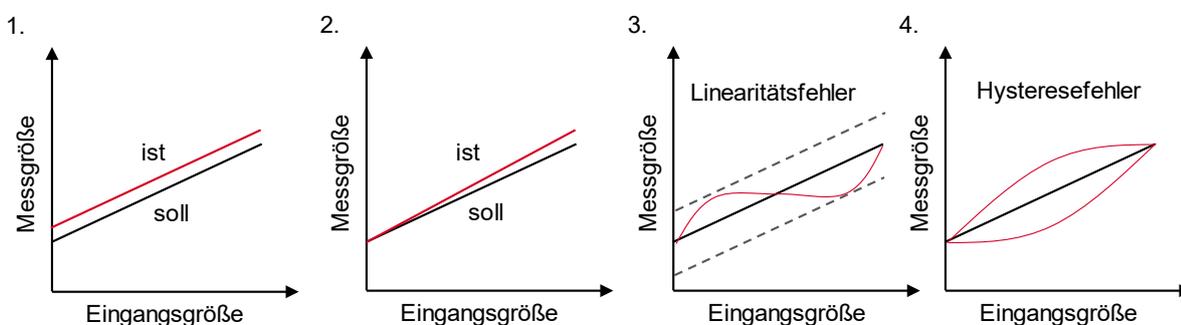


Abbildung 3.17: Fehlerarten von Sensoren (Heimann, et al., 2016)

Bei der Berechnung des systematischen Fehlers ergibt die Addition der Summe an Einzelfehlern den Gesamtfehler.

$$F_{ges [syst]} = \sum_1^n |Fi| \quad (26)$$

Die stochastischen Fehler werden durch die Addition der Einzelfehler und deren Quadratsummen berechnet.

$$F_{ges [stoch]} = \sqrt{\sum_1^n Fi^2} \quad (27)$$

Wie bei anderen Bauteilen wird durch die Ausfallrate die Zuverlässigkeit eines Sensors bestimmt. Diese statistische Größe wird angegeben in 1/h, %/h oder ppm/h. Die Ausfallrate selbst wird mit einer sehr großen Anzahl an Versuchen ermittelt. Die Ausfallrate  $\partial$  berechnet sich aus der prozentualen Änderung und der Überlebenswahrscheinlichkeit R pro Zeiteinheit  $dt$ .

$$\partial(t) = \frac{1}{R(t)} * \frac{dR}{dt} \quad (28)$$

Bevor die Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet werden kann, ist es dringend notwendig, zuvor die Betriebsbedingungen festzulegen. Ohne diese Angabe ist die reine Berechnung der Ausfallrate nicht zielführend.

Die Zuverlässigkeit  $z$  bildet sich aus dem Kehrwert der Ausfallrate  $\partial$ .

$$z = \frac{1}{\partial} \quad (29)$$

Abbildung 3.18 zeigt die Ausfallrate über der Zeit. Bei dem typischen Badewannenverlauf zeigt sich zu Beginn, dass die Ausfallrate relativ hoch ist. Sie bleibt anschließend für einen längeren Zeitraum weitgehend konstant und steigt gegen Ende der Lebensdauer stark an. Sensoren, die eine sehr hohe Zuverlässigkeit benötigen, werden vor der Auslieferung vorgealtert. Das geschieht zum Beispiel durch Lagerung mit erhöhten Temperaturen. Im Wesentlichen sind die Frühausfälle in der Regel Fertigungsmängel. In der Automobilbranche werden die ppm-Werte auf eine Zeitspanne von 10 Jahren oder alternativ auf 150 000 km definiert. Das heißt, bei einem ppm <10 dürfen in 10 Jahren, bei 1 Million Sensoren, weniger als 10 Stück ausfallen. Der ppm für verschiedene Anwendungsfälle kann aus (Reif, 2016) entnommen werden.

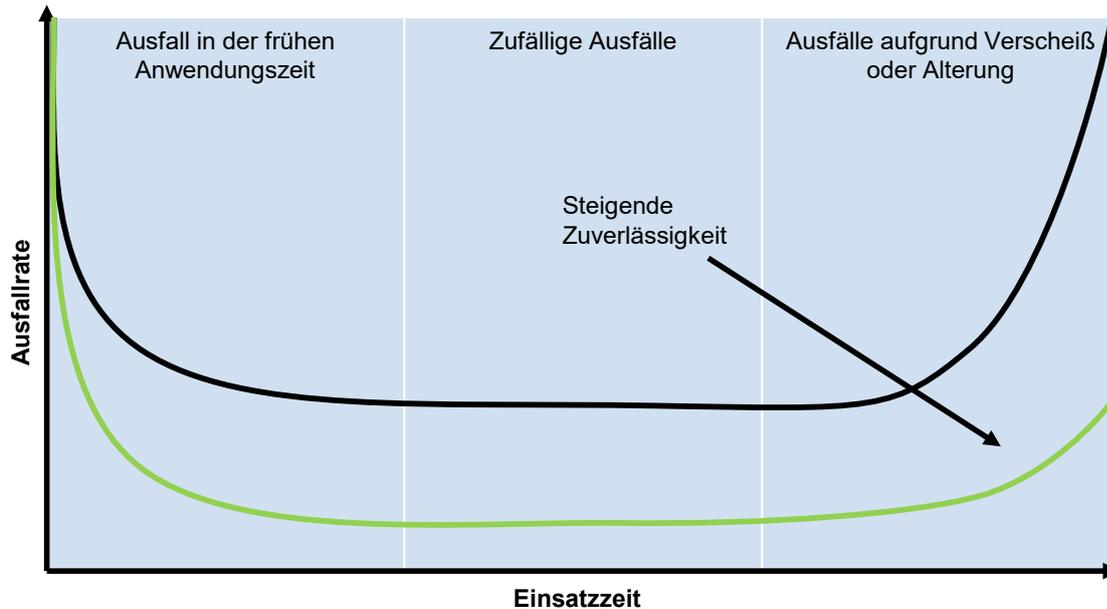


Abbildung 3.18: Verteilung Ausfallrate über Zeit (Reif, 2016)

Generell lassen sich die Sensoren in einem Fahrzeug in drei Zuverlässigkeitsklassen einteilen:

1. Passagierschutz, Bremse und Lenkung,
2. Fahrwerk und Triebstrang und
3. Diebstahlsicherung, Diagnose-Informationen und Komfort.

Die Anforderungen der Sensorik der vorliegenden Arbeit beziehen sich auf die zweite bis dritte Stufe.

Je nach Einsatzgebiet müssen die passenden Sensoren ausgewählt werden. Die Kriterien zu der Auswahl gestalten sich wie folgt:

- Messbereich: erfassbarer Bereich zwischen Ein- und Ausgangswerten
- Messgenauigkeit: maximal tolerierte Abweichung, real zu gemessenem Wert
- Auflösung: Abstand zwischen zwei Messpunkten, die als zwei getrennte Messpunkte aufgelöst und gemessen werden können
- Messabweichung: Abweichung zwischen Ist-Messwert und Soll-Referenzwert
- Präzision: zeigt die Wiederholgenauigkeit von Messreihen bei konstanten Bedingungen

Sensoren können innerhalb dieser Kriterien Fehler aufzeigen. Aus der Summe der Einzelfehler ergibt sich die Messgenauigkeit. Um diese Summe so niedrig wie möglich zu halten, muss mit der Signalverarbeitung das notwendige Ergebnis optimiert werden (Heimann, et al., 2016) (Fraden, 2015). Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde deutlich, dass es für die vorliegende

Problemstellung nicht ausreichend ist, einen Sensor oder eine Informationsquelle als Basis zu nutzen. Daher wird im kommenden Abschnitt die Sensordatenfusion erläutert.

### 3.4.3 Sensordatenfusion

Komplexe automatisierte Fahrfunktionen erfordern die Erfassung der Umwelteinflüsse. Dazu reicht es nicht aus, sich auf eine Informationsquelle zu verlassen. In der eingehenden Literaturrecherche und den ersten Versuchen hat sich gezeigt, dass sich der Temperatur-, Nässe-, Licht- und der Regensensor eignen, um die Umwelteinflüsse zu erfassen. Durch die Fusion und Optimierung dieser einzelnen Parameter kann die Zuverlässigkeit erhöht und die Fehlermeldungen oder der Ausfall eines Sensors können kompensiert werden. Hierfür können verschiedene Begriffe wie „Informationsfusion“, „Multisensordatenfusion“, „Datenfusion“ oder auch „Multi-Sensor-Integration“ verwendet werden. In der vorliegenden Arbeit wird für den Zusammenschluss aller sensorisch erfasster Daten der Begriff „Fusion“ verwendet. Durch eine Fusion können sich folgende Vorteile ergeben:

- Die Robustheit und Zuverlässigkeit können durch redundante Sensorinformationen gesteigert werden.
- Durch das Abdecken und Überschneiden des Messbereiches einzelner Sensoren wird der Vertrauensbereich erhöht.
- Durch das Nutzen gemeinsamer Informationen wird der Interpretationsspielraum von Messwerten reduziert.
- Anhand der Informationserfassung von verschiedenen Sensoren (z. B. optische Sensoren und Ultraschallsensoren) wird das System robuster gegen Interferenzen.
- Mehrere unabhängige Messungen und Sensoren für eine Eigenschaft ergibt eine bessere Auflösung.

Durch die Fusion können Messdaten kooperativ, komplementär oder redundant abgesichert werden. Allgemein lässt sich eine Sensorfusion in drei Kategorien unterteilen:

- Low-Level-Fusion: Um mehr Informationen zu bekommen, werden verschiedene Rohdaten von unterschiedlichen Sensoren miteinander fusioniert.
- Intermediate-Level-Fusion: Wird auch als Feature-Level bezeichnet, kombiniert verschiedene Funktionen wie zum Beispiel Kanten, Ecken, Linien, Texturen oder Positionen in einem Feature-Level. Dieses kann anschließend zur Segmentierung und Erkennung verwendet werden.

- High-Level-Fusion: Hierbei werden einzelne erkannte Eigenschaften der Umwelt in passender Weise zusammengeführt. Hierzu zählen unter anderem die Fuzzy-Logik und statistische Methoden.

Anhand dieser Eigenschaften kann die Fusion in verschiedene Arten differenziert werden. Eine Form ist die *redundante Fusion*. Hierbei wird ein Sensor durch einen weiteren der identischen Bauart als Ausfallebene gestützt. Die *komplementäre Fusion* beschreibt die Erfassung zweier verschiedener Messgrößen, die gemeinsam ein Objekt von Interesse darstellen, beispielsweise die Erfassung einer Bordsteinkante in Höhe und Abstand. Der für diese Arbeit interessanteste Fall ist die *kooperative Fusion*. In der folgenden Tabelle 3.1 werden die häufig verwendeten Fusionsmethoden aufgezeigt:

Konzept	Ansatz	Wissenschaftliche Basis	Fusion	Einsatzgebiet
Stochastik	Occupancy Grids	Bayes'sche Schätzung	Maximale Bayes'sche Schätzung	Navigation oder räumliche Wahrnehmung
	Kalman-Filter	Lineare dynamische Systeme, statistische Filter	Ein Systemmodell zielgerecht Filtern	Korrektur von Sensordrift, Fusion von Sensorrohdaten
Informatik	Fuzzy-Logic	Mehrwertige Logik	Logische Auswahl	Qualitative Modellierung
	Neuronale Netze	Numerische Optimierungsverfahren	Eintrainiertes Verhalten	Lernen anhand von vorgegebenen Datensätzen, Klassifikation und Objekterkennung

Tabelle 3.1: Ansätze zur Datenfusion (Heizmann, et al., 2014)

Für die Fusion der erfassten Sensordaten bzw. Messgrößen wurde eine Vielzahl an verschiedenen parametrischen Fusionsmethoden entwickelt. Zu den bekanntesten gehören:

- die merkmalsbasierten Methoden,
- probabilistische Methoden,
- neuronale Methoden und
- die Fuzzy-Logik.

Als Beispiel für die erstgenannte Methode dient das Kalman-Filter oder der gewichtete Mittelwert. Zu den probabilistischen Methoden zählt zum Beispiel die Bayes'sche Statistik. Die neuronalen Methoden oder auch neuronalen Netze sind dann von Vorteil, wenn die Erstellung eines Algorithmus zur Kombination der Sensordaten nicht möglich ist. Bei der Fuzzy-Logik

wird der Mengenbegriff verallgemeinert, um eine unscharfe Wissenspräsentation zu bekommen. Die Ergebnisse repräsentieren in der Regel das vom Menschen erwartete Wissen. In der Praxis werden die Fuzzy-Methoden oft genutzt, um Unsicherheit bei der Interpretation von Sensordaten zu handhaben (Ruser, et al., 2007).

## 4 Identifikation der Anforderungen

Aus Kapitel 2 kann entnommen werden, dass es im Bereich der Reibwertschätzung bereits eine Vielzahl vereinzelter Methoden gibt, die einen lokalen Reibwert schätzen können. Allerdings beschreibt keine Arbeit die Anforderung oder Validierung und eine mögliche Verwendung der Reibwertinformation.

Aus diesem Grund werden nachfolgend die Anforderung und Verwendung der Reibwertinformation methodisch analysiert. Damit dies erfolgen kann, werden ausgehend von dem Kunden-Use-Case verschiedene Szenarien beschrieben. Diese beschreiben zum Beispiel die Fahrt in einen Sommer- und Winterurlaub. Abhängig von der jeweiligen Umweltsituation werden die Anforderungen an ein Reibwertsignal und die weitere Wirkkette beschrieben.

Damit für eine Validierung ein eindeutiges Fahrmanöver definiert werden kann, wird unter Verwendung eines Manöverkatalogs und anschließender Nutzwertanalyse das Zielszenario definiert. Für eine spätere Validierung werden Reibwertäquivalenzklassen (niedrig, mittel und hoch) eingeführt. Unter Nutzung der Äquivalenzklassen wird eine Matrix entworfen, welche die Reibwertschätzung mit dem realen Wert vergleicht. Die Abweichungen werden danach in kritische und störende Fehler eingeteilt und als Basis für eine stetige Optimierung genutzt.

Aus der Nutzwertanalyse und dem Use-Case-Szenario wurde als Zielfunktion ein Autobahn-pilot ermittelt. Damit die Längsführung nachvollziehbar ist, werden als Teilkapitel die Bremsstrategie und der sichere Abstand bei Fahrten auf der Autobahn erläutert. Des Weiteren wird die Zielfunktion mit der vorhandenen Sicherheitsanforderung aus der ISO 26262 bewertet. Als Erweiterung zum bisherigen Stand der Technik wurden der Gesetzesentwurf „Safety of the Intended Functionality“ sowie der Ansatz „Best Practices“ nach (Wood, et al., 2019) verwendet, um die Anforderungen in einer realen Situation zu beschreiben.

## 4.1 Use Case – Funktionsbeschreibung

Neu zu entwickelnde Funktionen müssen einem Kundenwunsch entsprechen, um den Return on Investment (ROI) sicherzustellen. Dazu werden unter Verwendung der Use-Case-Methode Kundenszenarien und deren mögliche Anwendungsfälle erarbeitet. Die Use-Case-Methode wird in der Literatur auch als ein Werkzeug des Requirement-Engineerings für Kundenorientierung beschrieben. Nach (Ebert, 2014) und (Moll, 2018) wird bei der Anwendung immer der Bezug zwischen Kundenperspektive und Geschäftszielen dargestellt.

Bei der Durchführung werden Kundenszenarien erstellt, die mittels Epic<sup>13</sup> im Stil einer Geschichte beschrieben werden. Diese werden anschließend mit der Use-Case-Betrachtung in technische Detaillierungen überführt und der Entwicklung zur Verfügung gestellt. Die Entwicklung erarbeitet daraus eine technische und funktionale Produktbeschreibung und führt diese unter dem Oberbegriff „Anforderungen“ zusammen (Wirdemann, 2011).

In der vorliegenden Arbeit wurde die Darstellung der User-Story in Form einer Bilderstory gewählt. Durch diese Darstellung werden der Kundenmehrwert und Anwendungsfall vereinfacht dargestellt. In Abbildung 4.1 wird die User-Story für die vorliegende Arbeit beschrieben. Dabei wird unter Berücksichtigung der Reibwertinformation eine Route optimiert und den Mehrwert für den Kunden dargestellt. Auf Grund dieser methodischen Vorgehensweise und Darstellung wird die Notwendigkeit der Reibwertinformation für kommende Fahrfunktionen nochmals unterstrichen.

---

<sup>13</sup> Beschreibt den Ablauf und betroffene Systeme eines Use-Case von Anfang bis zum Ende

**Porsche InnoDrive – Der Epic**



Stefan, 50, Architekt öffnet in Stuttgart seine Haustüre. Bei strahlendem Sonnenschein steigt er in sein Fahrzeug ein. Das Fahrzeug lädt mit dem ersten Dreh des Schlüssels alle für die Fahrbahnbewertung relevanten Daten für eine optimale Funktion des InnoDrive aus der **Porsche Grip-Map** und bestimmt die Fahrbahnsituation für die aktuelle Position per GPS.



Stefan stellt die Routenoption zur Arbeit auf die Option „**Optimiert**“ da sich dicke Wolken am Horizont abzeichnen. Mit dieser Auswahl werden in der Berechnung der Route aktuelle Daten zum Fahrbahnzustand berücksichtigt und die Strecke auf das **bestmögliche Haftungspotential** ausgelegt. Die Fahrt in das Ski Wochenende kann entspannt entgegen gesehen werden.



Mit dem **InnoDrive** aktiviert übernimmt das Fahrzeug die Regelung der Längsdynamik für die Route. Die erlaubte **Geschwindigkeit**, das **Streckenprofil**, **fahrdynamische Grenzen** und **kraftstoffsparende Fahrmanöver** werden berücksichtigt. Stefan muss nur Lenken und der Porsche regelt sich **angenehm** und **sicher** durch die kurvigen Straßen.



Mit dem plötzlich beginnenden Regen wird die Fahrzeugregelung aufgrund der **geringeren Haftung** auf weniger **Kurvengeschwindigkeit**, frühere **Bremszeitpunkte** und **sanftes Beschleunigen** getrimmt. Mit der ständigen **Überwachung** des Fahrbahnzustandes regelt das Auto angenehm sowie **unauffällig** auf den **rutschigen Straßen** und Stefan kann entspannen.



Der Regen wird stärker – das Fahrzeug registriert die **gestiegenen Wassermassen** auf der Straße. Ab einem Schwellwert gilt **Aquaplaning-gefahr**. Stefan wird über die kritische Fahrbahnsituation informiert und das Fahrzeug übergibt nach 30s die Fahrfunktion zurück an Stefan



Das Fahrzeug findet eine Route mit einwandfreien Fahrbahnzustand. Auf dieser angekommen registriert das Fahrzeug die **verbesserten Bedingungen** und die Fahrerassistenzfunktion wird **vollumfänglich freigegeben**. Der Porsche jagt über die Landstraße und Stefan freut sich über die gesparte Fahrtzeit.



Die letzten Meter ins Skigebiet - Es **beginnt heftig zu schneien**. Anhand der umfassenden Sensorik erfasst das Fahrzeug das **schlechte Gripniveau** und das Tempolimit. Um den Fahrer in dieser Situation zu schützen wird der **Fahrzeugabstand** und **Kurvengeschwindigkeit** auf maximale Sicherheit getrimmt



Durch die Unterstützung seines Fahrzeugs bei allen verschiedenen Fahrbahnzuständen kommt Stefan **wohlbehalten** und **entspannt** am Ziel an. Er hat die Woche hinter sich gelassen und freut sich über den Neuschnee als er sich die Ski anschnallt und auf die Piste startet.

Abbildung 4.1: User-Story – HAF-System mit Umweltinformation. In Anlehnung an (Porsche-AG, 2019)

Der Epic ist aufgebaut als eine durchgehende Geschichte, die vor der eigenen Haustür mit dem Start des Fahrzeugs beginnt. Als Ziel wird die Fahrt in ein Skigebiet definiert. Dies bietet sich an, da dabei verschiedene Witterungsbedingungen und Straßenzustände durchfahren werden. Die Reaktion des Fahrzeuges bei einer Änderung des Straßenzustandes wird je Bild und Situation erläutert. Je nach Änderung des Straßenzustandes können Warn- und Übergabestrategien für den Fahrer definiert werden. Mögliche Strategien werden in Tabelle 4.1 aufgezeigt.

		Fahrbahnzustand			
		trocken	nass	Schnee/Eis	Aquaplaning
Funktion/ Eigenschaft	Geschwindigkeit	keine Einschränkung	reduzieren	stark reduzieren	-
	Warnung	nicht erforderlich	Nässelevel anzeigen	niedriger Reibwert	sofort
	Bremseingriff	spät	früh	sehr früh	-
	Kurvengeschwindigkeit	keine Einschränkung	Reduzieren	keine Kurvenfahrten	-
	Abstand	gesetzliches Niveau	erhöhen	sehr hoch	-
	Beschleunigen	keine Einschränkung	verringern	verringern	-
	Übergabe an den Fahrer	nein	nein	ja	sofort

Tabelle 4.1: Funktions- und Eigenschaftsableitung aus Epic

Damit der Transfer von der User-Story auf den Use Case und damit in technische Anforderungen erfolgen kann, wird im Anschluss der Use Case beschrieben.

**Technische Umsetzung:** Nun werden die in der User-Story gewonnenen Informationen in den Use Case übersetzt und somit in technisch detaillierter Form aufgeführt. Nach (Cockburn, 2008) ist es am sinnvollsten, die Umlage auf den Use Case mit folgenden Stichworten zu beschreiben:

- Inputs von Akteuren/Systemen,
- Beschreibung,
- Anfangszustand,
- Endzustand,
- Outputs an Akteure und Systeme.

Für die Dokumentation bietet sich ein einheitliches Format an. Ein Beispiel zeigt Abbildung 4.2. Wichtig bei der Befüllung sind die eindeutige Beschreibung und Abgrenzung der Einflussgrößen. Diese sollen prägnant und in Stichpunkten formuliert werden, damit sie einfach und uneindeutig zu extrahieren sind. Das Feld „Inputs“ wird in dem vorliegenden Fall als zentrale Stelle genutzt, um die relevante Soft- und Hardware zu definieren, die zur Erfassung des Straßenzustands beitragen.

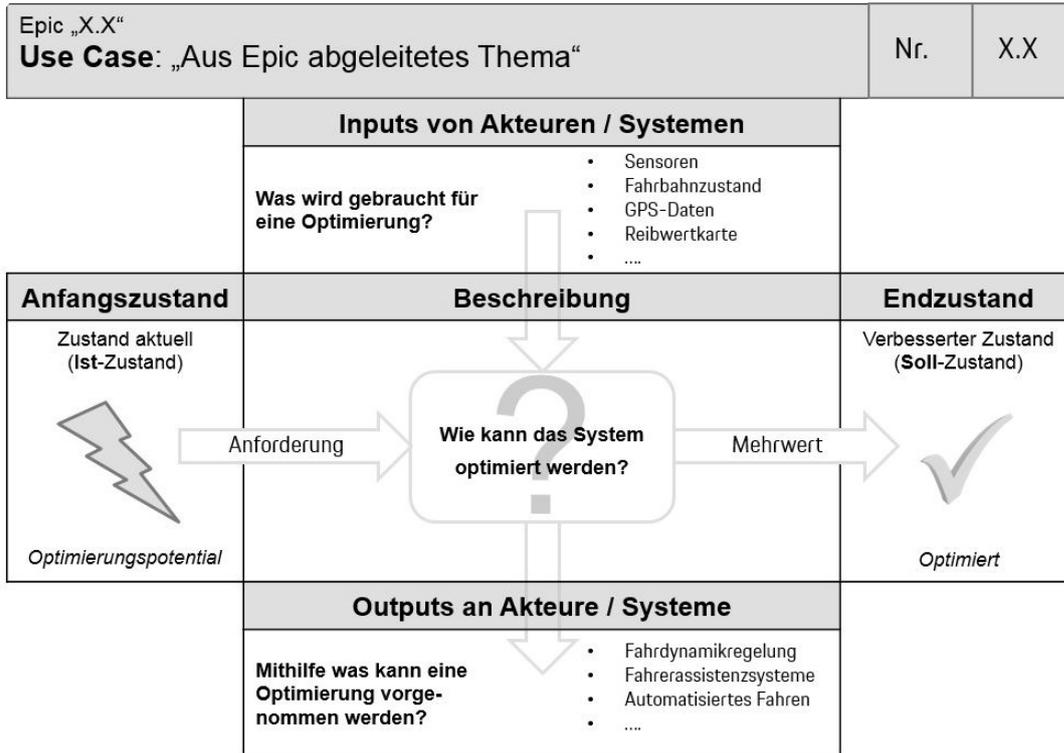


Abbildung 4.2: Erstellung eines Epic (Porsche AG, 2018)

Relevante Inputgrößen des Systems werden in Tabelle 4.2 aufgezählt und je nach Eignung bewertet.

		Fahrbahnzustand			
		trocken	nass	Schnee / Eis	Aquaplaning
Eignung Sensorik für Inputparameter	Temperatursensor	nur bedingt geeignet	nur bedingt geeignet	nur bedingt geeignet	nicht geeignet
	Scheibenwischerdrehzahl	gut geeignet	gut geeignet	nur bedingt geeignet	nicht geeignet
	Luftfeuchtigkeitssensor	nur bedingt geeignet	nur bedingt geeignet	nicht geeignet	nicht geeignet
	Nässesensor	gut geeignet	gut geeignet	nur bedingt geeignet	gut geeignet
	Fahrzeugkamera	gut geeignet	gut geeignet	gut geeignet	nur bedingt geeignet

Tabelle 4.2: Vergleich der Eignung verschiedener Sensorik für Inputgrößen zur Fahrbahnzustandsbestimmung

Unter Berücksichtigung der User-Story und des Use Case lassen sich Rahmenbedingungen und Anforderungen für die Entwicklung ableiten.

Aus dem Use-Case und der Ableitung in technische Anforderungen wurde deutlich, dass die vom Kunden gewünschten Systemeigenschaften vernetzte Funktionen betreffen. Aus diesem Grund werden in Tabelle 4.3 die geforderten Systemeigenschaften zusammengefasst.

<b>Kurzfassung der Funktionsbeschreibung</b>	
1	Kunden wünschen sich eine Funktion der SAE Stufe 3
2	Anwendungsgebiet sind Autobahnfahrten bei hohen und mittleren Reibwerten
2.1	Das Ego-Fahrzeug kann den Fahrbahnreibwert schätzen
2.2	Der Bremsweg kann aus dem Kraftschlusspotenzial berechnet werden
3	Über C2X können kartographierte Reibwertinformationen integriert werden
3.1	Das Ego-Fahrzeug kann den vorliegenden Reibwert kartographieren
3.2	Diese Informationen sind up- und downloadfähig
4	Das Ego-Fahrzeug muss weitere Verkehrsteilnehmer erfassen können
5	Die Fahrweise des Ego-Fahrzeuges kann automatisch nach dem aktuellen Kraftschlusspotenzial anpasst werden
5.1	Eine sichere Längsführungsstrategie wird eingestellt
5.2	Eine sichere Querführungsstrategie wird eingestellt
6	Das System kann über eine Warnstrategie den Fahrer informieren

*Tabelle 4.3: Kurzfassung Funktionsbeschreibung*

Zur weiteren technischen Detailierung wird diese Funktionsbeschreibung in ein Systemmodell übersetzt, welches die relevanten Schnittstellen und Einzelkomponenten beinhaltet, die zur Umsetzung der gesamten Funktion notwendig sind. Dies ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Fahrzeugführung in Längsrichtung betrachtet. Die Querführung wird ausgeklammert. Bei der Längsführung wird davon ausgegangen, dass der gewünschte Abstand nach vorne fehlerfrei eingehalten werden muss. Damit dies durch eine passende Bremsstrategie umgesetzt werden kann, werden die notwendigen Anforderungen an das Bremssystem in Abschnitt 4.4.1 beschrieben. Da das Beschleunigungsverhalten keinen sicherheitsrelevanten Einfluss darstellt, werden in der vorliegenden Arbeit nur das Verzögerungsverhalten und die damit verbundene Bremsstrategie berücksichtigt. Die vollständige Funktionalität der Regelsysteme, Anti-Blockier-System (ABS), Anti-Schlupf-Regelung (ASR) und Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP) für die Umsetzung der reibwertabhängigen Bremsstrategie wird vorausgesetzt.

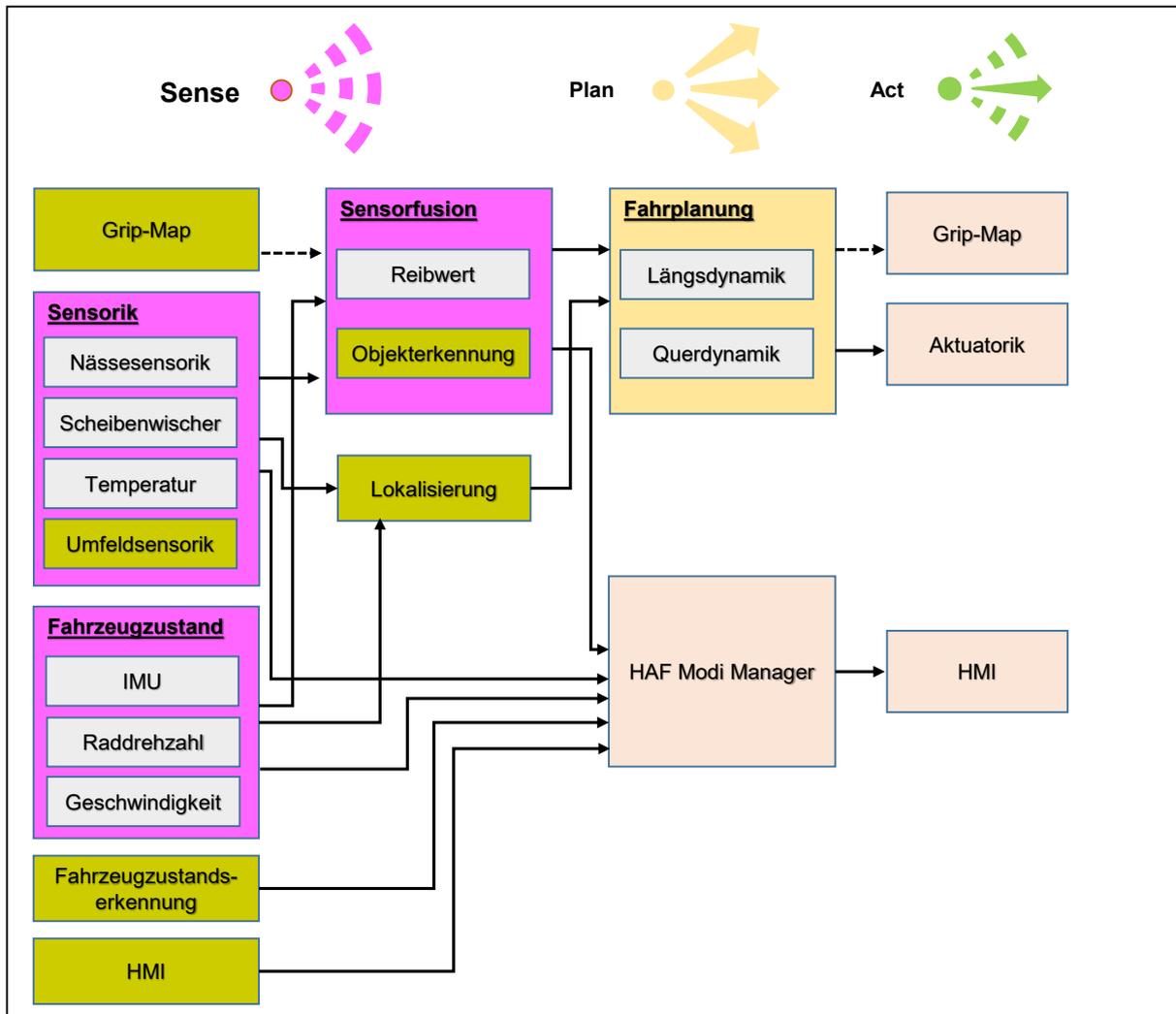


Abbildung 4.3: Funktionale Architektur des Reibwertschätzers

Für die Sicherheit des Gesamtsystems ist die Wahl des Anwendungsbereiches und der Verfügbarkeit wesentlich. Daher wird die Operationsdomäne folgendermaßen definiert:

- Schnellstraßen mit getrennten Fahrbahnen für den Richtungsverkehr und mehreren Fahrstreifen,
- alle Richtungsfahrstreifen der oben genannten Fahrbahnen,
- Geschwindigkeitsbereich 0 km/h bis 130 km/h,
- alle Wetterbedingungen,
- Tag- und Nachtfahrt.

Außerhalb dieses Einsatzgebietes wird die Reibwertschätzung dem Fahrer als Feature zur Verfügung gestellt. Dies kann die Sicherheit erhöhen und die Unfallgefahr vermindern.

Kommt es bei einem der oben genannten Subsysteme zu einer Einschränkung, muss als Degradationsmaßnahme der Fahrer informiert werden. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf den

oben beschriebenen Phasen Sense und Plan, da mögliche Sicherheitsrisiken bei der automatisierten Ausführung der Brems- und Antriebsaktorik von der Funktionsausfallsicherheit (FuSi) abgedeckt sind. Des Weiteren wird der fehlerhafte Gebrauch oder eine fehlerhafte Kontrollübernahme des Fahrers im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Nach (Wood, et al., 2019) wird entsprechend dem Dekompositionsprinzip das Gesamtfahrzeug als Subsystem separat betrachtet. Das heißt, bei der Integration des Reibwertschätzers müssen alle Fehler, die an Schnittstellen auftreten, bei den Sicherheitsanalysen der einzelnen Teilsysteme mitbetrachtet werden.

## 4.2 Situationskatalog und Nutzwertanalyse

In einem Situationskatalog (SitKat) werden verschiedene Fahrscenarien identifiziert und beschrieben, die bei der Entwicklung und Nutzung von Fahrfunktionen durchfahren werden müssen. Dazu werden zuerst Versuche auf dem Prüfgelände gefahren, bevor eine Straßenfreigabe erteilt wird. Ist diese erteilt, werden Dauerlauffahrzeuge mit der notwendigen Technik ausgestattet und in einem definierten Gebiet gefahren. Bei der Durchführung des Dauerlaufs ist der Fokus zunächst auf die Verfügbarkeit und Verlässlichkeit gelegt. Bei einem Abwurf oder einer Fehlfunktion wird die jeweilige Situation „getriggert“. Ein Triggerpunkt zeichnet alle gewünschten Signale auf dem Bussystem vor und nach dem Trigger-Zeitpunkt auf. Nach jeder Erprobungsfahrt werden die gespeicherten Daten vom Fahrzeug geladen und in der entwickelnden Fachabteilung analysiert. Damit die Fahrfunktionen und die auftretenden Fehlfunktionen reproduzierbar sind, wird mit dem SitKat beschrieben,

1. **welche** Situation im Straßenverkehr zu erwarten ist,
2. **wie** das Fahrzeug reagieren darf.

Ähnlich wie beim Use Case werden bei diesem Vorgehen die Reaktionen eines Fahrzeuges in Abhängigkeit von der Fahrsituation aufgezeigt.

Da bei der Fahrt aus der User-Story viele verschiedene Fahrsituationen mit diversen Umweltbedingungen durchfahren wurden, wird für den weiteren Verlauf der Arbeit die relevanteste Situation mit Hilfe der Nutzwertanalyse erarbeitet.

Die Nutzwertanalyse ist eine Methode, die verwendet wird, wenn eine Vielzahl an Handlungsalternativen transparent dargestellt werden soll. Bei der Verwendung werden mit einfach quantifizierbaren Kriterien Entscheidungen herbeigeführt. Dazu wird als Erstes ein Raster erstellt. Die zur Auswahl stehenden Alternativen werden in Spalten eingetragen und die zur Bewertung stehenden Kriterien sowie Gewichtungsfaktoren in Zeilen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Kriterien und Gewichtungsfaktoren in einem Workshop und unter Berücksichtigung der

erstellten Unfallstatistik erstellt. Die Teilnehmer kamen aus den Bereichen Entwicklung Fahrwerk, Projektleitung Fahrwerk, Projektleitung Gesamtfahrzeug sowie die funktionale Sicherheit. Bei der Durchführung der eigentlichen Nutzwertanalyse ist es sinnvoll, dass die Teilnehmer, die in dem Workshop zur Erstellung der Kriterien dabei sind, partizipieren. Dabei bietet es sich an, dass jeder die Kriterien mit seinem eigenen Gewichtungsfaktor bewertet, sodass aus den einzelnen Bewertungen ein Durchschnitt für die Gesamtbewertung resultieren kann. Die Summe der Gewichtungsfaktoren aller zu bewertenden Kriterien ergibt 100 %. Im Anschluss an die Gewichtung wird die eigentliche Bewertung vorgenommen. Dabei werden für jedes Kriterium und jede Alternative Punkte vergeben. Die höchstmögliche Zahl zur Bewertung sind zehn Punkte. Nach der Verteilung der Punkte erfolgt die Berechnung des Nutzwerts der einzelnen Handlungsalternativen. Die Handlungsalternative mit der höchsten Anzahl an Punkten schließt in der Bewertung am besten ab und wird zur Verwendung im Verlauf der weiteren Ausarbeitung herangezogen (Hofmann, 2020).

Kriterium aus SitKat	Gewichtung in %	Eingriff Längsführung - Beschleunigen		Eingriff Längsführung - Bremsen		Eingriff in Querführung - Überholen		Eingriff in Querführung - dynamische Kurvenfahrt	
		Bewertung	Nutzen	Bewertung	Nutzen	Bewertung	Nutzen	Bewertung	Nutzen
Fahrt innerorts Stop and Go	5%	1	0,05	5	0,25	0	0	0	0
Fahrt in 30 km/h Zone	10%	2	0,2	5	0,5	0	0	0	0
Fahrt in 50 km/h Zone	10%	2	0,2	5	0,5	0	0	0	0
Fahrt auf Landstraße 100 km/h	18%	5	0,875	8	1,4	2	0,35	5	0,875
Fahrt auf Landstraße 80 km/h	18%	4	0,7	7	1,225	1	0,175	4	0,7
Autobahn Stop and Go	5%	2	0,1	8	0,4	0	0	0	0
Autobahn bis 130 km/h	30%	6	1,8	10	3	5	1,5	1	0,3
Autobahn >130 km/h	5%	2	0,1	5	0,25	2	0,1	1	0,05
Nutzwert	100%	4,025		7,525		2,125		1,925	
Rangliste		2		1		3		4	

Tabelle 4.4: Nutzwertanalyse aus SitKat

Wie anhand der Nutzwerttabelle zu sehen ist, ist die Fahrt auf der Autobahn am höchsten gewichtet. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf die automatisierte Fahrt auf der Autobahn fokussiert. Bei Anwendung des SitKat werden auf dieser Basis bei einer Geschwindigkeit von bis zu 130 km/h gezielte Manöver durchfahren und die Reaktion des Fahrzeuges aufgezeichnet. Damit der Einfluss der Umweltbedingungen Hitze, Kälte, Regen und Schnee sichtbar wird, werden die Manöver in den jeweiligen Situationen durchfahren. Des Weiteren werden

Fehlfunktionen wie zum Beispiel ein defekter Nässe sensor simuliert und die Reaktion des Fahrzeugs beobachtet.

### 4.3 Reibwertinformation für die dynamische Längsregelung

Aus der Nutzwertanalyse und der Use Case Betrachtung wurde deutlich, dass sich die Information über den vorliegenden Reibwert im ersten Schritt und vor allem für die dynamische Längsregelung anbietet. Betrachten wir heutige Systeme, die bei der dynamischen Längsführung unterstützen, wird ersichtlich, dass diese für die Nutzung auf trockenen Fahrbahnen ausgelegt sind. Ein Beispiel hierfür ist das nach dem ISO15622 Standard benannte ACC. Dieses regelt nach der Eingabe einer Zielgeschwindigkeit den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug durch aktive Brems- und Fahrpedaleingriffe. Gemäß der SAE Klassifizierung ist das ACC als Level 2 System eingestuft. Nach der Aktivierung wird das Fahrzeugumfeld meist mittels Radars <sup>14</sup> gescannt. Wird ein langsames Fahrzeug detektiert, so wird die Zielgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug so reduziert, dass über eine konstante Zeitlücke <sup>15</sup> der eingestellte Abstand angepasst wird. Erkennt das System, dass der Fahrkorridor wieder frei ist oder das vorausfahrende Fahrzeug beschleunigt, wird das Egofahrzeug die Geschwindigkeit wieder auf die eingestellte Zielgeschwindigkeit einregeln. Der Beschleunigungs- und Bremsgradient ist gemäß ISO15622 mit  $a_{min} = -3,5 \text{ m/s}^2$  bis  $a_{max} = 2,5 \text{ m/s}^2$  definiert. Da das ACC eine vernetzte Funktion mit vielen Wirkketten ist, wird das Funktionsprinzip in Abbildung 4.4 erläutert.

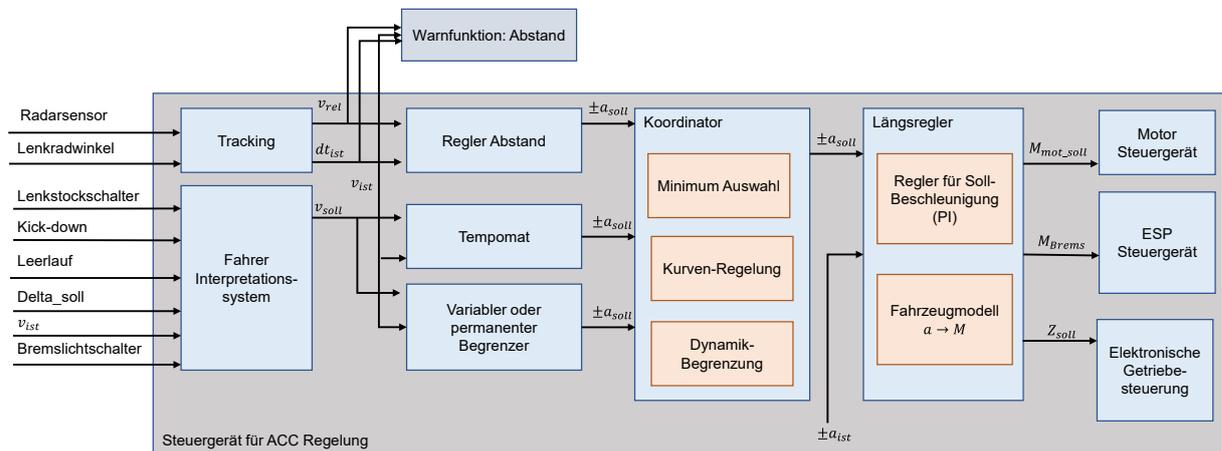


Abbildung 4.4: Funktionsprinzip Umsetzung in Steuergerät ACC (Winner, et al., 2021)

<sup>14</sup> Im Premiumsegment werden Long Range Radar Systeme mit Reichweiten bis zu 250 Meter verwendet.

<sup>15</sup> Typisch sind ein bis zwei Sekunden.

Aus der Grafik ist zu entnehmen, dass keine Information des vorliegenden Reibwerts in die Berechnung des Abstandes oder der maximalen Verzögerung eingeht. Betrachtet man rechnerisch die Verzögerungstrecken bei maximaler Bremsbeschleunigung, ergeben sich folgende Werte.

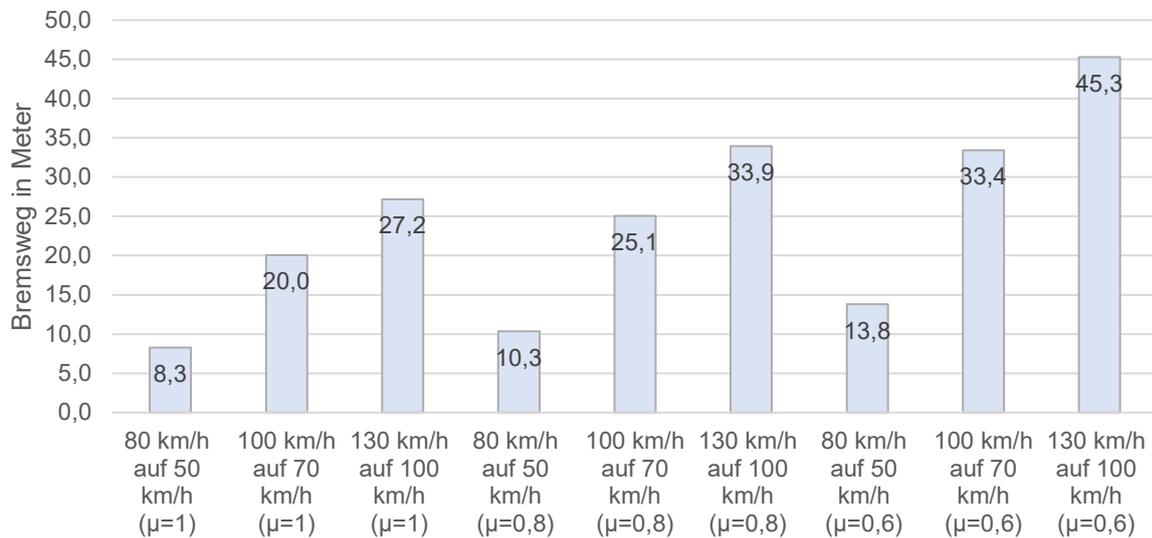


Abbildung 4.5: Bremsweg bei unterschiedlichen Reibwerten

Anhand der Darstellung wird deutlich, dass sich die Bremswege aufgrund von unterschiedlichen Reibwerten deutlich differenzieren. Das heißt für kommende Systeme wie zum Beispiel den Autobahnpielen ist es unabdingbar, die Reibwertinformation in der Regelung zu berücksichtigen. Als Reaktion kann das System in zwei Richtungen optimiert werden. Erstens kann der Abstand bei sinkendem Reibwert vergrößert werden und zweitens kann die Verzögerung bis zu einem gewissen Punkt gesteigert werden. Damit die konkrete Beschreibung des vorliegenden Reibwerts vereinfacht werden kann, wird im nächsten Teilkapitel eine Metrik zur Klassifizierung gebildet.

#### 4.4 Äquivalenzklassen der Reibwertschätzung

Der Mensch, wie auch ein System, muss für die korrekte Bewertung des vorliegenden Reibwerts eine Metrik als Referenz verwenden. Nach (Feilhauer, 2018) kann die Qualität einer Schätzung auf der Grundlage von Äquivalenzklassen sichergestellt werden. Diese Klassen beschreiben den Bereich eines Parameters, in dem sich die Schätzung des Systems identisch zu den Testkriterien verhält. In der Literatur werden die Bereiche für die Reibwertschätzung in drei Klassen –  $\mu \in \{\text{niedrig, mittel, hoch}\}$  – unterteilt. Aufgrund dieser Einschränkung bzw. Diskretisierung der möglichen Zustände wird Genauigkeit verloren gehen. Das bedeutet, dass für die Sicherheitsbetrachtung und Einschätzung der jeweiligen Klassen immer vom schlechtesten Reibwert in der jeweiligen Klasse ausgegangen werden muss. Zur Bewertung dieses

Vorgehens bildet Abbildung 4.5 die Grundlage. Dabei werden die genannten Äquivalenzklassen abgebildet und der Schätzwert wird mit dem tatsächlichen Wert verglichen.

Dabei wird zwischen zwei Fehlerklassen mit drei Ausprägungen differenziert:

- Kritischer Fehler (KF) sind Schätzfehler, bei denen der reale Reibwert niedriger ist als der geschätzte Wert.
- Störender Fehler (SF) sind Schätzfehler, bei denen der reale Reibwert höher ist als der geschätzte Wert.

		Reibwert gemessen (Realität)		
		hoch	mittel	niedrig
Schätzung	hoch	-	KF 1. Art	KF 3. Art
	mittel	SF 1. Art	-	KF 2. Art
	niedrig	SF 3. Art	SF 2. Art	-

Tabelle 4.5: Matrix: kritische Fehler und störende Fehler in Bezug auf die Reibwertschätzung

Damit die quantitative Bewertung einer Schätzung erfolgen kann, muss vorab eine qualitative Definition der einzelnen Äquivalenzklassen vorgenommen werden. Dazu wird folgende Klassifizierung vorgeschlagen:

$$\text{niedrig} \in [0; 0,6)$$

$$\text{mittel} \in [0,6; 0,9)$$

$$\text{hoch} \in [0,9; \infty)$$

Diese werden in der vorliegenden Arbeit mittels Fahrversuchen und des Validierungskonzepts abgeglichen und gegebenenfalls optimiert. Daraus resultiert, dass die Fehler

1. Art mit einer Fehlereinschätzung  $\leq 0,15$ ,
2. Art mit einer Fehleinschätzung zwischen  $\geq 0,15 \leq 0,3$  und
3. Art mit  $> 0,3$  verbunden sind.

Dies bedeutet für die Funktionsbeschreibung und deren Verfügbarkeit, dass die Längsregelung fehlerfrei bei Reibwerten  $\geq 0,6$  erfolgen muss. Kritische Fehler bei der Längsführung und vor allem bei höheren Geschwindigkeiten stellen ein inakzeptables Risiko dar.

### 4.4.1 Sicherer Abstand

Da die Konsequenzen einer fehlerhaften Reibwertschätzung bei einer Notsituation unmittelbaren Einfluss auf die Sicherheit der Insassen haben, wird dies im Folgenden beleuchtet. Systeme zur Längsregelung wie das heutige Adaptive Cruise Control (ACC) sind so appliziert, dass der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sicher und gleichzeitig nicht übermäßig groß ist.

Damit der sichere Abstand berechnet werden kann, müssen vorab die grundlegenden Wirkketten der einzelnen Vorgänge erläutert werden. Während des Bremsens oder Beschleunigens wirken auf den Reifen verschiedene Längs- und Seitenführungskräfte, die mit der Hilfe des Kamm'schen Reibkreises beschrieben werden können. In der Abbildung 4.6 wird das maximale Kraftschlusspotenzial als Produkt aus Reibwert und Aufstandskraft dargestellt.

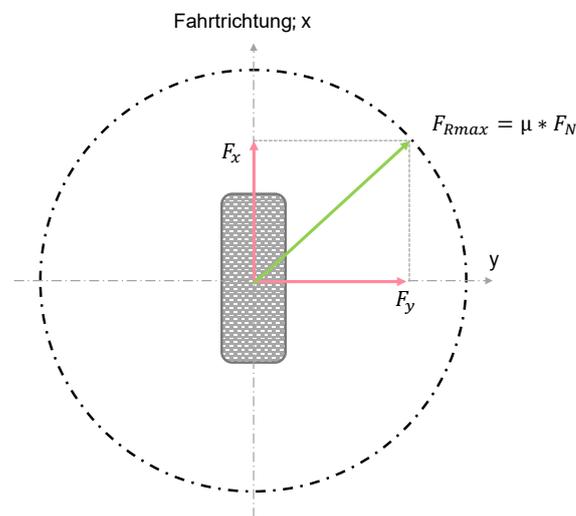


Abbildung 4.6: Darstellung des Kamm'schen Reibkreises

Aus der Superposition von Längs- und Querkräften ergibt sich der tatsächlich vorliegende Kraftschluss. Daraus folgt, dass die Quer- und Längsführung gekoppelt betrachtet werden müssen und der Reibwert als Umhüllende für den fahrdynamischen Grenzbereich anzusehen ist. Der Kamm'sche Kreis beruht auf der Annahme des isotropen Reifenverhaltens und stellt eine Idealisierung des realen Zusammenhangs dar.

Die Messungen unter Realbedingungen zeigen, dass in Längsrichtung höhere Reibungskräfte als in Querrichtung übertragen werden können und daher der Kamm'sche Reibkreis real eine elliptische Form aufweist (Unterreiner, 2013).

Mit der Verbindung des Satzes von Pythagoras und der Coulomb'schen Reibung ergibt sich die Gleichung (30). Mit ihrer Anwendung ist es möglich, näherungsweise den lokalen maximalen Reibwert zu berechnen (Schramm, et al., 2018).

$$\mu_{Used_{max}} * F_N \leq \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (30)$$

Bei der Anwendung muss berücksichtigt werden, dass der berechnete Wert ausschließlich den situativ ausgenutzten Reibwert ausgibt. Das eigentliche Reibwertpotenzial könnte in der jeweiligen Fahrsituation größer sein (Wiedemann, et al., 2001) (Unterreiner, 2013).

Da im weiteren Verlauf der Arbeit Fahrten auf Autobahnen priorisiert betrachtet werden, werden die Effekte der Querdynamik vernachlässigt und mit Kraftschlusspotenzial die übertragbaren Kräfte in Fahrzeuginnenrichtung bezeichnet. Bezogen auf die Längsdynamik gehören der Anhalteweg und der Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern oder Hindernissen zu den ausschlaggebenden Größen, wenn es um die Sicherheit der Fahrzeuginsassen geht. Der Anhalteweg ergibt sich aus der Addition aus dem Bremsweg und dem Weg, den das Fahrzeug während der Reaktionszeit zurücklegt. Die Reaktionszeit ist abhängig vom jeweiligen Fahrer, der Bremsweg von der Bremsstrategie und der maximal möglichen Verzögerung des Fahrzeugs. Hierbei ist die Verzögerung eine Resultierende aus der Auslegung des Bremssystems und dem vorliegenden Reibwert. In der weiteren Betrachtung wird die Auslegung des Bremssystems so berücksichtigt, dass bei einer Vollbremsung an allen vier Rädern das maximale Kraftschlusspotenzial ausgenutzt wird.

Der Bremsweg lässt sich aus der Energieerhaltung ableiten. Dabei wird während des Verzögerungsvorgangs die kinetische Energie in thermische Reibenergie umgewandelt. So lässt sich der Bremsweg bei einer Verzögerung von einer definierten Ausgangsgeschwindigkeit  $v_0$  auf eine Zielgeschwindigkeit  $v_1$  unter Berücksichtigung des Reibwerts ermitteln:

$$s_B = \frac{v_0^2 - v_1^2}{2 \cdot g \cdot \mu_B} \quad (31)$$

Beispielhaft wird in Abbildung 4.7 unter Berücksichtigung verschiedener Reibwerte der Bremsweg bei unterschiedlichen Ausgangsgeschwindigkeiten und Reibwerten aufgezeigt.

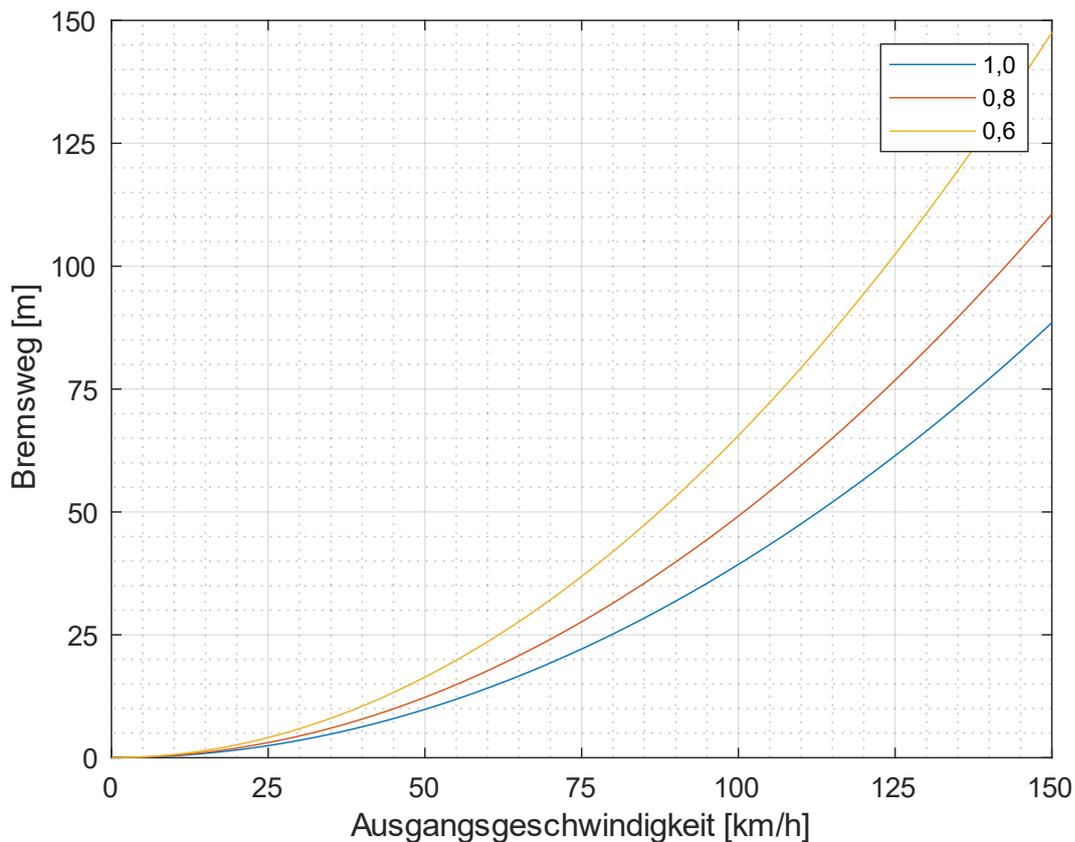


Abbildung 4.7: Vollbremsung, Sensitivität Reibwert – Bremsweg über Geschwindigkeit

Abbildung 4.7 macht deutlich, dass der Einfluss des Reibwerts vor allem bei höheren Geschwindigkeiten maßgeblich darüber entscheiden kann, ob es zu einer Kollision kommt. Da in der aktuellen Literatur häufig Ausweichen oder Bremsen als Varianten der Gefahrenabwehr aufgeführt werden, wird nachfolgend kurz auf die Sensitivität eines Ausweichmanövers eingegangen.

Der letzte mögliche Zeitpunkt zum Ausweichen wird in den Fachmedien auch „Last Point To Steer (LPTS)“ und der letzte Bremszeitpunkt „Last Point To Brake“ (LPTB) genannt. Fährt man auf der Autobahn mit 120 km/h auf der rechten Fahrspur und es tritt ein unvorhergesehenes Ereignis auf, sodass eine Vollbremsung nicht mehr ausreichend ist, besteht die Möglichkeit, ein gezieltes Ausweichmanöver durchzuführen (Lex, et al., 2016). Der minimale Abstand für Ausweichmanövers kann nach (Eckert, et al., 2011) mit folgender Gleichung berechnet werden.

$$S_{LPTS} = \sqrt{\frac{2s_y * r_k}{v^2 * \mu}} * v_{rel} \quad (32)$$

Beim Vergleich der Gleichungen zum Bremsweg und Ausweichen wird deutlich, dass der letzte Zeitpunkt für ein Ausweichmanöver später als bei einer Vollverzögerung ist. Zum Beispiel bei plötzlichem Starkregen ( $\mu \sim 0,6$ ) und einer Geschwindigkeit von 120 km/h ergeben sich folgende Werte:

- „Last Point To Brake“: 120 Meter und
- „Last Point To Steer“: 45 Meter.

Allerdings ist gemäß der UN-R 79 (UNECE, 2017) die Integration eines automatischen Ausweichens über 10 km/h nicht zulässig.

Aktuelle Assistenzsysteme wie ACC werden nach einem reaktiven Ansatz zur Kollisionsvermeidung entwickelt. Dabei läuft die Regelstrategie beim Auffahren auf das vorausfahrende Fahrzeug wie folgt ab:

Der Fahrer bestimmt einen Abstand, der indirekt durch die Zeit bis zur Kollision (TTC<sup>16</sup>) beschrieben wird. Unterschreitet das Fahrzeug diesen Abstand, verzögert es innerhalb der vorgegebenen Grenzwerte. Diese sind in der (ISO 15622) für ACC festgelegt und in Abbildung 4.8 dargestellt.

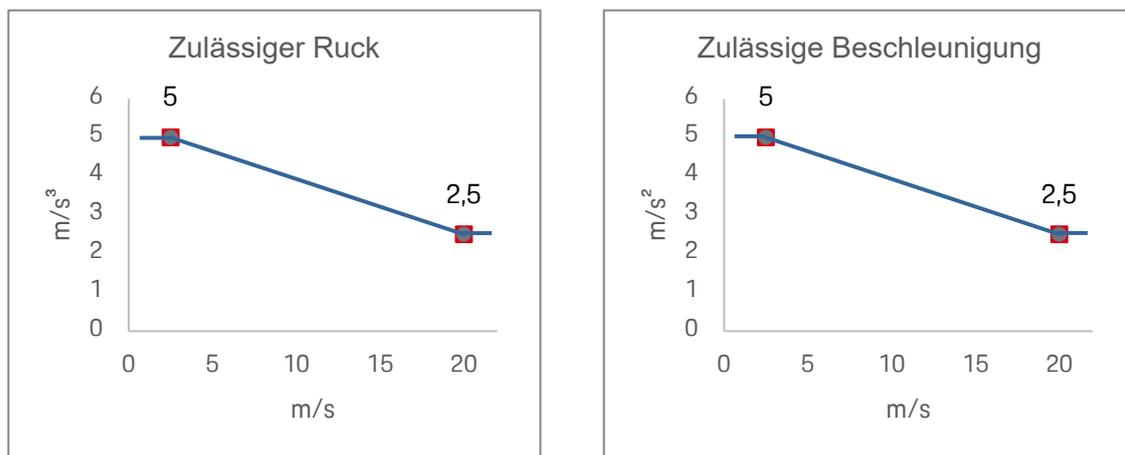


Abbildung 4.8: Zulässige Verzögerung ACC nach ISO 15622

Vor allem bei Geschwindigkeiten von über 70 km/h ist die maximal erlaubte Verzögerung zu gering, um die Geschwindigkeitsdifferenz so zu verringern, dass die kritische TTC nicht unter-

<sup>16</sup> Time to Collision, TTC = Quotient aus Abstand und Relativgeschwindigkeit

schritten wird. Als Reaktion wird der Fahrer über ein akustisches Signal gewarnt. Kommt weiterhin keine Reaktion vom Fahrer, wird eine automatische Notbremsung eingeleitet. Diese verzögert in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zwischen  $4 \text{ m/s}^2$  und  $6 \text{ m/s}^2$ . Durch diese aufeinander folgenden Funktions- und Warnkonzepte erfolgt der automatisierte Bremseneingriff relativ spät. Der Grund für diese Strategie ist die Vermeidung von Falschauslösungen (ISO 22839, 2013).

Der sichere Abstand ist dann gegeben, wenn der Abstand zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug so groß ist, dass beide unter Anwendung der Bremsstrategie  $B_{ego}$  und  $B_{vor}$  nicht kollidieren. Kommt es zu dem Zeitpunkt  $t_0 = 0$  zu einer Unterschreitung des sicheren Abstandes, ist der Ausgangszustand durch  $v_0, a_0$  für das Ego-Fahrzeug und  $v_v, a_v$  für das vorausfahrende Fahrzeug definiert. Verzögert das vorausfahrende Fahrzeug maximal und der Sicherheitsabstand wird unterschritten, kommt es zu einer Kollision (siehe Abbildung 4.9).

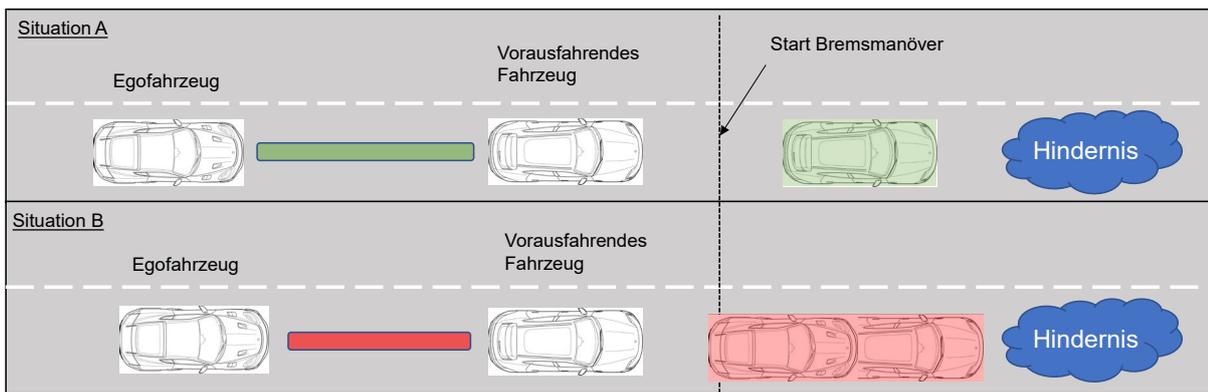


Abbildung 4.9: Sicherer Abstand (A) und unsicherer Abstand (B)

Unter Berücksichtigung der Zeit  $T$  bis zu dem Erreichen des maximalen Kraftschlusspotenzials, der Zeit bis zum Stillstand und der Bremszeit  $T_B$ , gelten folgende drei Bereiche  $t_I \in [0, T)$ ,  $t_{II} \in [T, T_b)$ ,  $t_{III} \in [T_b, \infty)$  für den zeitlichen Verlauf der Längsbeschleunigung.

$$a_x(t) = \begin{cases} a_I = a_0 - j_{max}t \\ a_{II} = a_{ego,min} \\ a_{III} = 0 \end{cases} \quad (33)$$

In Anbetracht der Geschwindigkeit und des zurückgelegten Wegs ergibt sich durch die Integration folgender Zusammenhang.

$$v_x(t) = \begin{cases} v_I = v_0 + a_0 t - \frac{1}{2} j_{max} t^2 \\ v_{II} = v_I(T) + a_0 T - \frac{1}{2} j_{max} T^2 - (t - T) \cdot a_{ego,min} \\ v_{III} = 0 \end{cases} \quad (34)$$

$$x(t) = \begin{cases} x_I = v_0 t + \frac{1}{2} a_0 t^2 - \frac{1}{6} j_{max} t^3 \\ x_{II} = x_I(T) + v_I(T)(t - T) - \frac{a_{ego,min}}{2} \cdot (t - T)^2 \\ x_{III} = x_B \end{cases} \quad (35)$$

Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 4.10 der zeitliche Ablauf einer ACC-Verzögerung aus 130 km/h dargestellt. Der maximale Ruck beträgt 3,5 m/s<sup>3</sup>, bei einer maximalen Verzögerung von 8 m/s<sup>2</sup>. Die gestrichelte Linie zeigt dabei die Verzögerung ohne eine Beschränkung auf.

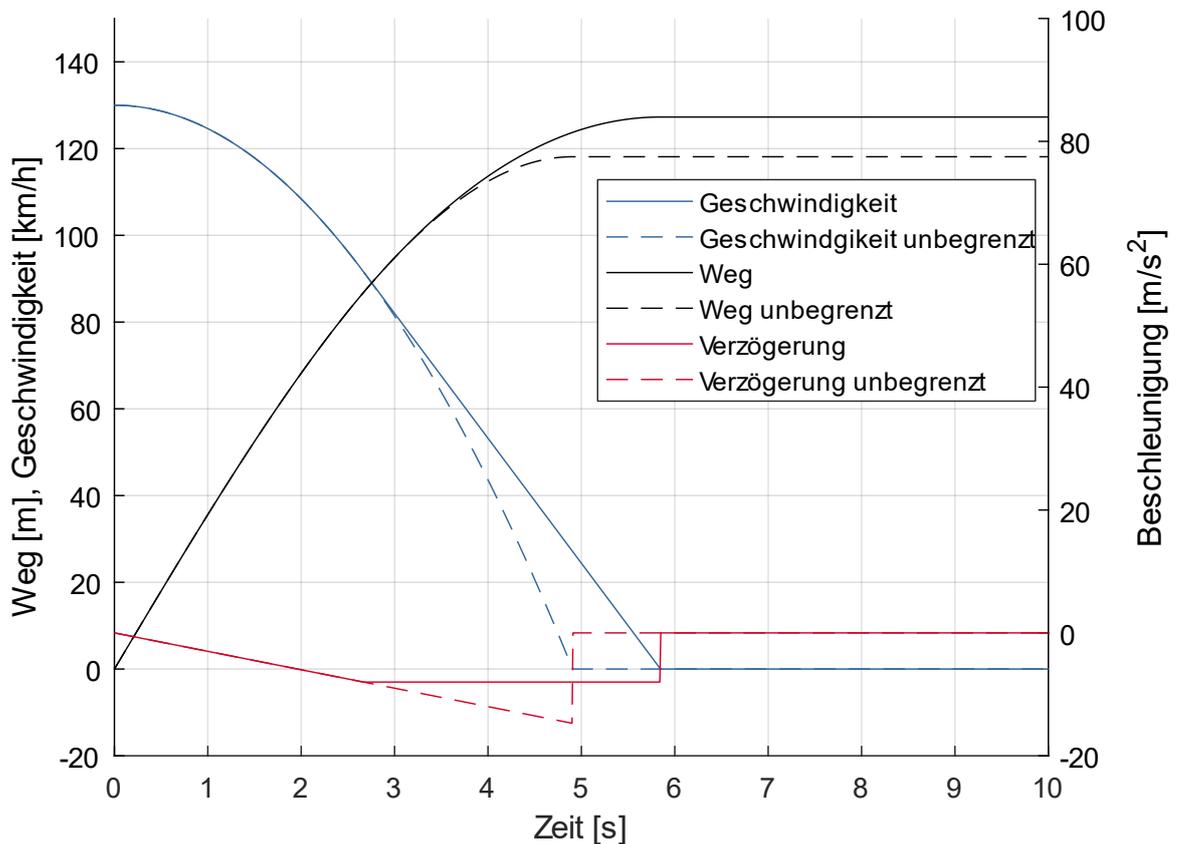


Abbildung 4.10: ACC-Bremsverlauf aus 130 km/h bei konstantem Ruck und max. Reibwert 0,8

Aus dem Verlauf der Verzögerung stellt sich die Frage nach dem sicheren Abstand zwischen Ego-Fahrzeug und vorausfahrendem Fahrzeug. Grundsätzlich kann der sichere Abstand aus der Differenz des Bremsweges berechnet werden. Da das Bremssystem eine notwendige Verzögerung sofort einleiten kann, wird die Reaktionszeit des Fahrers vernachlässigt. Daraus folgt für den Bremsweg aus  $v_{ego}(T_b) = 0$

$$x_{B,ego} = \left[ v_0 T + \frac{1}{2} a_0 T^2 + \frac{1}{6} j_{max} T^3 \right] + \frac{\left( v_0 + a_0 T + \frac{1}{2} j_{max} T^2 \right)^2}{2 |a_{min,brake}|} \quad (36)$$

und somit für den sicheren Abstand

$$d_{sicher} = x_{ego,b}(T_b) - \frac{v_f^2}{2 |a_{v,max}|}. \quad (37)$$

Bei Unterschreitung dieses Abstandes wird vom Ego-Fahrzeug eine dreistufige Bremsstrategie abgefahren:

1. Bremsen, bis der Abstand wieder sicher ist,
2. Bremsen bis zum Stillstand und
3. das System wird vom Fahrer deaktiviert.

Durch diese Verzögerungsstrategie von  $B_{ego}$  und  $B_{vor}$  kann sichergestellt werden, dass unter idealen Umweltbedingungen eine Kollision vermieden wird.

Somit sind die maßgeblichen Größen  $a_{ego,max}$ ,  $a_{v,max}$  und  $j_{max}$  für den kleinstmöglichen Abstand nach vorne verantwortlich. Für die Berechnung wird die maximale Geschwindigkeit von 130 km/h angenommen. Als Begrenzende für den maximalen Bremsdruck  $j_{max}$  wird der Fahrkomfort herangezogen. Dies stellt eine eigene Forschungsfrage dar, die im Rahmen dieser Arbeit nicht beleuchtet wird. Aufgrund mehrerer Versuchsfahrten und Gespräche mit Experten wird in der Anwendung für diese Arbeit ein maximaler Ruck in Höhe von 3,5 m/s<sup>3</sup> angenommen. Des Weiteren wird die maximal mögliche negative Beschleunigung des Ego-Fahrzeuges gleichgesetzt zu den weiteren Verkehrsteilnehmern im direkten Umfeld. Somit gilt  $a_{ego,max} = a_{v,max}$ . Das bedeutet, dass die maximale Verzögerung des Ego-Fahrzeuges vom maximalen Reibwert abhängt. Sichtbar wird der Einfluss des Reibwerts in Abbildung 4.11. Bereits bei einem Bremsmanöver von 130 km/h und einer Reibwertdifferenz von 0,6 auf 0,8 liegen knapp 20 m Bremswegdifferenz vor. Zeitlich ausgedrückt kommt das Fahrzeug bei einem Reibwert von 0,8 nach 5,8 s zum Stehen. Bei identischem Manöver mit einem Reibwert von 0,6 fährt das Fahrzeug zum Zeitpunkt  $T = 5,8$  s noch 32 km/h schnell. Als Worst-Case-Betrachtung können diese Erkenntnisse für Szenarien wie beispielsweise das Auffahren auf ein Stauende mit  $v_0 = 130$  km/h übertragen werden.

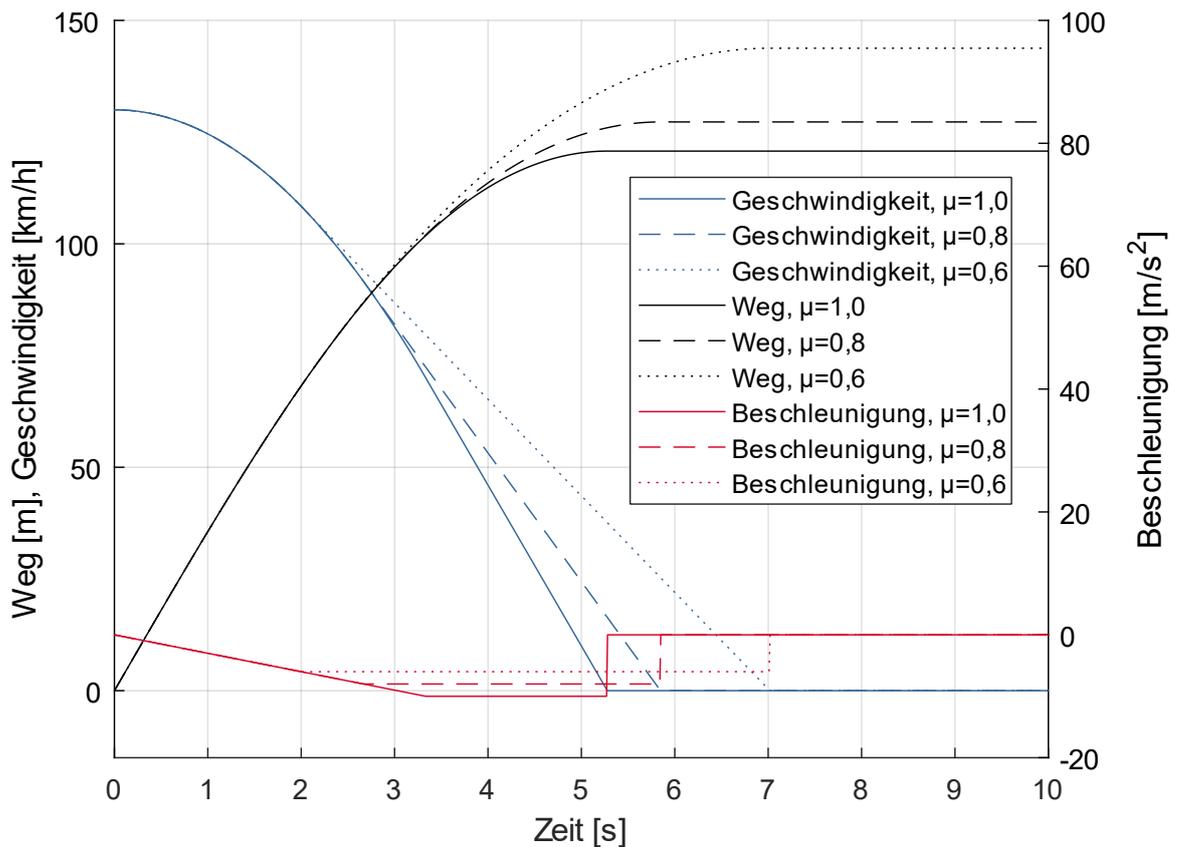


Abbildung 4.11: Bremskinematik des Ego-Fahrzeugs aus 130 km/h für verschiedene Reibwerte

In Abbildung 4.12 sind die notwendigen Abstände bei anliegender Ausgangsgeschwindigkeit für das Ego-Fahrzeug und verschiedenen Reibwerten dargestellt. Als Vergleich dazu dienen die Faustformel für den Abstand „halber Tacho“ und der Abstand bei TTC gleich zwei Sekunden. Dabei wird auf der y-Achse der Folgeabstand für  $\Delta v = 0$  abgebildet. Alle anderen Darstellungen sind Abstände zu langsameren vorausfahrenden Objekten. Die Bremsung wird dabei immer vom Ego-Fahrzeug eingeleitet. Hierbei wird sichtbar, dass bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten und geringen Reibwerten die Bremsung später erfolgt, was daraus resultiert, dass das vorausfahrende Fahrzeug stärker vom niedrigen Reibwert betroffen ist. So erfolgt die Vollbremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs sofort mit dem niedrigen Reibwert. Die Bremsung des Ego-Fahrzeugs wird erst beim Erreichen des maximalen Kraftschlusspotenzials davon beeinflusst.

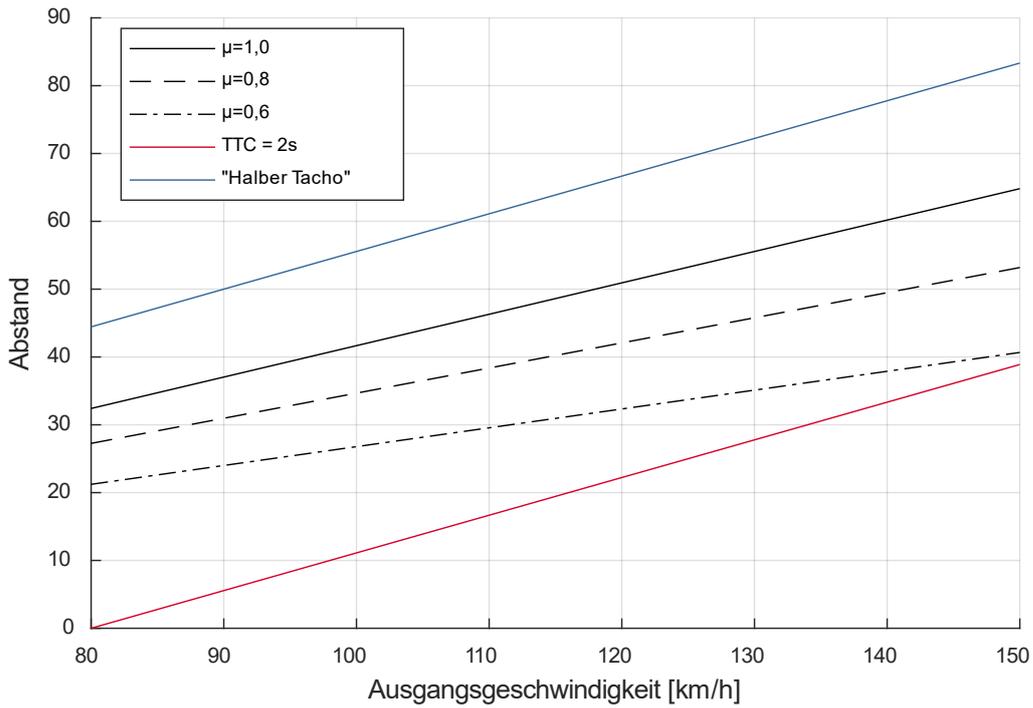


Abbildung 4.12: Sichere Abstände für das Auffahren auf bremsenden LKW (80 km/h) über die Ausgangsgeschwindigkeit

Der oben beschriebene Effekt spielt bei der Auffahrt auf ein stehendes Hindernis keine Rolle mehr. In Abbildung 4.13 ist die große Differenz bei Reibwertsprung von 0,6 auf 0,9 im Vergleich zu 0,9 zu 1,2 dargestellt.

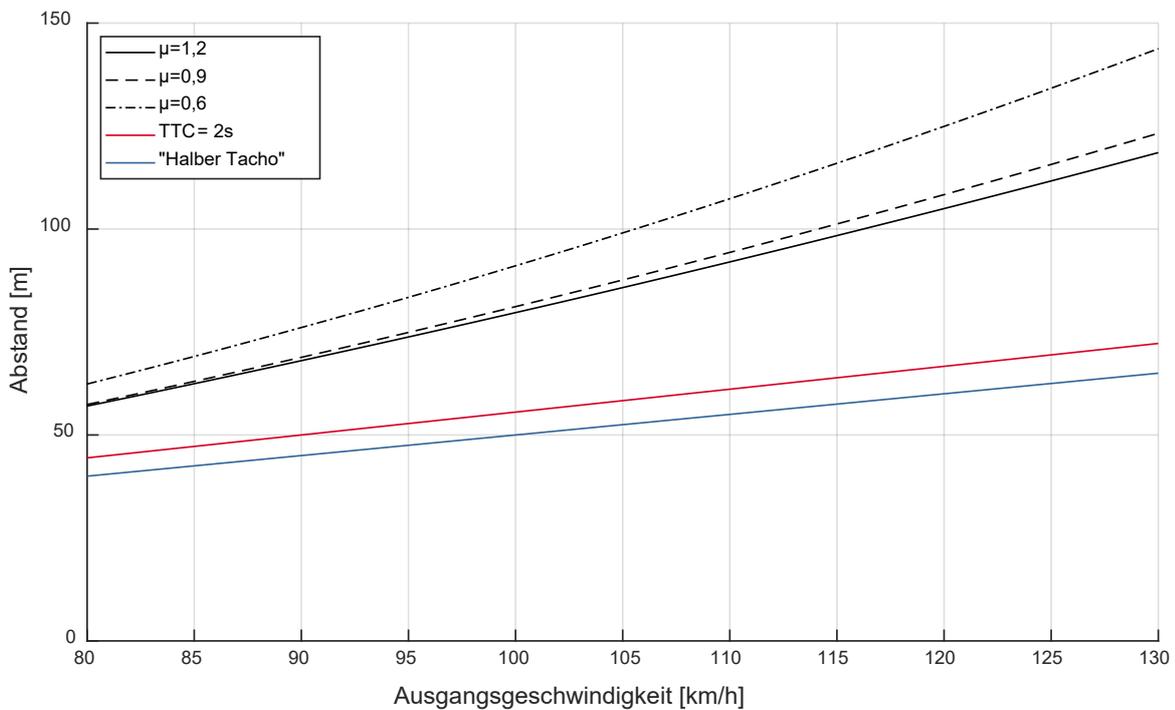


Abbildung 4.13: Sichere Abstände für das Auffahren auf stationäres Hindernis über die Ausgangsgeschwindigkeit

## 4.5 Sicherheitsanforderungen

In der Automobilindustrie wird unter dem Begriff „Sicherheit“ im Allgemeinen die Vermeidung von Risiken im inakzeptablen Bereich verstanden. Dies bedeutet, dass bei der Nutzung eines Fahrzeuges das damit verbundene Risiko für die Insassen und die anderen Verkehrsteilnehmer auf einem akzeptierten Niveau liegt. Bei dieser Betrachtung stehen vor allem die Verletzungsgefahr und die damit zusammenhängende Schadensschwere im Vordergrund. Damit dieses Risiko vermieden oder reduziert wird, gibt es aktive und passive Sicherheitssysteme. Die aktiven Systeme dienen zur Vermeidung von Unfällen, die passiven zur Reduktion der Folgen eines Unfalls. Die Optimierung von Fahrzeugfunktionen, wie im vorliegenden Fall, lässt sich bei den aktiven E/E-Systemen einordnen. Technisch betrachtet lassen sich diese Systeme unabhängig von der Technologie in drei Schwerpunkte untergliedern:

1. Die Funktionale Sicherheit (FuSi) hängt von einer spezifikationsgerechten Funktion aller sicherheitsrelevanten E/E-Systeme ab. Zur Reduktion von möglichen Fehlfunktionen werden Methoden eingesetzt, die das Risiko auf ein akzeptables Niveau setzen. Dieses Vorgehen ist in der (ISO 26262, 2011) beschrieben und wird im Folgenden näher erläutert.
2. Die Sollfunktionssicherheit bezieht sich auf den bestimmungsgerechten und den vorhersehbaren Fehlgebrauch von einem System. Der vorsätzliche Fehlgebrauch wird hierbei nicht betrachtet. Beschrieben wird die Sicherheit der Sollfunktion in der (ISO/PAS 21448, 2019).
3. Die Angriffssicherheit wird auch „Security“/„Cybersecurity“ genannt. Dies beschreibt die Verhinderung von Manipulationen einer Sicherheitsfunktion. Im Fokus hierbei steht die Verhinderung von externen „Angriffen“ auf Sicherheitsfunktionen und von externem Einfluss auf gezieltes Systemverhalten. Beschrieben wird dieses Vorgehen in Tabelle 4.6.

Unter Berücksichtigung der normativen und rechtlichen Vorgaben können aus den genannten Schwerpunkten Anforderungen an eine Funktion oder ein Produkt als Gesamtsystem definiert werden. Dabei werden mit dem Top-down-Ansatz die Anforderungen an Funktion und Architektur abgeleitet. Diese existieren nach heutigem Stand der Technik für Advanced Driver Assistance Systems (ADAS<sup>17</sup>). Für HAF-Systeme ab SAE Stufe 3 sind in Tabelle 4.6. erste Publikationen zu den Anforderungen aufgeführt.

Quelle des Risikos	Auslöser des gefährlichen Ereignisses	Internationaler Standard / EU-Gesetz
<b>System</b>	E/E-Systemfehler	ISO 26262
	Performanceeinschränkung oder unzureichende Umgebungswahrnehmung mit oder ohne vorhersehbaren Fehlgebrauch	ISO 21448
	Vorhersehbarer Fehlgebrauch Unzureichende HMI	ISO 21448, ISO 26262, <a href="#">Empfehlung der EU-Kommission über sichere und effiziente bordeigene Informationssysteme, Verordnung (EU) 2018/661</a> <sup>18</sup>
	Gefahren durch Systemtechnologie	Technologiespezifische Standards, <a href="#">UN/ECE-Regelungen, Verordnung (EU) 2018/661</a>
<b>Externer Faktor</b>	Erfolgreicher Angriff auf das Fahrzeug	ISO/SAE 21434, ISO/IEC 27001 SAE J3016, <a href="#">UN/ECE-Regelungen</a> <sup>19</sup> , <a href="#">Verordnung (EU) 2018/661</a>
	Auswirkungen von aktiver Verkehrsinfrastruktur und/oder C2X-Kommunikation	ISO 20077 ISO 26262
	Sonstige Auswirkungen aus der Fahrzeugumgebung (andere Verkehrsteilnehmer, Umgebungsbedingungen, elektromagnetische Interferenz ...)	ISO 21448 ISO 26262

Tabelle 4.6: Normative und rechtliche (blau) Vorgaben für automobiler Sicherheitssysteme nach Ursprung des Sicherheitsrisikos

<sup>17</sup> Advanced Driver Assistance Systems (eng. für Fahrerassistenzsysteme)

<sup>18</sup> Bisher nur als Entwurf, geplanter Einsatz 2022, aktuell gültig: 2009/661 European Commission 2019.

<sup>19</sup> Bisher nur als Entwurf, geplanter Einsatz 2020, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) 2018.

### 4.5.1 Funktionale Sicherheit

Die Steigerung der Komplexität und die Zunahme an mechatronischen Systemen haben zur Folge, dass sich das Risiko des Eintretens von statistischen und systematischen Fehlern erhöht. Zur Vermeidung dieser Risiken und zu deren frühzeitiger Erkennung im Entwicklungsprozess werden verschiedene Qualitätsmanagementmethoden diskutiert, die zum Beispiel in (VDA, 2008) und (Borgeest, 2008) nachgeschlagen werden können. Eine der bekanntesten Methoden ist die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA). Die FMEA wird von vielen verschiedenen Richtlinien und Normen für die Entwicklung von mechatronischen Systemen empfohlen (DGQ, 2012). Bei der Anwendung ist das Ziel, das Gesamtsystem zu analysieren und dabei mögliche Fehlerarten, deren Ursache und Auswirkungen aufzuzeigen. Außerdem wird empfohlen, parallel zur FMEA eine Gefahren- und Risikoanalyse (G&R) durchzuführen. Mit dem Vorliegen beider Analysen lässt sich eine Klassifizierung des Gesamtrisikos für das jeweilige System darstellen. Zur Durchführung der Risikoklassifizierung kann die Richtlinie *ISO 26262*, die aus *DIN EN 61508* abgeleitet wurde, herangezogen werden. Beide befassen sich mit der Funktionssicherheit mechatronischer Systeme in der Fahrzeugtechnik. Da diese in der vorliegenden Arbeit einen Teilbeitrag leistet, wird im Folgenden die *ISO 26262* näher erläutert (ISO 26262, 2011) (DIN EN 61508, 2010).

Die Richtlinie *ISO 26262* wird in fünf Risikoklassen unterteilt, die auch unter Automotive-Safety-Integrity-Level (ASIL) bekannt sind. Die geringste Risikoklasse ist QM (Qualitätsmanagement), es folgen A, B, C sowie die höchste Klasse D. Die einzelnen Klassen beschreiben einen jeweiligen Absicherungsgrad des Systems, der entwickelt und eingehalten werden muss. Zur Einteilung eines Systems in die jeweilige Klasse wird es aufgrund von Indikatoren bewertet. Diese sind: erstens der Schweregrad, aufgrund eines möglichen Systemfehlers (Severity), zweitens die Eintrittswahrscheinlichkeit der Fahrsituation (Probability of Exposure) und drittens die Fahrzeugbeherrschbarkeit durch den Fahrer, bei Eintreten des Fehlers (Controllability). Bevor die jeweiligen Indikatoren beschrieben werden, wird der Begriff „Fehlfunktion“ erläutert.

## Bestimmung von Fehlfunktionen

Damit der Begriff „Fehlfunktion“ eindeutig verwendet wird und es bei der Nutzung keine Missverständnisse gibt, wird im kommenden Abschnitt die nicht situationsgerechte Ausführung einer Funktion beschrieben. Grundsätzlich lassen sich Fehlfunktionen in „*falsch positiv*“ und „*falsch negativ*“ aufteilen.

- Falsch positiv bedeutet: Eine Funktion wird ohne Notwendigkeit ausgelöst.
- Falsch negativ bedeutet: Eine Funktion löst nicht aus, obwohl die Anforderung besteht.

[ISO 26262, Band 3] beschreibt sowohl ein *failure*<sup>20</sup> wie ein *malfunction behaviour*<sup>21</sup> und den *non-functional hazard*<sup>22</sup>. Dabei umfasst der *failure* einen vollständigen und einen teilweisen Verlust der Funktionalität. In (Börcsök, 2011) wird der Begriff „Fehler“ mit dem englischen Begriff *nonconformity*<sup>23</sup> und der Ausfall als *failure* definiert.

In der Praxis und Literatur werden des Weiteren die Begriffe *fault*<sup>24</sup> und *error*<sup>25</sup> verwendet. Damit im Zuge der vorliegenden Arbeit ein einheitliches Verständnis dieser Begriffe geschaffen wird, werden diese im Folgenden definiert.

**Fault:** Unter diesem Begriff können Abweichungen verstanden werden, die durch keinen Sicherheitsmechanismus abgesichert sind und als Resultat zu einer Verletzung der Sicherheitsziele und zur direkten Gefährdung des Menschen führen (Maier, 2013 S. 21).

**Error:** Unter *error* kann ein inkorrekt und nicht vorhergesehener interner Zustand eines Systems verstanden werden. Des Weiteren kann ein *error* die Grenze eines Systems hinsichtlich der Funktion beeinflussen. Als Resultat kann das System ausfallen (Root, 2009 S. 6). In der Praxis geht man von einem zeitlichen Zusammenhang der einzelnen Fehlerzustände aus, der in Abbildung 4.14 dargestellt ist.

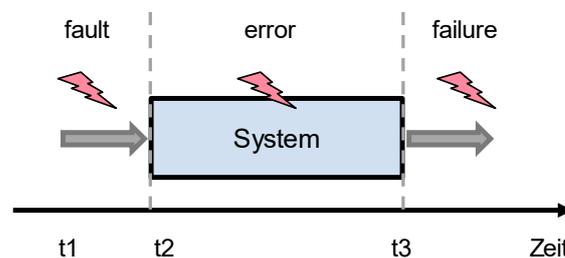


Abbildung 4.14: Zeitliche Abfolge fault, error und failure

<sup>20</sup> englisch: der Fehler

<sup>21</sup> englisch: das Fehlverhalten

<sup>22</sup> englisch: keine funktionale Gefahr

<sup>23</sup> englisch: Nichtübereinstimmung

<sup>24</sup> englisch: der Fehler

<sup>25</sup> englisch: die Störung

In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff „Fehlfunktion“ folgendermaßen beschrieben:

*In einem beschriebenen System können Hardware- oder Softwarefehler auftreten. Bewirken diese eine nichtsituationsgerechte Auslösung, spricht man von einer Fehlfunktion.*

#### **Bewertung des Schweregrads aufgrund eines möglichen Systemfehlers (Severity).**

Um die Bewertung des Schweregrads (S) nachvollziehbar zu machen, werden beispielhaft Unfallszenarien und dazugehörige Grenzwerte aufgezeigt. Bei der Bewertung sollten Prognosen für den Zeitpunkt des Einsatzes getroffen werden. Bei der Bewertung für Fahrzeuge und Funktionen, deren Einsatz in mehreren verschiedenen Märkten erfolgt, müssen marktspezifische Besonderheiten im Unfallgeschehen berücksichtigt werden. Als Bewertungsgrundlage wurden Unfalldaten aus Abschnitt 4.1 und aus den „Abbreviated Injury Scale“(AIS)-Unfalldatenbanken verwendet. Die Kategorisierung reicht von AIS 0 (keine Verletzung) bis AIS 6 (kritische Verletzungen, Überleben ist ungewiss). Als Resultat wurde eine Einteilung der Schadensschwere von S0 bis S3 definiert. Diese ist in Tabelle 4.7 zu sehen.

Schadensschwere	S0	S1	S2	S3
Bezeichnung	Keine Verletzung	Leichte Verletzung	Schwere Verletzung	Tödliche Verletzung
Definition	Ereignisse, die typischerweise keine Verletzung verursachen	Ereignisse, die typischerweise zu leichten Verletzungen (AIS 1–2) führen	Ereignisse, die typischerweise zu schweren Verletzungen (AIS 3–4) führen	Ereignisse, die typischerweise zu sehr schweren Verletzungen (AIS 5–6) führen und somit evtl. den Tod bedeuten

Tabelle 4.7: Definition des Schadensausmaßes (ISO 26262, 2011)

#### **Bewertung Eintrittswahrscheinlichkeit (E) der Fahrsituation (Probability of Exposure)**

Um ein konsistentes Bewertungsverfahren zwischen den OEM zu erhalten, wurde vom VDA ein Situationskatalog (SitKat) entworfen. Das Ziel des SitKat ist das Ableiten der Basissituation und von deren Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Einstufung erfolgt aufgrund von Datenquellen, mit dem Schwerpunkt Mitteleuropa und Nordamerika. Wie bei der Schadensschwere sind auch diese Werte Richtwerte und nicht verpflichtend. Zur Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit müssen nach (ISO 26262, 2011) alle Betriebssituationen und Betriebsmodi, die in der Gefährdungsanalyse und Risikobewertung zu beschreiben sind, herangezogen werden. Das bedeutet, dass alle Situationen vom bestimmungsgemäßen Gebrauch bis hin zum vorhersehbaren Fehlgebrauch zu betrachten sind. Bei der Einstufung sind Einflussfaktoren wie klimatische Bedingungen, andere Märkte, anderer Gebrauch sowie Straßenverhältnisse zu beach-

ten. Die Bewertung ist unterteilt in den Zeitbereich (duration) und in den Frequenzbereich (frequency). Der zeitliche Anteil wird in Prozent angegeben. Dazu wird als Referenz die Betriebszeit eines Fahrzeuges in Stunden herangezogen. Im Frequenzbereich wird die Anzahl der betreffenden Situation innerhalb eines bestimmten Zeitraums angegeben. Die Betrachtung im Frequenzbereich wird angewendet, wenn von einer Fehlfunktion ausgegangen wird, die nur in bestimmten Situationen auftritt.

Aus Kundendaten wurden als Beispiel folgende Basisdaten ermittelt:

- Betriebszeit: 400 h/a
- Anzahl Fahrzyklen: 1000 Stk./a
- Durchschnittliche Fahrzyklen: 24 min
- Laufleistung: 20000 km/a

Die in Tabelle 4.8 dokumentierten Grenzen für die Eintrittswahrscheinlichkeit, resultieren aus den Basiswerten nach (ISO 26262, 2011).

Eintrittswahrscheinlichkeit	E1	E2	E3	E4
ISO Definition Zeitbereich	-	<1 % der durchschnittlichen Betriebszeit	1 %–10 % der durchschnittlichen Betriebszeit	>10 % der durchschnittlichen Betriebszeit
Basis Betriebszeit h/a	< 0,4 h/a	$0,4 \text{ h/a} \leq x < 40 \text{ h/a}$	$4 \text{ h/a} \leq x < 40 \text{ h/a}$	> 40 h/a
ISO Definition Frequenzbereich	Kommt seltener als 1x pro Jahr für die Gesamtheit der Fahrer vor	Kommt ab und zu für die Gesamtheit der Fahrer vor	Kommt mehr als einmal pro Monat bei dem Durchschnittsfahrer vor	Kommt nahezu bei jeder Fahrt vor
Basis Fahrzyklen Anzahl/a	< 1/a	$1/a \leq x < 10/1$	$10/a \leq x \leq 100/a$	> 100/a

Tabelle 4.8: Eintrittswahrscheinlichkeit nach (ISO 26262, 2011)

Ein Beispiel zur Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit aus der Praxis:

Das Fahren in Baustellen auf der Autobahn mit baulicher Trennung fällt unter Verwendung der Betriebszeit in die Wahrscheinlichkeitsklasse E3 (7 % der Betriebszeit). Der Straßenreiwert in der Baustelle ist reduziert auf  $\mu < 0,8 \pm 0,1$  und liegt ebenfalls in Klasse E3 (10 % der Betriebszeit). Daraus folgt,  $E3 (7 \% \text{ der Betriebszeit}) \times E3 (10 \% \text{ der Betriebszeit}) \geq 0,7 \% \text{ der}$

Betriebszeit und somit E2. Ein Teil des SitKat wird im Anhang ausgewiesen (Burger, et al., 2013).

#### Bewertung Fahrzeugbeherrschbarkeit durch den Fahrer bei Eintreten des Fehlers (C)

Nach der (ISO 26262, 2011) wird die Fahrzeugbeherrschbarkeit durch den Fahrer bei Eintreten des Fehlers in vier Stufen unterteilt. Diese vier Stufen definieren den prozentualen Anteil der Fahrer, die bei Eintreten eines bestimmten Zustandes ein Fahrzeug noch kontrollieren können.

Kontrollierbarkeit	C0	C1	C2	C3
Beschreibung	Im Allgemeinen beherrschbar	Einfach zu beherrschen	Normalerweise zu beherrschen	Nicht beherrschbar
Wert	-	99 % oder mehr aller Fahrer/ Verkehrsteilnehmer sind fähig, einen Schaden abzuwenden	90 % oder mehr aller Fahrer/ Verkehrsteilnehmer sind fähig, einen Schaden abzuwenden	Weniger als 90 % oder mehr aller Fahrer/ Verkehrsteilnehmer sind fähig, einen Schaden abzuwenden

Tabelle 4.9: Definition Fahrzeugbeherrschbarkeit durch den Fahrer, bei Eintreten eines Fehlers (ISO 26262, 2011)

In (Staiger, 2015) wird beschrieben, dass ein Kontrollierbarkeitsniveau von 90 % (C2) zu attestieren ist, wenn mindestens 29 Probanden ein definiertes Verkehrsszenario mit aufgeschaltetem Fehler zu 100 % erfüllen. Dabei wird bei der statistischen Absicherung von einem Signifikanzniveau in Höhe von 95 % ausgegangen. Das heißt, dass der Versuch belastend ist, wenn 28 Probanden den Test erfolgreich durchführen. Damit die Klasse C1 bestätigt werden kann, müssen 99 % der Fahrer fähig sein, ein bestimmtes Verkehrsszenario zu bewältigen. Dazu muss ein definierter Versuch mit 299 Probanden durchgeführt werden. Da dies in der Praxis einen enormen Aufwand darstellt, wird diese Einteilung in der Regel anhand von Experteneinschätzungen getroffen (Weitzel, 2013).

Abschließend zur theoretischen Bewertung des ASIL folgt ein Praxisbeispiel anhand der elektronischen Lenkradverriegelung.

1. Funktion: Elektronische Lenkradverriegelung (ELV)
2. Fehlfunktion: ELV verriegelt während der Fahrt
3. Ermitteln der Fahrsituationen
4. Ermitteln der möglichen Reaktionen der Verkehrsteilnehmer
5. Ermitteln der realistischen Unfallfolgen

Gemäß der Verifikation des Betriebszustandes kann unter Berücksichtigung des Situationskataloges für den Ort Landstraße von einer Eintrittswahrscheinlichkeit von E4 ausgegangen werden. **E4** bedeutet, dass diese relevante Fahrsituation nahezu bei jeder Fahrt vorkommt.

Bewertet man die Kontrollierbarkeit, so kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Fahrt auf der Landstraße die Wahrscheinlichkeit der Gefahrenabwehr, durch den Fahrer, unterhalb von 90 % liegt. Somit ist die Bewertung für die Kontrollierbarkeit **C3**.

Da die Fahrt auf der Landstraße erfolgt, kann von höheren Geschwindigkeiten ausgegangen werden. Bewertet man diese Situation zum Beispiel anhand eines Auffahrunfalls mit einer Delta-Geschwindigkeit von 60 km/h, so kann von einem Schadensausmaß von **S3** ausgegangen werden. Das Ergebnis der Bewertung ist in Abbildung 4.15 und mit der Einstufung als ASIL D abgebildet.

Schadensausmaß	Aufenthalts- wahrscheinlichkeit	Kontrollierbarkeit		
		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	A
	E4	QM	A	B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	A
	E3	QM	A	B
	E4	A	B	C
S3	E1	QM	QM	A
	E2	QM	A	B
	E3	A	B	C
	E4	B	C	D

Abbildung 4.15: Bewertung der Indikatoren E, C und S

Das bedeutet, jede Erhöhung einer Risikoklasse um eine Kategorie bildet die zehnfache Erhöhung des Risikopotenzials (Gebhardt, Rieger, Mottok, & Gießelbach, 2013). Wenn das zu betrachtende System eine hohe Risikointegritätsklasse aufweist, muss dieses so ausgelegt werden, dass es auf ein sogenanntes „akzeptables Risiko“ minimiert wird (Gebhardt, et al., 2013).

Bei der Betrachtung der Kontrollierbarkeit einer gewissen Situation ist die allgemeine Risikoberechnung relevant. Allgemein werden in der Ingenieurwissenschaft bei der Risikobetrachtung nur die Schadensschwere und die Auftretswahrscheinlichkeit betrachtet. Sind jedoch Menschen in einem System integriert, können diese den vermeintlichen Schaden durch ihr Handeln abwenden. Um ein Risiko in diesem Zusammenhang bewerten zu können, wird neben der Objektivierung dieser Kriterien, die für einen sogenannten sicheren Zustand dienen, ein Referenzrisiko benötigt. In der Praxis wird hierfür das Grenzzisiko verwendet. Dieses Grenzzisiko beschreibt das Risiko, welches von der Gesellschaft akzeptiert wird. Liegt ein System oberhalb dieses Risikoniveaus, müssen Maßnahmen zur Risikoreduzierung getroffen werden (Weitzel, 2013).

Dieses Grenzzisiko wird vom Stand der Technik definiert. So ist der OEM bei einem Schadensfall in der Nachweispflicht, dass er bei der Entwicklung und Herstellung des Fahrzeugs nach dem aktuellen wissenschaftlichen und technischen Stand gehandelt hat.

Abbildung 4.16 zeigt ein Beispiel, das sich bei der ersten Untersuchung außerhalb des gesellschaftlich akzeptierten Risikos befindet. Das Erreichen des geforderten Niveaus kann ausschließlich durch risikoreduzierende Maßnahmen, wie zum Beispiel Warntexte im Kombiinstrument, redundantes System oder Begrenzungen der Leistungsfähigkeit, gewährleistet werden.

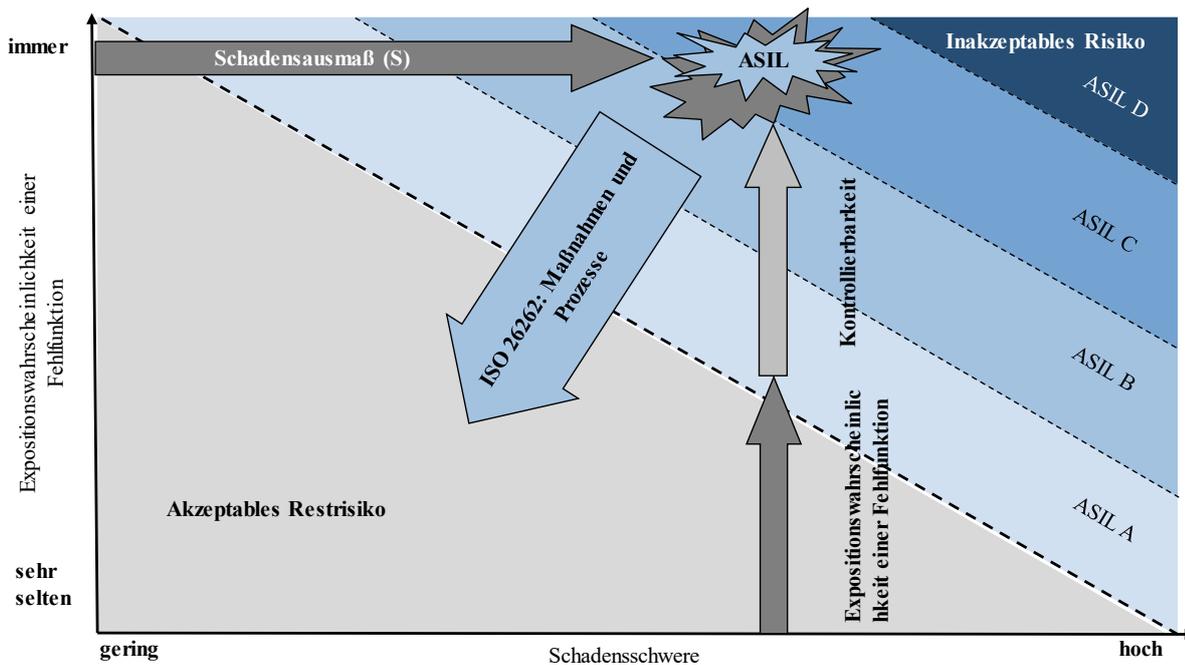


Abbildung 4.16: Einordnung einer ASIL-Klassifizierung und Reduktion des Risikos auf ein akzeptables Niveau

#### 4.5.2 Safety of the Intended Functionality

Safety of the Intended Functionality (SOTIF) erweitert die (ISO 26262, 2011) in Bezug auf Fehler, die im Zusammenhang mit den assistierten und teilautomatisierten Fahrzeugsystemen (SAE Stufe 1 und 2) auftreten können. Bei diesen Systemen reicht es nicht aus, die E/E-Fehler singulär zu betrachten. Vielmehr muss das System als gesamte Sollfunktion nachvollziehbar analysiert und abgesichert werden. Dabei wird auch die Gebrauchssicherheit betrachtet, wenn das spezifikationsgerechte System in einen gefährlichen Zustand überführt werden kann. Der Unterschied zwischen FuSi und SOTIF wird in Abbildung 4.17 aufgezeigt.

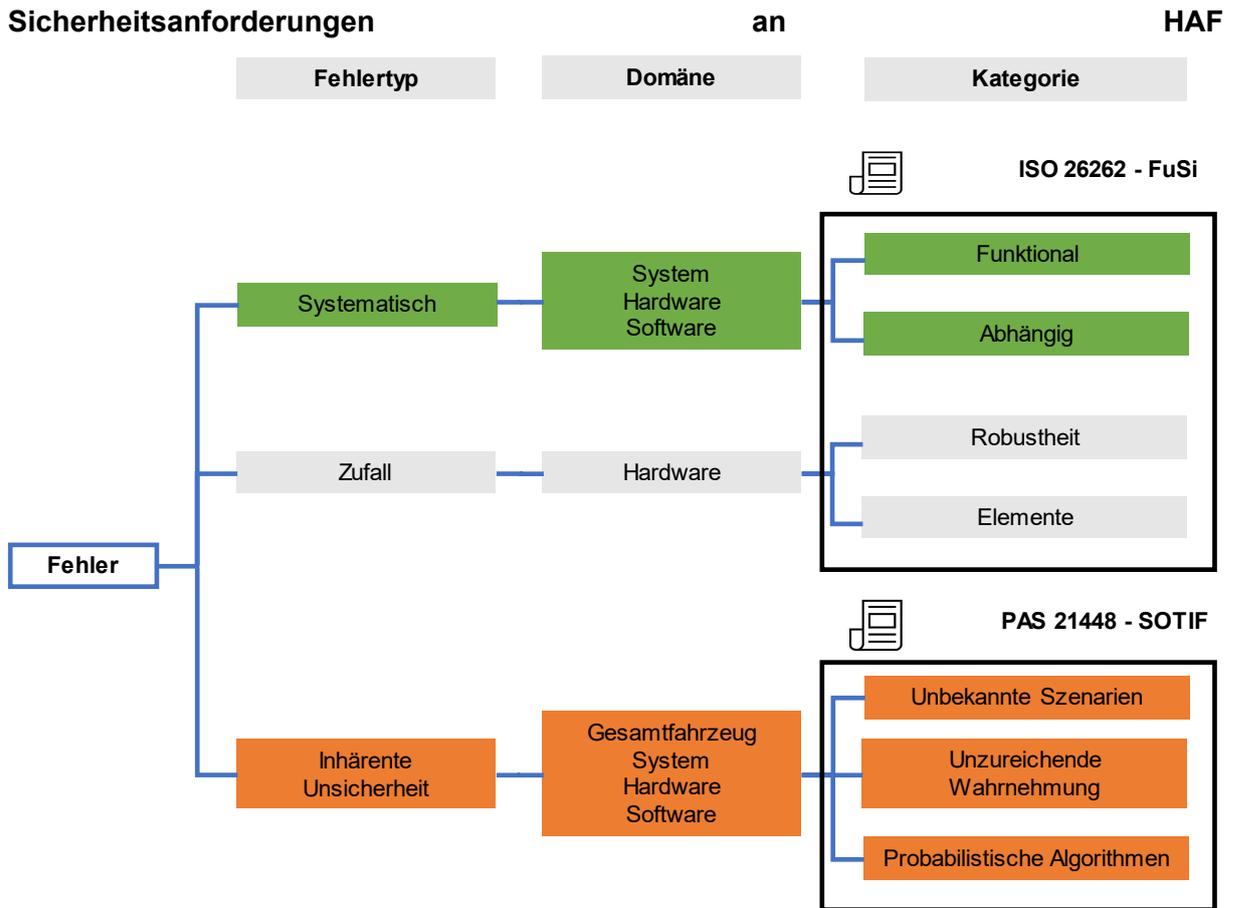


Abbildung 4.17: Differenzierung FuSi und SOTIF nach (Vector Informatik, 2019)

Damit es ähnlich wie bei der ISO 26262 eine einheitliche Regelung für die Entwicklung für HAF gibt, wurde unter der weltweiten Beteiligung von OEM, Zulieferern und staatlichen Institutionen Anfang 2019 SOTIF als Publicly Available Specification (PAS) vorveröffentlicht. Diese wurde 2022 offiziell publiziert. Die finalisierte Version bietet die Grundlage für die Entwicklung von hochautomatisierten Fahrfunktionen.

Die Durchführung der Bewertung nach SOTIF erfolgt nach einer szenarienbasierten Funktionsbetrachtung und einem iterativen Entwicklungsprozess. Dabei werden die möglichen Szenarien aus dem Straßenverkehr in vier Teilklassen unterteilt – bekannt, unbekannt sowie sicher und unsicher. Dies wird in Abbildung 4.18 schematisch dargestellt. Die sicheren und unbekannt Szenarien sind mit weißem Hintergrund angezeigt. Diese sind nicht weiter zu betrachten. Mit SOTIF wird das Ziel verfolgt, die Szenarien, die unbekannt und unsicher sind, zu identifizieren und die bekannten unsicheren in sichere Szenarien zu wandeln.



Abbildung 4.18: Klassifikation der Szenarien und Zielbild nach SOTIF (ISO/PAS 21448:2019)

Da SOTIF ein risikogesteuerter Prozess ist, benötigt man für die Durchführung ein Validierungsziel, das ein akzeptables Risiko aufweist und alle geltenden Regularien und Gesetze erfüllt. Damit die Zielerreichung nachweisbar ist, muss bei der Durchführung und Formulierung die Methodik „Verifikation und Validierung“ (V&V)-Strategie angewendet werden.

Generell ist das Vorgehensmodell nach SOTIF in vier Teilphasen untergliedert, die iterativ durchzuführen sind:

1. SOTIF-Analysephase,
2. SOTIF-Verifikationsphase,
3. SOTIF-Validierungsphase und
4. SOTIF-Implementierungsphase.

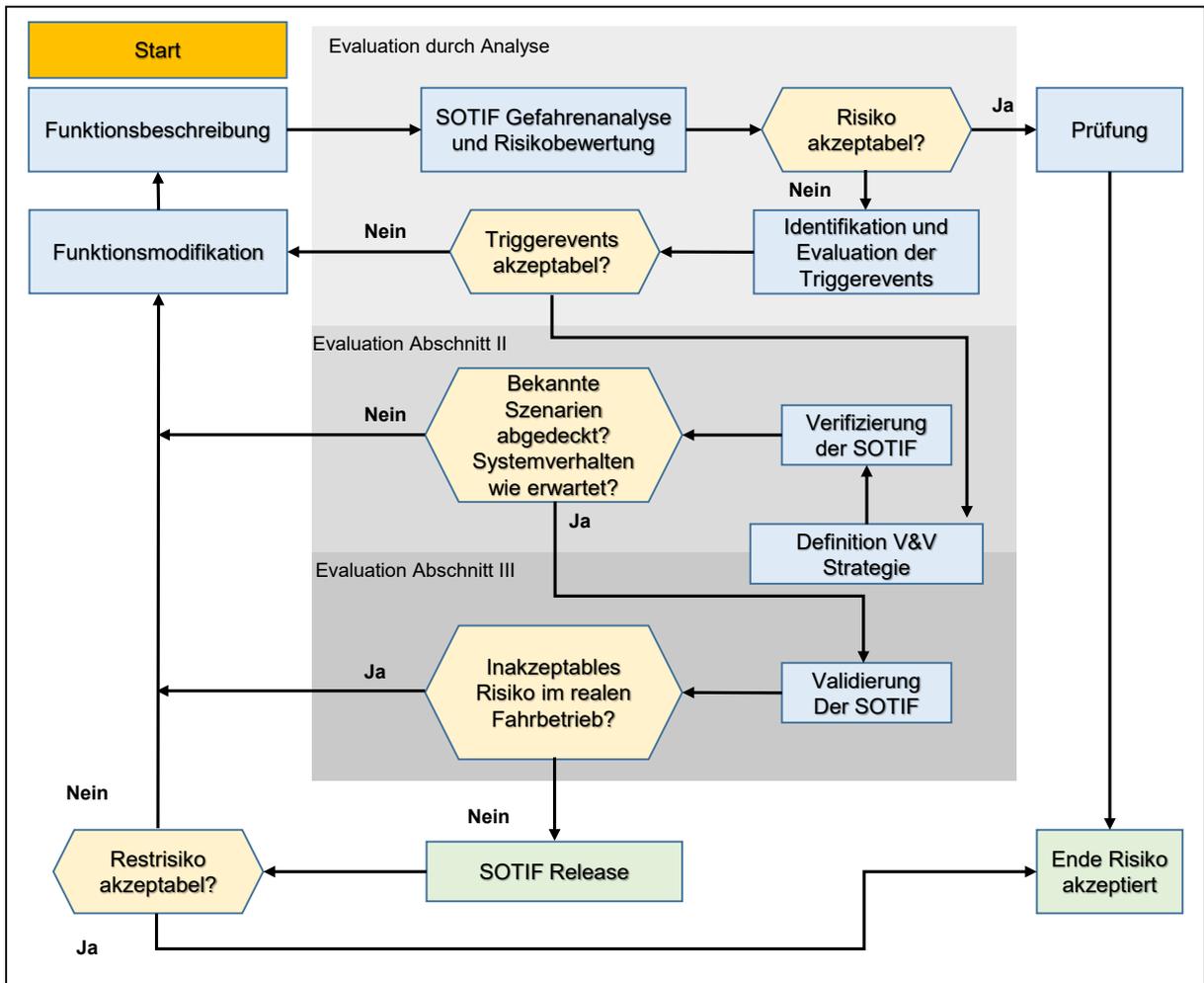


Abbildung 4.19: SOTIF-Prozess nach (ISO/PAS 21448:2019)

Begonnen wird mit einer Funktions- und Systembeschreibung, die einer SOTIF-Risiken-Analyse unterzogen wird. Hierbei werden Gefahren analysiert, die von der Sollfunktion zu erwarten sind. Diese Analyse kann analog zur bereits bestehenden FuSi-Gefährdungsanalyse und Risikobewertung durchgeführt werden. Wird hierbei festgestellt, dass die analysierten Gefahren „generell unkontrollierbar“ sind oder von kleineren Verletzungen auszugehen ist, muss das auslösende Ereignis (Triggerevent) betrachtet werden. Bei der Analyse des Triggerevents werden Fehlerquellen im Systemdesign offengelegt. Diese Fehlerquellen können ihre Quelle in der gesamten SPA-Wirkkette haben. Aus diesem Grund muss innerhalb der Systemgrenze die Fehlerquelle bezogen auf die Sensorik, Aktorik und auf die Algorithmen untersucht werden. Wie eingehend beschrieben, wird das Triggerevent als akzeptabel angesehen, wenn es unter dem Validierungsziel ist.

Nach der Validierungsphase wird zunächst überprüft, wie das Verhältnis der Bereiche der bekannten und sicheren Szenarien zu den bekannten und unsicheren Szenarien ist. Des Weiteren wird überprüft, ob das zu erwartende Verhalten bei den bekannten Szenarien eintritt.

Damit dies standardisiert durchgeführt werden kann, sind in SOTIF 28 technologiespezifische Methoden beschrieben, von denen 23 auf der Durchführung von Tests basieren.

Bei der Durchführung der Validierungsphase wird das System unter Realbedingungen abgesichert. Hierbei werden auch Szenarien untersucht, die ein inakzeptables Risiko aufweisen. Am Ende ist gegenüber dem Validierungsziel die Erfüllung der Sollfunktion auf der Domäne, auf der das System aktiv ist (ODD<sup>26</sup>), mit der Hilfe von einer der 12 Methoden nachzuweisen. Von den 12 Methoden basieren zwei auf einer Analyse und alle anderen auf Versuchen.

Wird in der Validierungsphase festgestellt, dass das System ein inakzeptables Risiko aufweist, müssen iterativ funktionale Modifikationen eingespeist werden. Anschließend müssen auf der aktualisierten Funktions- und Systembeschreibung erneut eine Analyse, Verifikation und Validierung durchgeführt werden. Maßnahmen zur Reduzierung von Risiken können dabei sein:

- Performancesteigerung von Sensorik, Aktorik oder Algorithmen,
- Einschränkung der Funktion,
- Fahrerwarnung mit Übergabe der Kontrolle,
- Maßnahmen zur Beherrschung der Effekte von Misuse.

Als Fazit kann gesagt werden, dass das PAS ein Konzept darstellt, das eine strukturierte Analyse von HAF-Funktionen bietet, die aber bis zur Veröffentlichung der ISO-Norm weiter optimiert wird. In Kapitel 6 wird SOTIF im Zusammenhang mit einer neu entwickelten Methode als Versuch durchgeführt.

Des Weiteren sind nach (Becker, 2019) und (Kim, 2019) weitere Inhalte zu erwarten. Diese sind:

- quantitative Methoden zur Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten und Risiken,
- Betrachtung der Softwarearchitektur inklusive integrierter ML<sup>27</sup>-Algorithmen,
- Verlagerung der V&V von Tests hin zu deduktiven Analyseverfahren und
- Prozessgebilde analog ISO 26262 inklusive Schnittstellen zu FuSi.

---

<sup>26</sup> Englisch: Operational Design Domain ist der Bereich, in dem automatisierte Fahrfunktionen zum Einsatz kommen

<sup>27</sup> Englisch: Machine Learning

### 4.5.3 Best Practices

In dem vergangenen Kapitel wurde gezeigt, dass die Anforderungen sowohl technisch als auch gesetzlich noch nicht auf dem Stand sind, um automatisierte Fahrfunktionen größer SAE Stufe 2 umzusetzen. Aus diesem Grund sind die OEM selbst treibende Akteure für die Erarbeitung und Definition eines einheitlichen Stand der Technik und von Sicherheitsanforderungen. 2019 wurde ein Whitepaper mit dem Titel „Safety First for Automated Driving“ herausgebracht, das durch die deutschen OEM sowie internationale Zulieferer und Institute erarbeitet wurde. Mit dieser Veröffentlichung ist eine ganzheitliche Betrachtung der Sicherheit von hoch-automatisierten Fahrzeugsystemen möglich. Dabei werden generische Richtlinien für die Entwicklung bis hin zur Validierung und unter Berücksichtigung der FuSi und SOTIF für die SAE Stufe 3 bis 5 definiert. Zentrales Element dabei sind die kommenden „12 Prinzipien des automatisierten Fahrens“.

<b>Die zwölf Prinzipien des automatisierten Fahrens</b>	
1	Durch kontrollierte Degradation und Fail-Operational-Fähigkeit hält das System den sicheren Betrieb aufrecht.
2	Das System beherrscht die zu erwartenden Situationen innerhalb der ODD, erkennt und reagiert auf das Erreichen der Grenzen der ODD.
3	Das System wird durch den Fahrer bewusst ein- und/oder ausgeschaltet.
4	Cybersicherheit.
5	Der Fahrmodus und die Fahrerverantwortlichkeit sind jederzeit für den Fahrer ersichtlich. Der Fahrerzustand wird überwacht.
6	Klare Aufforderung bei Übergabe an den Fahrer, bei Nichtbeachtung ist das System in den risikominimalen Zustand zu überführen.
7	Bei der Sicherheitsevaluation werden Effekte des HAF-Systems auf den Fahrer auch außerhalb der ODD berücksichtigt.
8	Durch Verifikation und Validierung werden Sicherheitsziele bestätigt.
9	Bei kritischen Ereignissen oder Unfällen werden spezifische Fahrzeugdaten unter Berücksichtigung des Datenschutzes erhoben.
10	Crashszenarien, die aus HAF resultieren, werden bei der passiven Sicherheit berücksichtigt.
11	Das Systemverhalten im Straßenverkehr ist regelkonform und verständlich für andere Verkehrsteilnehmer.
12	Falls eine sichere Übergabe an den Fahrer notwendig ist, liegt eine Notfallstrategie vor, um das Risiko zu verringern.

Tabelle 4.10: Die zwölf Prinzipien des automatisierten Fahrens nach (Wood, et al., 2019)

Damit diese Prinzipien bei der Einführung von hochautonomen Fahrzeugen zum Einsatz kommen, haben die Autoren eine implementierungsunabhängige, funktionale Architektur entwickelt. Mit dieser werden die Richtlinien für das „Safety by Design“ erarbeitet. Das grundlegende Know-how basiert auf bereits in Serie umgesetzten Systemen. Dadurch kann die Systemsicherheit für bereits bekannte Systeme gewährleistet werden. Die Verifikation wird mit Hilfe einer aus den Anforderungen abgeleiteten Richtlinie durchgeführt. Für unbekannte Szenarien ist das „Safety by Design“ nicht anwendbar. Daher wird mit dem Validierungskonzept das Ziel verfolgt, eine statistische Aussage über alle Szenarien im Gesamtsystem zu bekommen. Damit die Verifikation und Validierung wie beschrieben gelingen, müssen fünf Themengebiete identifiziert werden:

1. statistische Darstellung einer positiven Risikobilanz ohne Fahrereingriff,
2. Systemsicherheit mit Fahrereingriff,
3. Berücksichtigung der bisher unbekanntem Szenarien,
4. Systemkonfigurationen und Varianten müssen validiert werden und
5. ML-basierte Systeme müssen validiert werden.

Mit der Hilfe von der Teststrategie können diese Themengebiete eindeutig adressiert werden. Dazu werden die einzelnen Elemente der Funktionsarchitektur einer Testplattform mit Versuchsziel zugeteilt. Für die anschließende „Function under Test (FuT)“ müssen die einzelnen Versuchsumfänge, -techniken und die Validierungsmetrik definiert werden. Der Übertrag auf die vorliegende Arbeit wird in kommender Tabelle 4.11 dargestellt. Dabei wird eine Versuchsplattform für die jeweiligen Architekturelemente nach Versuchszweck definiert.

Versuchsplattform	SiL	HiL	DiL	Prüfgelände	Erprobung
Komponenten					
Sensorfusion, Lokalisierung, Wahrnehmung					
Prädiktion, Fahrplanung					
Ego-Bewegung, Bewegungsüberwachung					
HMI, Fahrerbeobachtung, HAF Modi-Manager					
<b>Gesamtsystem</b>					
Testzweck					
	Validierung von Simulationsmodellen	Cybersicherheit	SOTIF: Menschliche Aspekte	Funktionale Sicherheit	SOTIF: Technische Aspekte

Tabelle 4.11: Versuchsplattform für jeweilige Architekturelemente und Versuchszweck nach (Wood, et al., 2019)

## 4.6 Ableitung der Anforderungen anhand Unfallanalysen

Die aktuellen Unfalldaten werden durch das Statistische Bundesamt DESTATIS erhoben und bereitgestellt (DESTATIS, 2021). Für jeden Unfall werden von der Polizei Unfallberichte erstellt. Diese bilden die Grundlage der folgenden Auswertung. Neben mehreren Statistiken über Unfallbeteiligte, -ort und -zeit lassen sich auch Angaben zu den Unfallursachen recherchieren.

Trotz einheitlicher Berichterstattungsbögen muss darauf hingewiesen werden, dass jede Beurteilung durch einen Beamten individuell durchgeführt und aufgenommen wird. Daher ist kein Anspruch auf vollständige Korrektheit gegeben. Wissenschaftlich sind diese Daten daher nur begrenzt verwendbar. Allerdings bieten die Daten eine unschätzbare Hilfestellung bei der Aufarbeitung der Aufgabenstellung. Alternativ dazu werden Daten erhoben, die durch spezielle Unfallexperten erfasst werden (GIDAS – German In-Depth Accident Study) (GIDAS, 2018)). Die Spezialisten fahren zu ausgewählten Unfällen und nehmen diese mit hochmoderner Messtechnik und mit entsprechenden Methoden auf. Leider findet diese spezielle Berichterstattung derzeit nur in den Räumen Dresden und Hannover statt. Dennoch bieten diese Aufnahmen eine sinnvolle Basis, um das akzeptierbare Risiko für HAF-Systeme abzuleiten. Aus (Pegasus Project 2019) ist zu entnehmen, dass der Mensch ein Risiko eher akzeptiert, wenn er selbst die Kontrolle und die Verantwortung für das jeweilige Verhalten hat. Daher ist davon auszugehen, dass trotz einer positiven Risikobilanz von HAF-Systemen der Mensch diese Systeme nicht ohne weiteres akzeptiert. Nach (Kalra, et al., 2017) werden HAF-Systeme mit zunehmender Marktdurchdringung immer sicherer, da der Faktor Mensch, der nicht berechenbar ist, an Bedeutung abnimmt. Vergleicht man diese Prognose mit den Erkenntnissen aus der Einführung von Sicherheitsfunktionen in der Vergangenheit, gilt sie selbst, wenn die Funktionen und Systeme eine höhere Risikobilanz gegenüber dem Menschen darstellen.

Das von der Ethik-Kommission erklärte Ziel für kommende Systeme ist eine positive Risikobilanz gegenüber dem menschlichen Fahrer. Dazu wird als Risiko die Wahrscheinlichkeit definiert, dass es zu einem Unfall mit Todesfolge oder Personenschaden kommt. Die Fahrleistung sowie Unfälle mit Personenschaden und Verkehrstote werden in Tabelle 4.12 dargestellt. Die Werte repräsentieren den Durchschnitt der Jahre 2015 bis 2019.

	Fahrleistung	Unfälle mit Personenschaden	Verkehrstote
Insgesamt	643,6 Mrd. km	305.065	3.233
Autobahn	228,3 Mrd. km	20.550	399

Tabelle 4.12: Gemittelte Fahrleistung, Unfälle mit Personenschaden und Verkehrstote im Straßenverkehr in Deutschland, Mittelwerte der Jahre 2015 bis 2019 (DESTATIS, 2021)

Die relative Häufigkeit von Unfällen mit Personenschaden ist 473 und die von solchen mit Todesfolge 5,02 pro  $10^9$  km. Damit liegen statistisch gesehen zwischen zwei Unfällen mit Todesfolge 199,1 Millionen Kilometer. Beschränkt man die Berechnung auf Fahrten auf der Au-

tobahn, sind es 572,2 Millionen km. Aus diesen Zahlen lassen sich die notwendigen Dauerlaufkilometer zur Absicherung möglicher Ereignisse unter Berücksichtigung verschiedener Signifikanzniveaus darstellen.

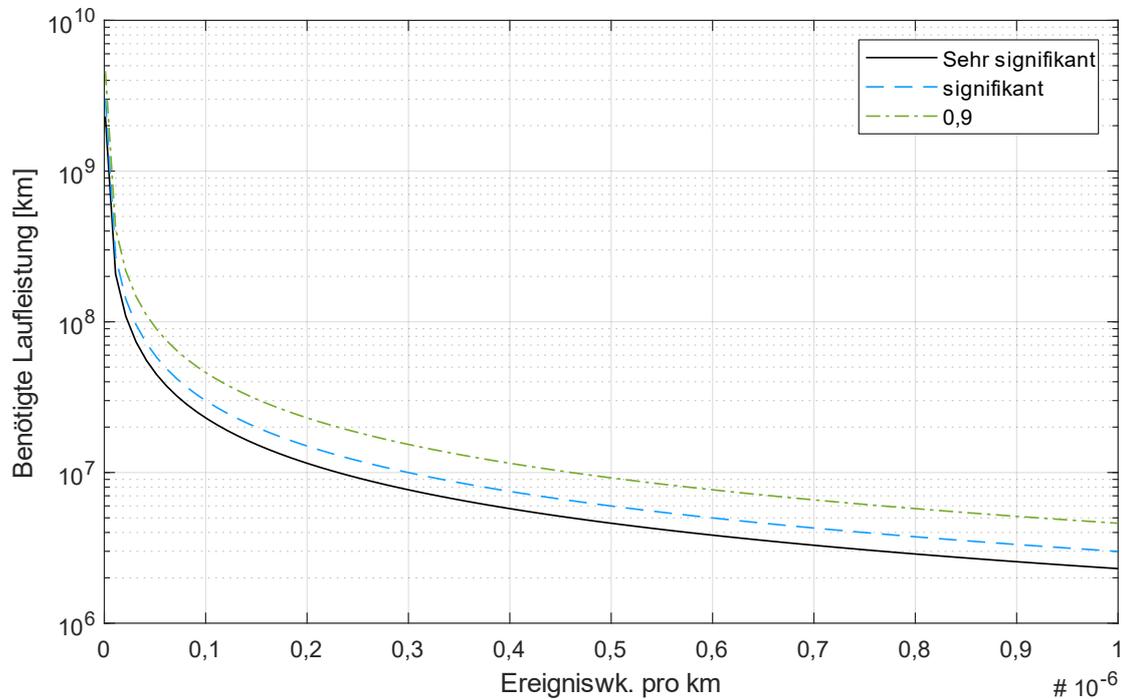


Abbildung 4.20: Dauerlaufleistung zur Absicherung von Ereignissen über die Auftretenswahrscheinlichkeit (t-Test mit gegebenem Konfidenzniveau, Nullhypothese: Der Mensch fährt sicherer als das HAF)

Aus Abbildung 4.20 ist zu entnehmen, dass eine Dauerlaufleistung im neunstelligen Bereich notwendig wäre, um nachzuweisen, dass ein HAF-Systeme weniger Unfälle als der menschliche Fahrer verursacht. In Bezug auf diese Arbeit und auf ein kommendes Verifizierungs- und Validierungskonzept (V&V-Konzept) ist dies nicht sinnvoll. Daher werden die in Kapitel 2 beschriebenen Methoden verwendet. Bei der Anwendung kann unter Berücksichtigung der Funktionsbeschreibung ein sinnvolles Validierungsziel definiert werden. Dabei beschränkt sich der Anwendungsbereich der zu testenden Funktion auf die in Kapitel 4.1 definierten Einsatzbereiche. Wie bereits beschrieben, können kritische Fehler nur im Bereich der hohen Reibwerte vorliegen. Das heißt, für die Analyse ist die Anzahl der Unfälle von Interesse, die durch den Menschen bei niedrigen und mittleren Reibwerten verursacht werden. Zur ersten Referenz kann der in Abschnitt 4.2 beschriebene Situationskatalog für den E-Parameter herangezogen werden. Daraus resultiert, dass in unter 1 % der durchschnittlichen Betriebszeit ein Reibwert von  $<0,5 (\pm 0,1)$  vorliegt. Ein Reibwert  $<0,8 (\pm 0,1)$  ist in 1 % bis 10 % der durchschnittlichen Betriebszeit vorzufinden (Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) 2015). Anhand dieser Werte wird im Folgenden die Unfallstatistik differenziert betrachtet und plausibilisiert. Wie be-

reits erwähnt, haben die Witterungsbedingungen einen der größten Einflüsse auf Kraftschlusspotenzial zwischen Reifen und Fahrbahn. Dazu werden in Abbildung 4.21 die Unfälle mit Personenschäden aufgrund eines Straßenzustands mit niedrigem Reibwert analysiert.

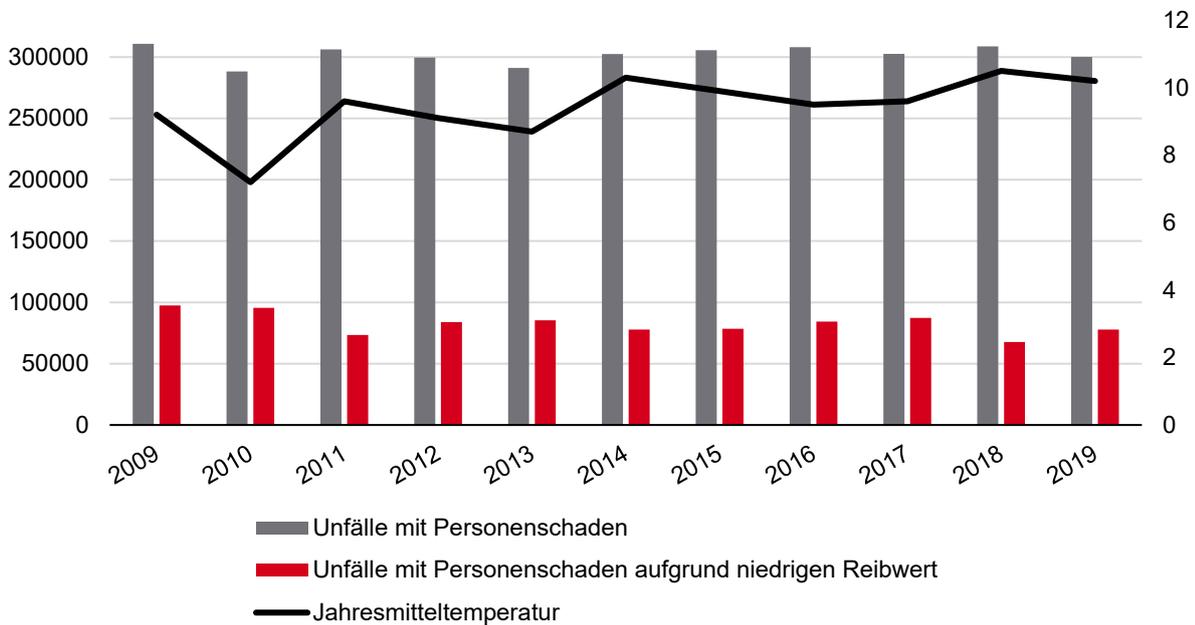


Abbildung 4.21: Summe Unfälle mit Personenschaden und Ursache niedriger Reibwert in Deutschland 2009–2019, Datenquellen: (Destatis, 2021)

Bei der Analyse der Zahlen ist zu erkennen, dass die Unfallzahlen rückläufig sind. Des Weiteren ist ein geringer Zusammenhang zwischen den Unfallzahlen mit Personenschaden und der Temperatur zu erkennen ( $R = -0,29$ ). Betrachtet man die Korrelation von Temperatur und Unfällen, die auf einen niedrigen Reibwert zurückzuführen sind, wird ein starker Zusammenhang deutlich ( $R = -0,75$ ). Außerdem sind in den Jahren 2009 bis einschließlich 2018 bei kalten Temperaturen weniger Unfälle aufgezeichnet. Dies kann damit zusammenhängen, dass es in Deutschland bei niedrigeren Temperaturen des Öfteren zu Niederschlag kommt und die Verkehrsteilnehmer daher vorsichtiger fahren.

Abbildung 4.22 macht den Rückgang der Verkehrstoten sichtbar. Jedoch ist auffällig, dass in den letzten fünf Jahren der Rückgang stagniert. Der Grund hierfür ist unter anderem die gute Marktdurchdringung der Sicherheitssysteme wie zum Beispiel ABS, ESP oder Autonomous Emergency Brake<sup>28</sup> (AEB) in Deutschland. Weiter reduziert werden kann die Zahl der Unfälle mit Personenschaden durch weitere Advanced Driver Assistance Systems<sup>29</sup> (ADAS) oder HAF-Systeme wie zum Beispiel den Autobahnpiiloten.

<sup>28</sup> eng. für Notbremsassistenten

<sup>29</sup> eng. für Fahrerassistenzsysteme

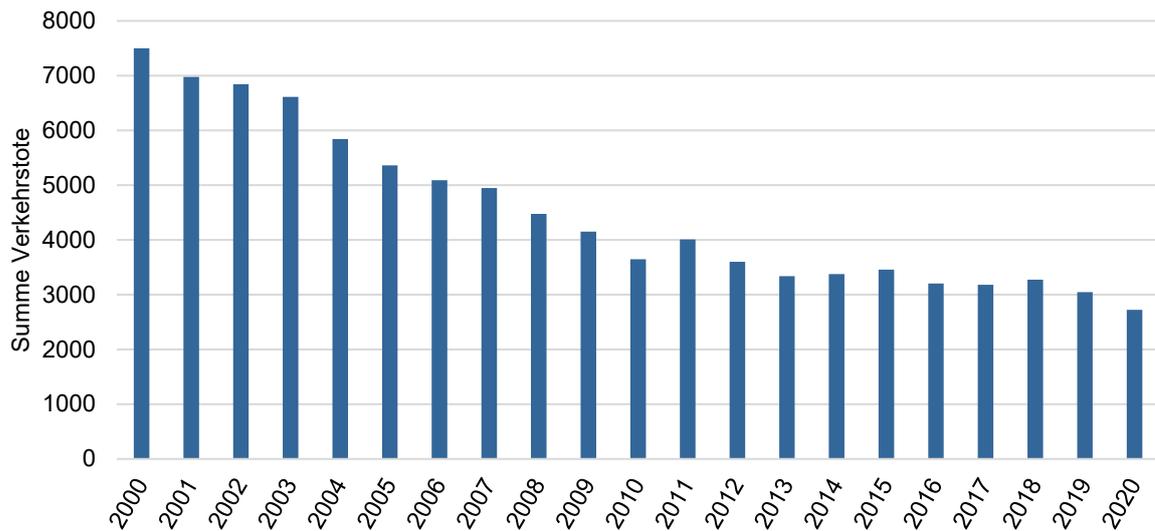


Abbildung 4.22: Jährliche Verkehrstote in Deutschland (Destatis, 2021)

Für die vorliegende Arbeit bedeutet die Stagnation der letzten fünf Jahre eine stabile Risikobetrachtung. Die nach (Müller, et al., 2017) diskutierte schwankende Betrachtungsweise wird damit vernachlässigt.

Betrachtet man die Unfälle im Jahr 2019, wurden knapp 300.000 Unfälle mit Personenschaden dokumentiert, die als Ursache auf den Straßenzustand zurückzuführen sind. Davon sind 26 % auf nassen, verschneiten oder vereisten Fahrbahnen dokumentiert. Außerdem wurden knapp 3.000 Unfälle mit Todesfolge dokumentiert. Von diesen sind wiederum 26 % auf nassen, feuchten, schlüpfrigen oder winterglatten Fahrbahnen erfasst.

Folgende Abbildung 4.23 zeigt die anteiligen Unfallzahlen auf Autobahnen nach der Unfallschwere und dem jeweiligen Reibwert. Dargestellt sind diese im Zusammenhang mit der Anzahl an Gesamtunfällen. Wie zu sehen ist, weisen die Unfälle auf Autobahnen mit niedrigem Reibwert eine geringere Schadensschwere auf. Im Gegensatz hierzu wird in (Müller, et al., 2017) aufgrund einer Auswertung der GIDAS-Datenbank für die gesamten Straßenarten die Hypothese aufgestellt, dass die schwereren Unfälle auf Autobahnen passieren.

Ein Grund für eine geringere Schadensschwere kann die bereits reduzierte Geschwindigkeit aufgrund des vorausschauenden Fahrens sein. Der Unfall an sich erfolgt dennoch, da der Reibwert tatsächlich noch niedriger ist als der vom Fahrer erwartete.

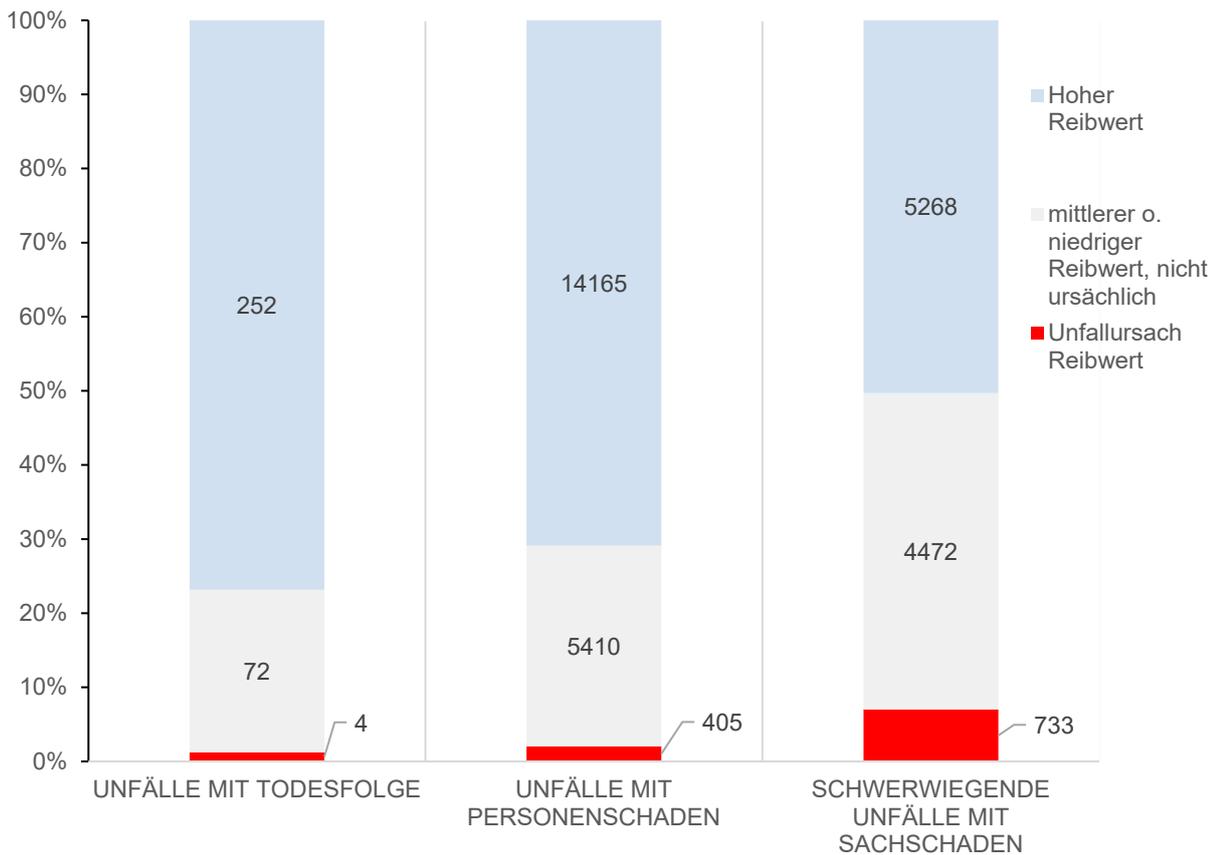


Abbildung 4.23: Anteilige Unfallzahlen auf Autobahnen nach Unfallschwere und Reibwert (Destatis, 2021)

Nach (Müller, et al., 2017) sind bereits sehr viele Straßendaten in verschiedenen Projekten erfasst worden. Diese sind breit angelegt, mit dem Ziel, die Abhängigkeit des Reibwerts von der Umgebung zu ermitteln. Dies hat zur Folge, dass die Reibwertklassen hoch und niedrig überpräsentiert werden.

Betrachtet man die aufgenommenen Unfälle mit Todesfolge, so ist zu sehen, dass die Unfälle, die nicht bei niedrigem Reibwert erfolgten, zu 76 % bei hohem und zu 22 % bei mittlerem Reibwert passierten.

Analysiert man die Unfälle mit Personenschäden aufgrund niedrigen und mittleren Reibwerts, so wird deutlich, dass 29 % der Unfälle auf Autobahnen und 20 % auf den restlichen Straßen erfolgten. Eine Begründung hierfür könnte sein, dass die subjektive Einschätzung des Reibwertes auf Autobahnen schwieriger als auf den anderen Straßen ist, was die Notwendigkeit einer Reibwertschätzung für einen Autobahnpiloten unterstreicht. Diese Auswertung und Gegenüberstellung der Unfälle mit Personenschaden je Straßentyp und Reibwert sind in Abbildung 4.24 dargestellt.

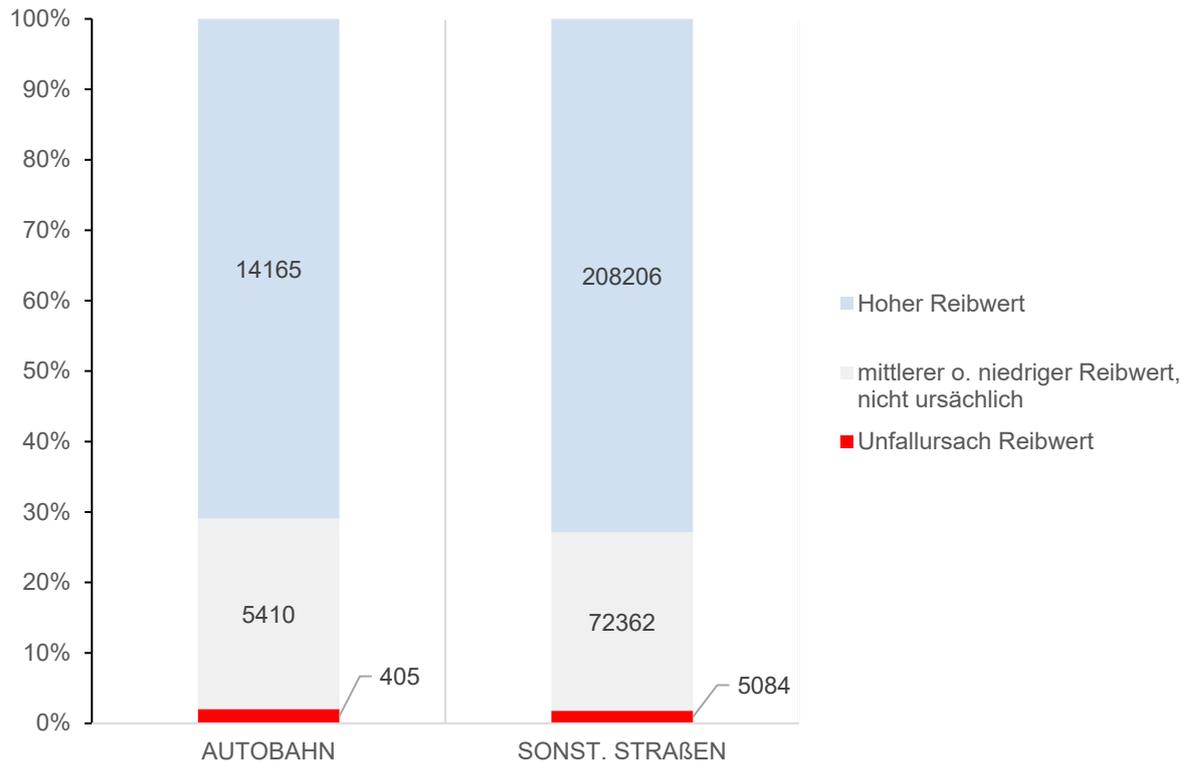


Abbildung 4.24: Gegenüberstellung der Häufigkeiten von Unfällen mit Personenschaden ohne und mit Einfluss des Reibwerts nach Straßentyp (Destatis, 2021)

Abschließend kann gesagt werden, dass bei Fahrten auf der Autobahn der vorliegende Reibwert zu 24 % niedrig oder mittel ist. Berechnet man dazu die gefahrenen Kilometer aus der gesamten Laufleistung in Deutschland, entspricht dies 59 Mrd. Kilometern bei niedrigem oder mittlerem Reibwert. Berechnet man auf dieser Strecke die Unfälle mit Personenschaden, bei denen der Reibwert überschätzt wurde, sind dies 2067 Unfälle. Das bedeutet, dass pro 28,6 Mio. Kilometer ein Unfall mit Personenschaden aufgenommen wurde. Dies entspricht somit der folgenden Wahrscheinlichkeit (38):

$$p_{\text{Personenschaden}} \approx \frac{2067}{59 \times 10^9} = 3,5 \times 10^{-8} \quad (38)$$

### 4.7 Fazit und technische Anforderungen

In diesem Kapitel wurde eingehend aufgezeigt, dass auf der Basis von den Kundenanforderungen und der Use-Case-Betrachtung die Notwendigkeit der Reibwertinformation für künftige Fahrfunktionen besteht. Die anschließende Nutzwertanalyse hat ergeben, dass eine Integration dieser Information vor allem im Bereich der Längsführung bis 130 km/h sinnvoll ist. Im konkreten Fall wurde ein Autobahnpiлот als Zielfunktion erarbeitet. Anschließend wurde aufgezeigt, dass für Systeme mit SAE Stufe 3 und positiver Sicherheitsbilanz der Einsatz eines Reibwertschätzers unabdingbar ist. Nach heutigem Stand der Technik sind Systeme mit einem derartigen Automatisierungsgrad nicht in Serie. Aus diesem Grund existieren Stand heute keine beschlossenen Normen und Gesetze, welche die technologische Umsetzung beschreiben. Damit es dennoch möglich ist, diese Systeme zu entwickeln und zu validieren, werden die in Abschnitt 4.5 erarbeiteten Anforderungen aus den vorliegenden Quellen genutzt.

Das SOTIF-Prinzip wird als Vorgehensmodell für die vorliegende Forschungsaufgabe genutzt. In Abbildung 4.25 ist zu sehen, wie die kommenden Abschnitte dem SOTIF-Vorgehensmodell zugeordnet sind. Beispielhaft wird der iterative Prozess mit dieser Forschungsaufgabe durchlaufen und ein Fazit gebildet. Dieses kann zum einen die Freigabefähigkeit, zum anderen Handlungsfelder für eine weitere Iterationsschleife beschreiben.

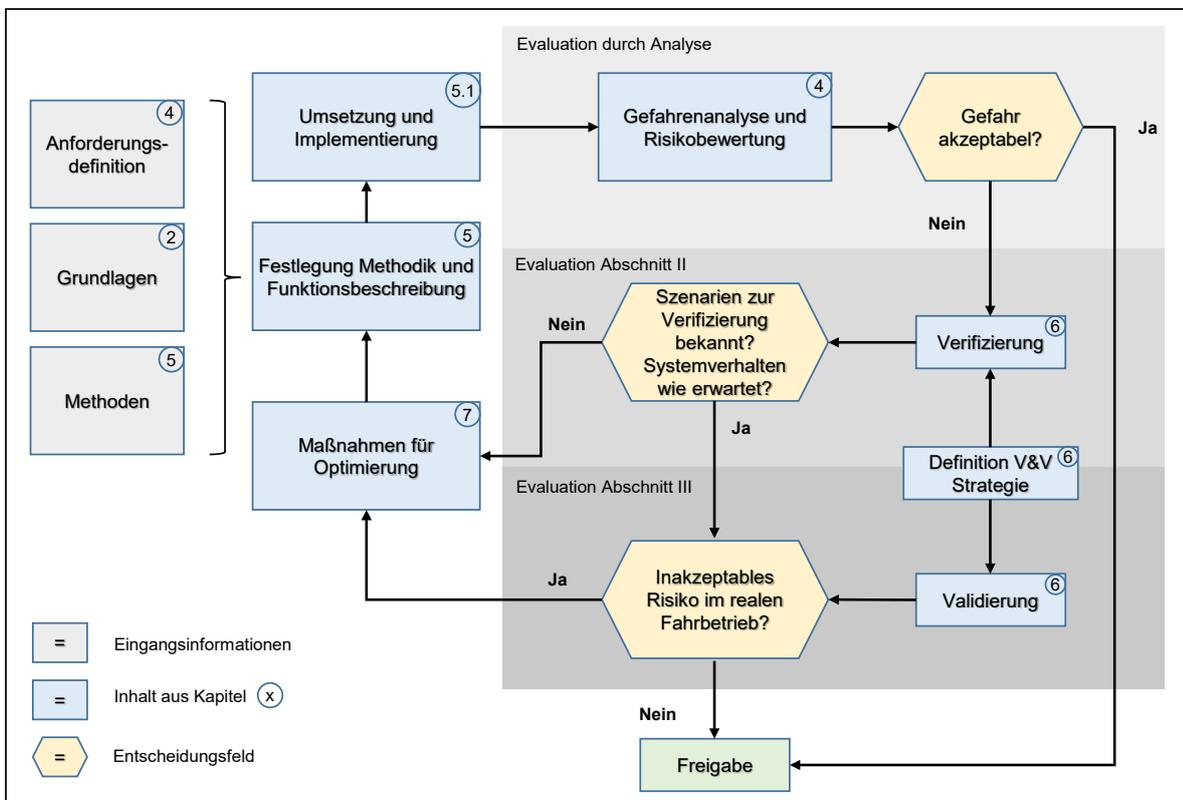


Abbildung 4.25: Vorgehensmodell der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an SOTIF

Als Erstes werden die Risiken aus der automatisierten Längsführung mit Reibwertschätzung analysiert. Dazu werden die Strategie der Längsführung, die physikalischen Wirkketten und die Verwendung der Unfallstatistik betrachtet. Anhand dieser Betrachtung wird ein Validierungsziel mit der Darstellung von überprüfbaren Metriken definiert.

Anschließend wird die beschriebene Vorgehensweise genutzt, um die identifizierten Gefahren und Risiken mit der Hilfe von einer Verifizierungs- und Validierungsstrategie abzusichern. Die Absicherung des Systemverhaltens und dessen Evaluierung umfasst ein bekanntes Szenario. Bei den Validierungsaktivitäten im realen Umfeld kann direkt überprüft werden, inwiefern sich der definierte Zielwert der Validierungsmetrik für das Gesamtsystem erfüllt. Als Ergebnis wird die Freigabetauglichkeit für das Gesamtsystem nach den definierten Risikobilanzen geprüft. Falls Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheitsbilanz getroffen werden müssen, werden diese implementiert und erneut überprüft.

## 5 Methodik und weitere Vorgehensweise

Ausgehend von den Kundenanforderungen, dem Stand der Technik und wissenschaftlichen Recherchen wird deutlich, dass die Verwendung von fahrzeuginternen Sensoren zur Reibwertschätzung ausreichend ist. Basierend auf Wintererprobungsdaten, die in wissenschaftlichen Arbeiten weiterverarbeitet wurden, wurde ein Algorithmus konzipiert, der unter Verwendung einer Fuzzy-Logik und eines Sensordatenfusionsmodells den Reibwert schätzt. Da diese Methode einen vielversprechenden Ansatz liefert, wird diese im Folgenden weiter vertieft und zur Anwendung gebracht. Der geschätzte Reibwert wird in Systemen größer gleich SAE Stufe 3 integriert. Dabei werden Sicherheitsbilanz, Verlässlichkeit und Verfügbarkeit eine zentrale Rolle zugeschrieben. Ein überschätzter Wert kann bei der Längs- sowie Querführung erhebliche Sicherheitsrisiken herbeiführen. Aus diesem Grunde werden im Kapitel 6 die Anforderungen und das Validierungskonzept in Bezug auf die Reibwertschätzung erstellt. Da der derzeitige Stand der Technik kein serienreifes System dieser Art abbildet und es keine finalen Gesetze gibt, werden die in Kapitel 4 erarbeiteten Grundlagen verwendet und ein Anforderungs- und Validierungskonzept abgeleitet. Dieses Vorgehen wird in Anlehnung an (Wood, et al., 2019) beschrieben. Des Weiteren wurde mit dem SOTIF-Ansatz eine Vorgehensweise beschrieben, die richtungweisend für kommende Funktionsentwicklungen ab SAE Stufe 3 zur Anwendung gebracht wird. Dementsprechend wird die Funktionsentwicklung der vorliegenden Arbeit exemplarisch an den prozessualen SOTIF-Ablauf angelehnt. Stellt sich bei der iterativen Entwicklung der Zielfunktion und der Absicherung dar, dass bereits die erste vollumfängliche Durchführung positiv erfolgt und das Restrisiko akzeptabel ist, ist das System freigabefähig. Falls das nicht der Fall ist, werden Handlungsfelder aufgezeigt, optimiert und der iterative Prozess zur Absicherung erneut gestartet. Für eine valide Sicherheitsbetrachtung muss im Vorfeld eine detaillierte Funktionsbeschreibung und deren Systemabgrenzungen erfolgen. Bei der Funktionsbeschreibung ist darauf zu achten, dass die Festlegung der Operationsdomäne (ODD) so ausgelegt wird, dass die Verwendung des Reibwertschätzer nur dann eingesetzt werden kann, wenn die Verlässlichkeit ausreichend groß ist. Diese Auslegung bildet einen Zielkonflikt mit der Verfügbarkeit (Abbildung 5.1).

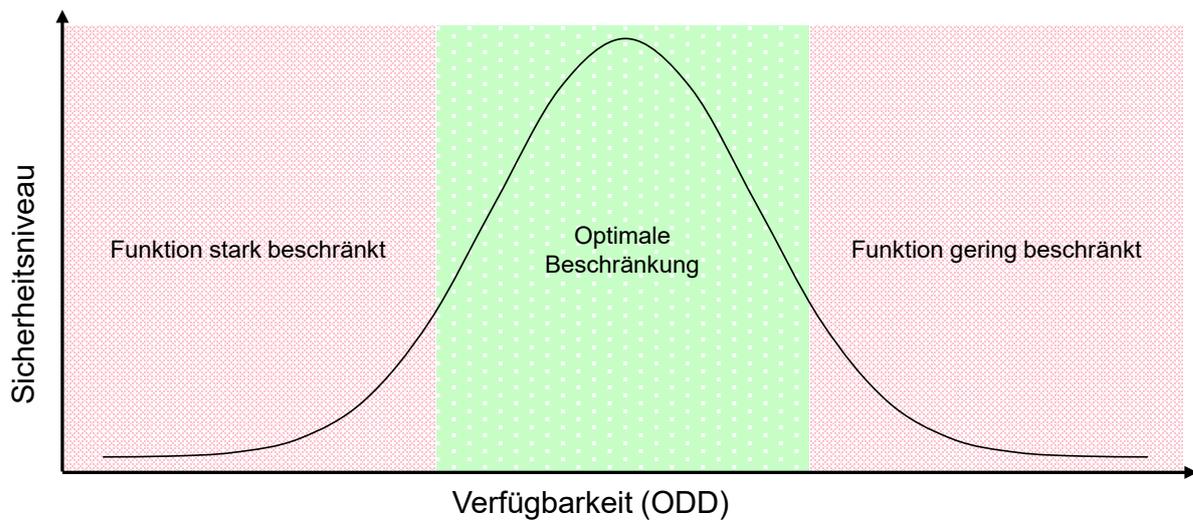


Abbildung 5.1: Sicherheit über Verfügbarkeit einer Funktion nach (Wood et al. 2019)

Diese Abbildung verdeutlicht, dass die auftretenden Sicherheitsrisiken einer Perzeptionsfunktion korrelieren mit der optimalen Beschränkung einer Funktion und somit der ODD. Damit die ODD sinnvoll gewählt wird, werden mit Hilfe einer User-Story Kundenfunktionen analysiert und das Funktionskonzept so definiert, dass die Funktion unter realen Bedingungen getestet werden kann.

Für die vorliegende Arbeit wird der zu entwickelnde Algorithmus in ein seriennahes Versuchsfahrzeug integriert. Die Sicherheitsbewertung kann im Anschluss mit vorliegender funktionaler und technischer Systembeschreibung erfolgen. Bei der Sicherheitsbewertung werden vorab mögliche Gefahren und Risiken analysiert. Diese Analyse bezieht sich im vorliegenden Fall vor allem auf die detaillierte Betrachtung der reibwertbasierten Längsführung. Dazu werden die physikalischen Wirkprinzipien der Längsführung und deren Umsetzung in einem Fahrzeug analysiert. Damit ein Validierungsziel definiert werden kann, wird die Unfallstatistik herangezogen und prüfbare Metriken definiert.

In Verifizierungs- und Validierungsstrategie (Kapitel 6) wird ein Nachweis der Sicherheit der Sollfunktion für die identifizierten Risiken und Gefahren der reibwertgestützten Längsregelung erbracht. Dazu wird die in Abschnitt 4.5.3 vorgestellte Best-Practices-Methode herangezogen.

Damit das Systemverhalten mittels Fahrversuch überprüft werden kann, wird ein definierbares und bekanntes Fahrmanöver verwendet. Die Ergebnisse daraus werden mit den aus Kapitel 4 erarbeiteten Anforderungen abgeglichen. Falls das Systemverhalten das geforderte Sicherheitsniveau nicht erreichen sollte, müssen Maßnahmen zur Optimierung definiert werden. Damit diese Optimierung strukturiert durchgeführt werden kann, wird der erarbeitete Prozessablauf (Abbildung 4.25) verwendet.

## 5.1 Umsetzung

Über die Einleitung, die Grundlagen und vor allem die Anforderungsanalyse konnten die notwendigen Informationen zu der Erfassung des Straßenzustandes abgeleitet werden. Außerdem konnten durch die übergreifende Analyse der Kundenfunktionen mit Hilfe der Use-Case-Methode und Nutzwertanalyse eine Zielfunktion und deren Absicherungsmethodik<sup>30</sup> identifiziert werden.

Damit diese Anforderungen umgesetzt werden können, wurden vorab die einzelnen Eingangsparameter des Fusionsmodells benannt. Die Umsetzung der Fuzzy-Logik wird in einem MATLAB-Simulink-Modell dargestellt. Dazu werden zunächst die Regelbasis und die Eingangswerte beschrieben. Des Weiteren sind verschiedene Erweiterungen wie zum Beispiel die Erstellung des Referenzreibwerts, die anschließend beschrieben wird, im kommenden Teilabschnitt erläutert. Eine wichtige Rolle vor der Ausgabe des Reibwerts spielt die Sensitivität zwischen Verfügbarkeit und Reaktion auf Veränderung des Systems. Diese Herausforderung wurde in einem iterativen Prozess und innerhalb der Fuzzy-Logik optimiert. Dabei wird die Sensitivität der Regelbasis auf der Grundlage von Expertenwissen gebildet und validiert. Diese Informationen werden mit Grundlagen aus dem Kapitel 2 (Reifen und Interaktion mit der Fahrbahn) ergänzt.

Darauf aufbauend wird ein Modi-Manager entwickelt, der wie ein Zustandsautomat die Schätzwerte aus dem MATLAB-Modell überwacht. Gerade bei sogenannten Corner-Cases ist es wichtig, sehr schnell auf Veränderungen des tatsächlichen Reibwerts reagieren zu können. Dazu werden spezifische Corner-Case Merkmale in dem Modi-Manager definiert und implementiert, die bei Eintreten die Fuzzy-Logik überregelt und die Ausgabe des Reibwerts sofort angepasst.

Des Weiteren wird ein datenbasierter ML-Algorithmus verwendet, um die Regelbasis der Fuzzy-Logik auf der Grundlage von Messdaten zu erstellen. Dabei wird die Fuzzy-Logik so trainiert, dass die Ausgabe der menschlichen Interpretation entspricht.

Beide Varianten werden umgesetzt und in Kapitel 6 (Verifizierung und Validierung) verglichen.

---

<sup>30</sup> Function under Test (FuT)

## 5.2 Funktionsbeschreibung und Algorithmus

Aus der detaillierten Funktionsbeschreibung ist zum einen die Implementierung und zum anderen die Sicherheitsanalyse zu definieren. Die Beschreibung wurde im Rahmen dieser Arbeit mit der Use-Case-Betrachtung erarbeitet und durchgeführt (siehe Abschnitt 4.1). Dabei wurde der Mehrwert für den Kunden dargestellt und die technischen Anforderungen zur Umsetzung und Erfüllung definiert. Als Grundlage für die Funktionsentwicklung des Fahrbahnzustandschätzers wird ein Fusionsalgorithmus entwickelt. Bei der Fusionierung und Umsetzung des Schätzers sind Zielkonflikte zwischen Komfort und Sicherheit so gut wie möglich auszugestalten. Dabei wird eine gewisse Verfügbarkeit des Gesamtsystems erwartet, was dazu führt, dass Extremwerte oder falsch erfasste Informationen nicht direkt zu einer Degradation oder sogar zu einem Abwurf führen. Dementgegen ist eine sofortige Anpassung des Fahrzeugverhaltens über Zeit und Wegstrecke aufgrund einer Veränderung des Straßenzustandes gewünscht. Damit dieser Zielkonflikt vollständig aufgelöst werden kann, ist eine Weiterentwicklung der Sensortechnologien in Bezug auf Robustheit und Sensitivität notwendig. Bei der heutigen Umsetzung in Serienfahrzeugprojekten ist dies aus wirtschaftlichen Gründen nur bedingt möglich. Aus diesem Grund werden auf die in Kapitel 3 definierten Sensoren zurückgegriffen. Die Umsetzung und Integration der Sensorsignale erfolgt mit Hilfe eines Funktionsalgorithmus. Damit die Sensitivität zwischen Verfügbarkeit und Reaktion auf Veränderung auf dem gewünschten Niveau ist, wird das Systemverhalten iterativ entwickelt. Die Grundlage zur Ausgestaltung sind zwei Ansätze, die beide mit einer Fuzzy-Logik umgesetzt werden können.

Erstens: Die Sensitivität der Regelbasis wird auf der Basis von Expertenwissen gebildet. Die Grundlage für dieses Wissen wurde anhand von vielen Fahrversuchen validiert. Dabei wurden mehrere tausend Kilometer mit verschiedenen Fahrzeugen und in diversen geografischen Gebieten absolviert. Des Weiteren werden die aus Kapitel 2 erarbeiteten Grundlagen der Regelbasis hinzugefügt. Da die menschliche Erfahrung zur Einschätzung des vorliegenden Straßenzustandes sehr gut ist, führt die Kombination mit den fahrdynamischen Grundlagen zu einer stabilen Regelbasis.

Zweitens: Als weiterer Ansatz wird ein datenbasierter Machine-Learning (ML)-Algorithmus verwendet, um die Regelbasis der Fuzzy-Logik auf der Grundlage von Messdaten zu erstellen. Dabei werden die Eingangs- und Ausgangsgrößen genutzt, um die Fuzzy-Logik so zu trainieren, dass diese der menschlichen Interpretationsweise entspricht. Für einen gut trainierten Algorithmus wird eine große Datenbasis benötigt. Damit beide Varianten miteinander verglichen werden können, werden beide umgesetzt und in Kapitel 6 (V&V) verglichen.

Die Umsetzung der Varianten erfolgt in MATLAB Simulink. Dabei wurden in dieser Arbeit folgende fünf Subsysteme entwickelt, die im weiteren Verlauf ausführlich beschrieben werden.

1. Eingangsdaten,
2. Referenzwertberechnung,
3. Zustandsautomat,
4. Fuzzy-Logik,
5. Datenausgabe.

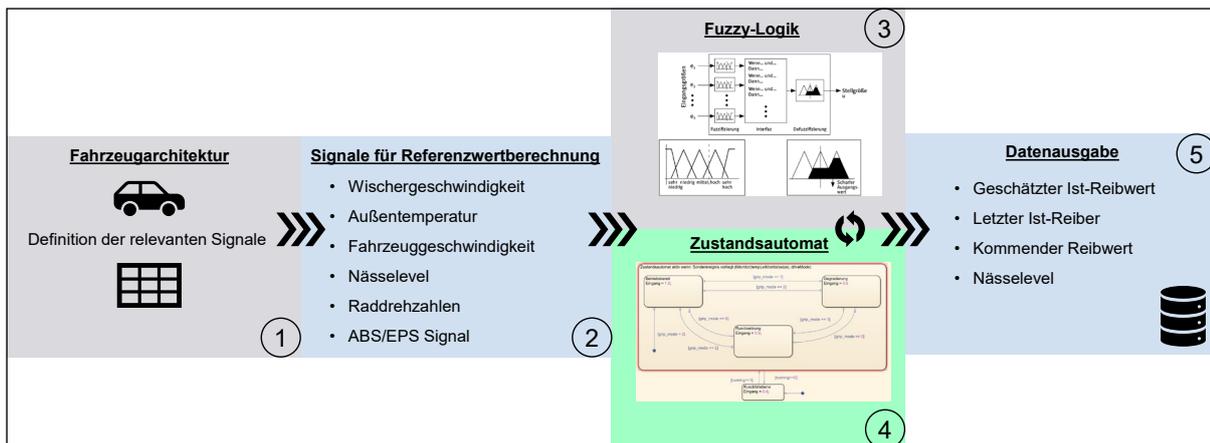


Abbildung 5.2: Aufbau des Simulink-Modells

### 5.2.1 Schnittstellen Eingangsdaten und Datentransfer

Als erste Schnittstelle sind die Eingangsdaten zu nennen. Diese kommen aus den Sensordaten und bedienen den Algorithmus und das Fusionsmodell. Dabei werden folgende Sensordaten berücksichtigt:

1. die Drehzahl des Scheibenwischermotors (Stärke Niederschlag),
2. die Ausgabe der Körperschallsensoren im Radhaus (Fahrbahn­nässegrad),
3. die Umgebungstemperatur,
4. die Fahrzeuggeschwindigkeit (GPS) und
5. die Ausgabe der Raddrehzahlsensoren.

Mit diesen Eingangswerten sind die Anforderungen aus Kapitel 2 abgedeckt. Der Reifenzustand und die Oberflächenstruktur der Fahrbahn werden aufgrund fehlender Sensorik nicht erfasst. Jeder einzelne Eingangsparameter wird vom jeweiligen Steuergerät so aufbereitet zur Verfügung gestellt, dass die weitere Verarbeitung in der Fuzzy-Logik erfolgen kann. Dabei wird zum Beispiel ein gleitender Mittelwert mit Fensterlänge vier Sekunden für das stark schwankende Signal des Scheibenwischermotors implementiert. Abbildung 5.3 zeigt die Eingangssignale, Filterung und Weitergabe an die Fuzzifizierung.

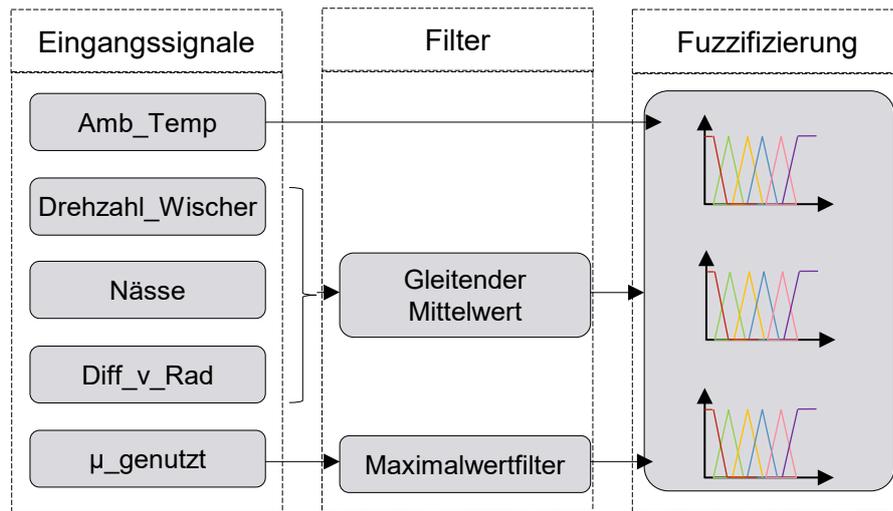


Abbildung 5.3: Schnittstellen, Eingangsdaten und Filter

In Abbildung 5.4 wird unter anderem die Schnittstelle zu CANape aufgezeigt. In CANape<sup>31</sup> kann das Modell so gesteuert werden, dass es entweder im Prototypen-Modus offline läuft oder mit einer kabelgebundenen Schnittstelle zu CANape online im Fahrzeug ausgeführt werden kann. Dies hat den Vorteil, dass im Offline-Modus die bereits eingefahrenen Daten (MDF-Files) in MATLAB geladen und interpretiert werden können. Mit dieser Vorgehensweise konnte der Schätzalgorithmus außerhalb des Fahrzeugs permanent weiterentwickelt werden. Dies hat den Vorteil, dass teure Erprobungsträger und Entwicklungsfahrten deutlich reduziert werden können. Die Online-Anbindung ist in Abbildung 5.4 zu sehen.

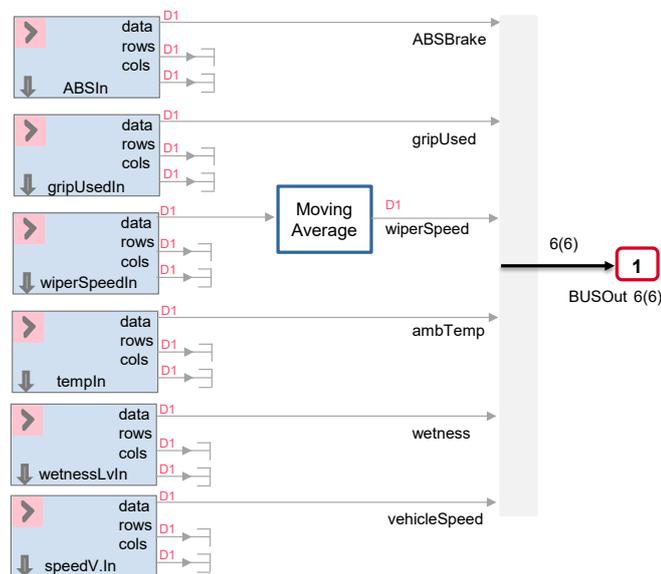


Abbildung 5.4: Schnittstelle zu CANape

<sup>31</sup> Ist eine Software für Mess-, Diagnose-, und Flash-Anwendungen. Siehe auch: <https://www.vector.com/de/de/>

Die Online-Anbindung wird für die Versuchs- und Messfahrten benötigt. Dabei werden in CANape die zu messenden Signale definiert und über die BUS-Schnittstelle ausgelesen. In der vorliegenden Arbeit wurden das ABS-, Temperatur-, Wischer-, Nässelevel- und Geschwindigkeitssignal abgegriffen. Das Signal „gripUsedIn“ ist ein virtuell berechnetes Signal. Dieses ist wichtig für den Steigungsausgleich der Reibwertschätzung und wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 5.2.1 Aufbereitung des Referenzreibwertes

In Subsystem zwei wird der Referenzreibwert gebildet. Da dieser eines der wenigen Referenzgrößen für die Güte des Reibwertschätzers ist, ist dieser sehr wichtig. Berechnet wird er unter anderem mit den Signalen aus der Fahrzeugbeschleunigung in x-, y-Richtung, Steigung und dem ABS-Signal. So wird bei einer Vollbremsung mit ABS- oder ESC-Eingriff fortlaufend ein Mittelwert des genutzten Reibwerts gebildet. Dieser Vorgang ist in mit Abbildung 5.5 dargestellt.

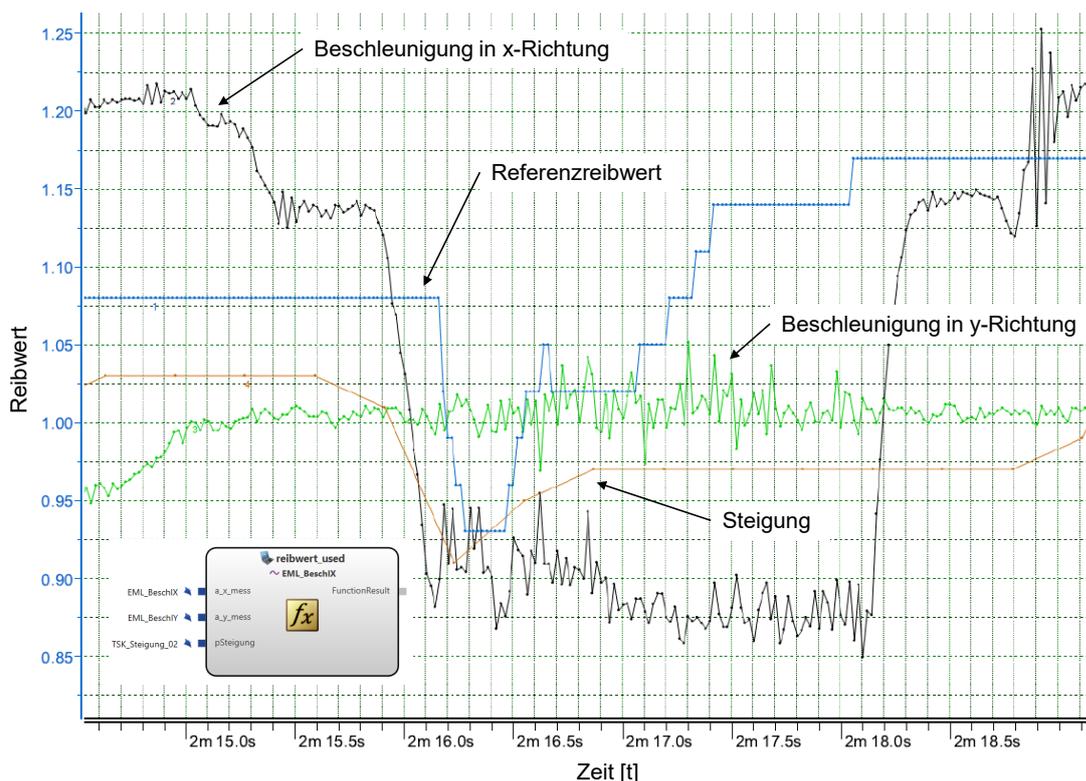


Abbildung 5.5: Bildung des Referenzreibwertes

Der Referenzreibwert kann mit der richtigen Konfiguration und Umrechnung direkt in CANape visualisiert werden. Auf der Basis kann die prädiktive Reibwertschätzung bei jeder Erprobungsfahrt iterativ verbessert werden. Des Weiteren ist die Bildung eines Referenzreibwertes für die vorliegende Arbeit notwendig, damit in Kapitel 6 die V&V-Strategie aufgesetzt und durchgeführt werden kann.

## 5.2.2 Modi-Manager

Als weiteres Subsystem wird der „Modi-Manager“ vorgestellt. Grundlegend kann dieser mit einem Zustandsautomaten verglichen werden. Die Umsetzung und Implementierung erfolgt in MATLAB-Simulink mit dem Plug-in *Stateflow*. Mit Hilfe des „Modi-Managers“ kann die laufende Funktion des Schätzers überwacht werden. Hierzu werden spezifische Corner-Cases definiert und hinterlegt. Ein Beispiel hierfür sind die Raddrehzahlen. Erfassen die Raddrehzahlsensoren unterschiedliche Schlupfgrößen, wird das als Corner-Case erfasst. Beschreibt man den Ablauf, so beginnt dieser mit den einfachen Zuständen aktiv und inaktiv. Weitergehend gibt es die Betriebsphasen: *Betriebsbereit*, *Rücksetzung* und *Degradierung*. Über eine definierte Variable wird der Übergang der einzelnen Phasen festgelegt. Der Wert der Variable wird von der Wahrheitsmatrix (*gripTable*) aus den Beziehungen, *WENN*, *DANN* ermittelt. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass, abgesehen von der kontinuierlichen Reibwertschätzung, ohne Eingriff in den Regelschätzer bestimmte Corner-Cases separat betrachtet, berücksichtigt und ausgegeben werden können. Dabei werden die Werte der Corner-Cases ebenfalls in der Wahrheitsmatrix als Anforderungen für definierte Sensorwerte beschrieben. Werden diese erfüllt, werden die Fuzzy-Logik und die Ausgabe des Reibwertes überregelt. Beispiele hierfür sind die unterschiedliche Drehzahl der Räder oder unplausible Abweichungen der Drehzahl des Wischermotors. Beide können Anzeichen für ein Reibwertsprung sein. Damit Reibwertsprünge identifiziert werden können, wurde eine Funktion implementiert, die sich *tMonitor* und *wMonitor* nennt. Dabei werden innerhalb von vier Sekunden die maximale und minimale Wischerdrehzahl sowie die Temperatur verglichen. Wird eine Differenz in Höhe von 10 U/min sowie 2 °C überschritten, wird aufgrund der Definition der Wahrheitsmatrix der Operationsmodus im „Modi-Manager“ auf *Rücksetzung* gesetzt. *Rücksetzung* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Schätzung des vorliegenden Reibwertes nach oben begrenzt wird und einen festen Wert einnimmt. Dieser Ablauf ist mit der Abbildung 5.6 dargestellt und wird in Abschnitt 6.3.3 für den Fall Reibwertsprung verifiziert.

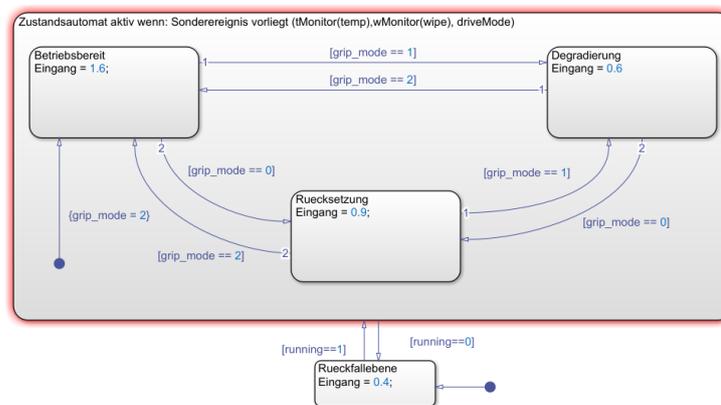


Abbildung 5.6: Modi-Manager/Zustandsautomat zur Reibwertschätzung

### 5.2.3 Fuzzy-Logik

Die Fuzzy-Logik ist als Toolbox in MATLAB Simulink integriert. Im vorliegenden Fall ist wie zuvor beschrieben, die Fuzzy-Logik ein Subsystem. Die Fusionslogik ist anhand eines Inferenzsystems beschrieben. Dieses Inferenzsystem ist eine eigene Datei, in der die zu verarbeitenden Eingangswerte anhand des Expertenwissens und Erprobungsdaten zugewiesen werden. Der ML-Algorithmus verarbeitet diese Eingangsdaten und stellt einen gewissen Zustand als Ausgangsdaten zur Verfügung. Bei der Anwendung bietet eine Prototyping-Funktion die Möglichkeit zur zeitabhängigen Auswertung der Fuzzy-Regeln.

Das heißt, die Eingangsdaten aus den Messwerten der Wischergeschwindigkeit, die Umgebungstemperatur, Fahrzeuggeschwindigkeit und das Nässelevel werden anhand einer Zugehörigkeitsfunktion in linguistische Variablen übersetzt. Für die Drehzahl des Wischermotors ist dies in Abbildung 5.7 dargestellt.

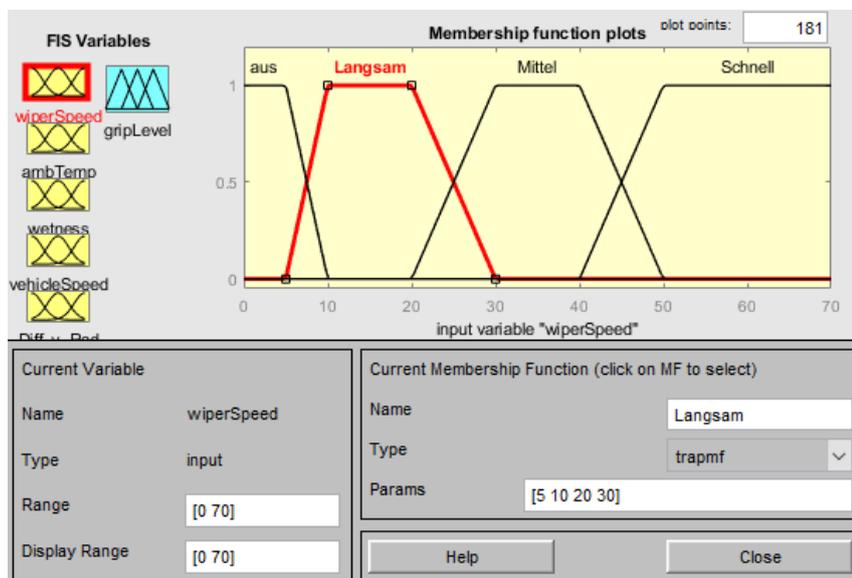


Abbildung 5.7: Fuzzy-Logik – Zugehörigkeitsfunktion Wischermotor

Anhand dieser Abbildung ist zu sehen, wie sich einzelne Drehzahlbereiche überschneiden. Aus diesen Überschneidungen lassen sich gewichtete Zwischengrößen ableiten, die wiederum als Eingangsgröße für die Berechnung des Reibwertes genutzt werden.

Eine weitere wichtige Zugehörigkeitsfunktion ist der Nässesensor, der im Radhaus verbaut ist. Hierbei wurde das Inferenz-System in die drei Klassen: trocken, nass und sehr nass eingeteilt. Die Klassen nass und sehr nass wurden im Verlauf dieser Arbeit deutlich vergrößert. Der Grund hierfür war die Überschätzung des Reibwertes. Hierbei war zu sehen, dass die Applikation des Nässesensors sehr lange die Klasse „1“ ausgibt und die Interpretation der Fahrer den Reibwert geringerer einschätzen. Somit geht für die Berechnung des Reibwertes ein sensitiverer Nässelevel ein. Dargestellt in Abbildung 5.8.

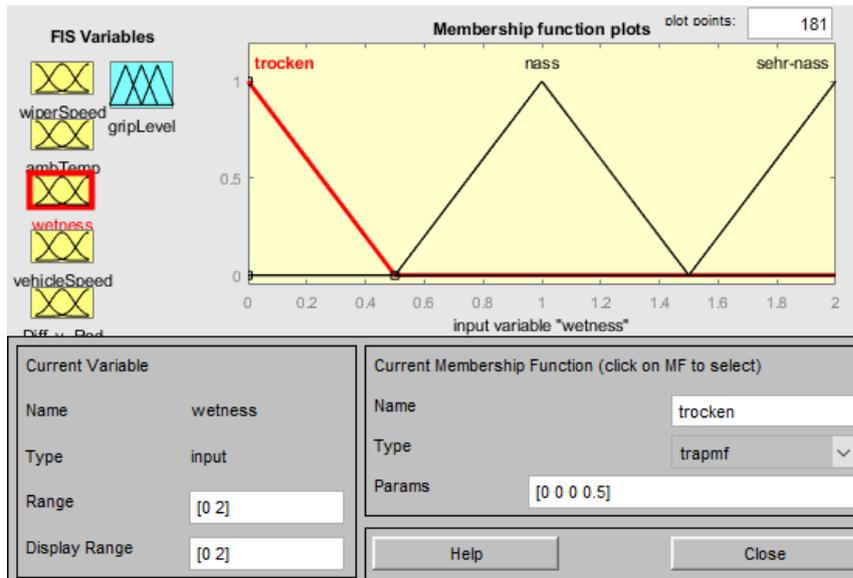


Abbildung 5.8: Fuzzy-Logik – Zugehörigkeitsfunktion Nässesensor

Aufbauend auf den linguistischen Variablen können linguistische Prämissen (WENN-DANN-Regeln) abgeleitet werden. Für die Konklusion des Gesamtsystems werden Verknüpfungen über logische Operatoren, „UND ( $\wedge$ ), ODER ( $\vee$ ) und NICHT (!)“, ergänzt und schlussendlich wird ein gewichteter Reibwertparameter ausgegeben. Dieses komplexe Zusammenspiel von Regelbasis, logischen Operatoren und gewichteter Konklusion wird in Tabelle 5.1 aufgezeigt.

	Wischer Drehzahl	und/ oder	Nässe-Le-vel		Temperatur	und/ oder	Geschw.		Reibwert	gew.
WENN	SCHNELL			$\vee$	EISKALT			DANN	NIEDRIG	1
WENN	AUS	$\wedge$	TROCKEN	$\wedge$	WARM			DANN	HOCH	1
WENN	MITTEL	$\wedge$	TROCKEN					DANN	MITTEL	1
WENN					KALT			DANN	MITTEL	0,75
WENN			SEHR NASS	$\wedge$	EISKALT			DANN	NIEDRIG	0,5
WENN			NASS			$\wedge$	SCHNELL	DANN	MITTEL	0,5
WENN	LANGSAM			$\vee$	EISKALT			DANN	HOCH	0,5
WENN	LANGSAM							DANN	MITTEL	0,5
WENN	MITTEL	$\wedge$	NASS			$\wedge$	SCHNELL	DANN	MITTEL	0,5
WENN	MITTEL					$\wedge$	SCHNELL	DANN	MITTEL	0,5
WENN			SEHR NASS			$\wedge$	SCHNELL	DANN	NIEDRIG	0,5
WENN			! TROCKEN	$\wedge$	EISKALT			DANN	NIEDRIG	0,5

Tabelle 5.1: Regelbasis, Bedingungen für Eingangsgrößen und gewichtete Konklusion für den Reibwert

Werden für alle Eingangsgrößen konstante Werte angenommen, können aufgrund der vorliegenden Regelbasis bis zu zwei Eingangsgrößen visualisiert werden. Als Beispiel hierfür wird

in Abbildung 5.9 die Konklusion der Regelbasis mit einer Wischerdrehzahl von 15 U/min und einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h in Verbindung mit einem Nässelevel und der Umgebungstemperatur aufgezeigt. Deutlich wird hierbei, dass der Reibwert bei Fahrten auf nassen Autobahnen und bei niedrigen Temperaturen stark abfällt.

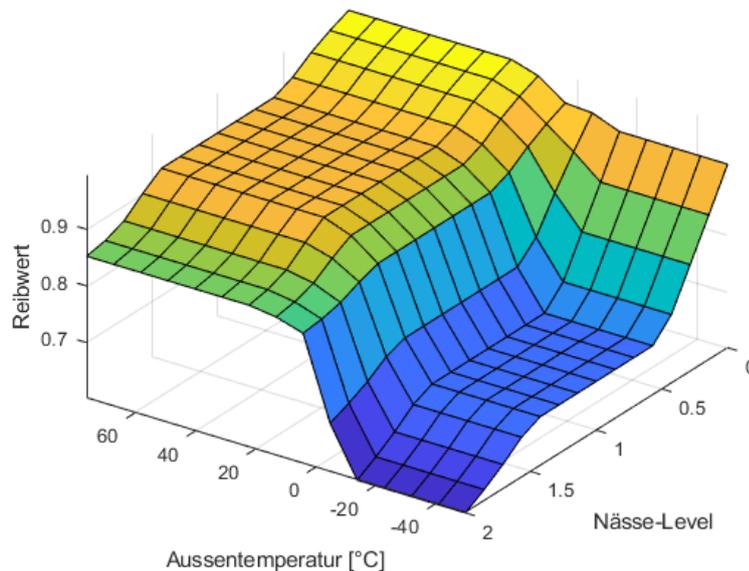


Abbildung 5.9: Reibwert in Abhängigkeit von Außentemperatur und Nässelevel

## 5.2.4 Neuro-Fuzzy-Ansatz

Wie eingangs erwähnt, gibt es eine weitere Möglichkeit, die Regelbasis zu erstellen. Diese basiert nicht auf dem Wissen von Experten, sondern auf der Basis von vielen Messdaten. In MATLAB Simulink kann dies mit der adaptiven Neuro-Fuzzy-Logik (ANFIS) umgesetzt werden. Hierbei wird das Inferenzsystem automatisch generiert. Mit der Hilfe von einem überwachten Trainingsprozess wird anschließend die Regelbasis festgelegt. Der Zusammenhang von Messwerten und Reibwertparameter wird mit einem definierten Trainingsdatensatz angelernt.

In der vorliegenden Arbeit werden die Erprobungsdaten genutzt, um eine erste Aussage zum Einsatz einer Neuro-Fuzzy-Logik zu bekommen. Dazu wurde das Training der adaptiven Neuro-Fuzzy-Logik mit den validierten Referenzreibungswerten und Messreihen/Datenpunkten durchgeführt. Dabei werden mit einem Backpropagation-Algorithmus alle trainierbaren Eingangsparameter iterativ so verbessert, dass der Fehler der Reibwertausgabe und des Referenzwerts minimiert wird. Als erster Ansatz zur Optimierung wurde eine vollfaktorielle Kombination der Eingangsparameter verwendet. Bei dieser Anwendung wird für alle möglichen Kombinationen an linguistischen Variablen eine Regelbasis erstellt. Das heißt, bei vier Eingangsvariablen mit jeweils drei Ausprägungen entstehen 81 Regeln und mindestens 400 trainierbare

Parameter. Der Datensatz aus der Erprobung, bei dem der Referenzreibungwert bekannt ist, besteht aus 211 Zeilen. Daher ist bei dieser Vorgehensweise ein „*Overfitting*“ des Modells zu erwarten. Optimierungsmaßnahmen wie zum Beispiel die Erhöhung der Validierungsdaten und Reduzierung der Lernepochen ergaben kein robustes Modell, sodass unter Verwendung einer Messdatei abweichend von den erlernten Messwerten ein plausibler Reibwert geschätzt wird.

Der zweite Ansatz wurde mit einem Clusterverfahren erstellt. Wie in Abbildung 5.10 zu sehen ist, konnten die Anzahl der trainierbaren Parameter und die Regelbasis deutlicher reduziert werden. Das „*Overfitting*“ kann dadurch vermindert werden.

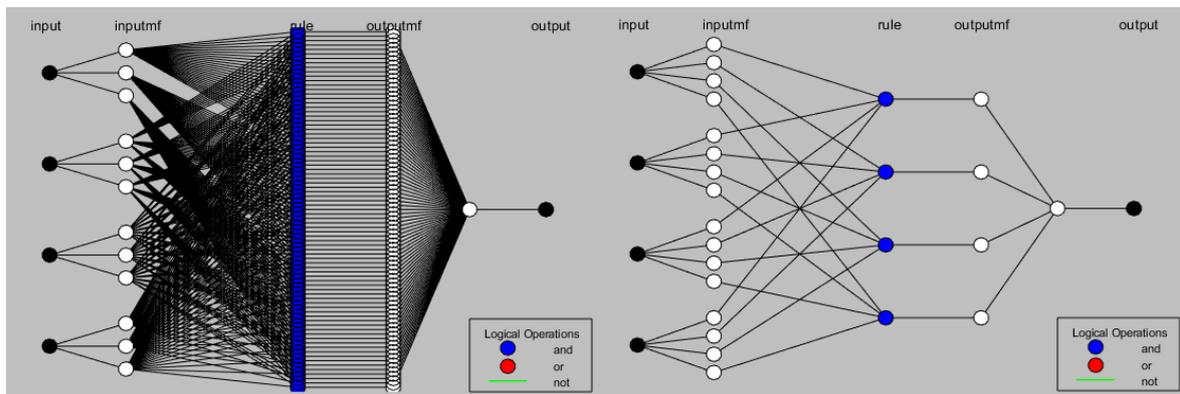


Abbildung 5.10: Vergleich Netzstrukturen nach grid-partitioning (li) und subtractive clustering (re)

Erste Anwendungen und Auswertungen zeigen plausible Ergebnisse. Vergleicht man diese mit den Ergebnissen aus der konventionellen Fuzzy-Logik, wird trotzdem sichtbar, dass die Genauigkeit und Robustheit nicht auf dem gewünschten Niveau sind (siehe Abbildung 6.6). Als Beispiel ist zu erkennen, dass trotz vorliegender Messgröße eines Bremsmanövers ein umgekehrter Zusammenhang der Geschwindigkeit angelernt wurde. Daher kann der Algorithmus nicht erkannt haben, dass zum Zeitpunkt der Reibwertausgabe eine Messung des Reibwertes anhand einer Verzögerung vorlag. Diese Regel kann nicht explizit nachvollzogen werden, was somit auch den Nachteil der ML-Algorithmen widerspiegelt. Die Entscheidungskette eines trainierten Modells ist nicht durchgängig nachzuvollziehen und somit für den Einsatz von sicherheitsrelevanten Funktionen und zum Stand dieser Arbeit nicht anwendbar. In Abbildung 5.11 werden die Anwendung und Auswertung der Neuro-Fuzzy-Logik anhand einer Messdatei aufgezeigt. Der Plot zeigt alle Informationen zum geschätzten und tatsächlichen Reibwert, zu der Wischerdrehzahl, der Temperatur, der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Nässelevel.

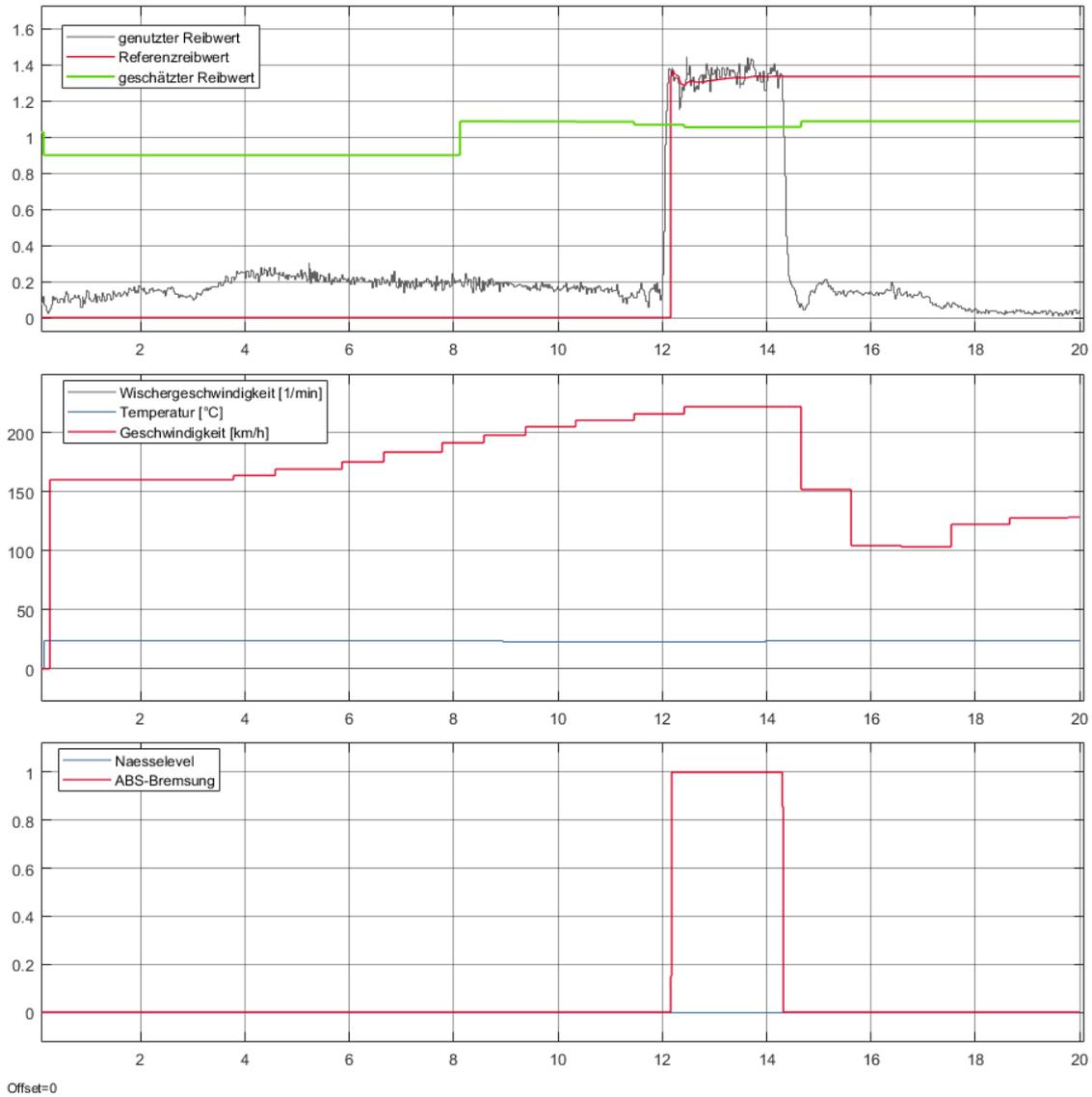


Abbildung 5.11: Auswertung einer Messung mit einer Neuro-Fuzzy-Logik

## 6 Verifizierung und Validierung

Im Vergleich heutiger Fahrerassistenzsysteme und kommender Systeme größer gleich SAE Stufe 3 wird deutlich, dass die Anzahl an Absicherungsszenarien drastisch ansteigt. Diese enorme Anzahl an zu beherrschenden Situationen steigert die Komplexität in solch einem Maß, dass es aus Kosten- und Zeitgründen nicht möglich ist, eine vollumfängliche Validierung analog den heutigen Systemen durchzuführen. Daher werden neue Validierungs- und Verifikationsmethoden benötigt, die es ermöglichen, vernetzte und automatisierte Funktionen in jeder möglichen Situation abzusichern und freizugeben. Dabei stellt die Absicherung der „sensor false positive“<sup>32</sup> eine große Herausforderung dar.

Im kommenden Kapitel wird, basierend auf der aktuellen Literatur und den in Kapitel 4 beschriebenen Anforderungen aus SOTIF und Best Practices, das beschriebene Validierungsziel erstellt und die Forschungsaufgabe abgesichert. Im ersten Teilkapitel werden die Erkenntnisse aus den beiden Vorgehensmodellen zusammengefasst, auf die vorliegende Arbeit projiziert und eine Handlungsempfehlung für den Anwendungsfall abgeleitet.

Daraufhin wird der Versuchsaufbau mit der Hard- und Software zur Durchführung der Validierung beschrieben. Die ersten Testfahrten werden auf dem Prüfgelände (PG) der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG durchgeführt. Dabei sind die Messtechnik, deren Verbau und das Gesamtfahrzeug freizugeben, bevor die Validierung auf öffentlichen Straßen beginnen kann.

Die anstehenden Erprobungsstrecken wurden aus den Use-Case-Betrachtungen und nach dem Routenprofil wie Höhe, Temperaturdifferenz, Straßenverhältnissen definiert. Im Anschluss wird eine Methodik zur Datenerfassung und Auswertung erstellt. Nach den Erprobungsfahrten werden die Daten gesamtheitlich ausgewertet, dargestellt und die Güte des Schätzers wird bewertet. Abschließend werden nochmals auf dem Prüfgelände verschiedene Versuche wie zum Beispiel der  $\mu$ -Sprung nachgefahren und die Performance des Schätzers wird bewertet.

---

<sup>32</sup> System löst ohne ersichtlichen Grund aus

## 6.1 V&V-Strategie

Die zu erarbeitende V&V-Strategie verfolgt das Ziel, die in Abschnitt 4.6 hergeleiteten Anforderungen mit dem Gesamtsystem abzusichern. Der Ansatz nach SOTIF zeigt, dass in der Validierungsphase inakzeptable Risiken Änderungen am Gesamtsystem oder Neuentwicklungen zur Folge haben. Ist das der Fall, verlieren alle bereits positiv erfolgten Validierungen ihre Gültigkeit, die eine Schnittstelle zu der risikobehafteten Komponente haben. Wie bereits angedeutet, ist die Validierung von Systemen ab SAE Stufe 3 mit hohen Kosten verbunden. Diese entstehen durch zusätzliche Erprobungsträger und Erprobungskilometer, Prüfstände und Simulationen. Daher wird in der vorliegenden Arbeit der Ansatz nach „Best Practices“ herangezogen. Dabei wird vorab die Testplattform definiert. Bei der Validierung der Reibwertschätzung ist ein simulativer Ansatz kostengünstiger und schneller. Um in Zukunft diesen Ansatz besser verwenden zu können, sind realgetreue Modelle, welche die Umwelt und Sensorik berücksichtigen, erforderlich (Herrmann, 2019) (Reway, 2018).

Da zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit kein echtzeitfähiges Modell vorliegt, muss auf ein alternatives Validierungsverfahren zurückgegriffen werden.

Nach Auswertung der Testplattformen für Architekturelemente nach (Wood, et al., 2019) und Einschränkung auf die technischen Risiken nach SOTIF resultieren für die Reibwertschätzung zwei Testplattformen: erstens das Prüfgelände und zweitens der reale Fahrbetrieb.

Außerdem muss die V&V-Strategie die nach (Wood, et al., 2019) beschriebenen Herausforderungen erfüllen (siehe 4.5). Des Weiteren wird im Zuge der V&V eine statische Demonstration für die Risikobilanz und unbekannte Szenarien berücksichtigt.

### 6.1.1 Statistische Tests

Die statistischen Tests sind für die Erhebung von Daten mit Seriensensorik im realen Fahrbetrieb notwendig. Mit diesen Daten kann unter Anwendung einer Referenzsensorik die Performance der Seriensensorik und des Algorithmus innerhalb eines geschlossenen Systems bewertet werden. In einer vorherigen Arbeit wurde ein Konzept erarbeitet, das unter Anwendung des MARWIS-Sensors die Möglichkeit zur Validierung der Fuzzy-Reibwertschätzung bietet (siehe Abschnitt 2.3). Im realen Umfeld kann durch die Anwendung von ursachenbasierten Verfahren das Kraftschlusspotenzial nicht verlässlich ermittelt werden. Daher ist diese Methode nicht für die Validierung des Schätzers in Bezug auf die Sicherheit geeignet. Bei den effektbasierten Verfahren eignet sich im Längsdynamikanteil die ABS-Regelbremsung. In Gefahrensituationen ist die ABS-Regelbremsung der ausschlaggebende Faktor für den Verzögerung

rungsweg in Abhängigkeit vom Reibwert. Daher bildet dieses Verfahren den idealen Referenzwert für die Sicherheitsbetrachtung des vorliegenden Algorithmus. Statistisch betrachtet ist eine Erprobungsfahrt eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit aller Fahrscenarien. Zentrale Herausforderung hierbei ist die Repräsentativität der Stichprobe. Repräsentativität ist die Gleichverteilung für den Untersuchungsgegenstand, unter Berücksichtigung von relevanten Merkmalen und Ausprägungen. Ein Fahrversuch, der die volle Repräsentativität widerspiegelt, ist nicht erreichbar. Aus diesem Grund wird der Versuch auf einen Szenarien-Bereich beschränkt, der reale und definierte User-Stories abbildet. Bei der Durchführung ist das Ziel, die Häufigkeitsverteilung für die Fehlerarten herauszufinden, die in Abschnitt 4.4 erarbeitet wurden. Der bereits aufgezeigte Use Case „eine Fahrt in den Winterurlaub“ wird dabei in zwei Erprobungsfahrten abgefahren. Der Versuchsaufbau und die Durchführung werden in Kapitel 6.3 beschrieben.

### 6.1.2 Szenariobasierte Versuche

Mit der Durchführung von szenariobasierten Versuchen werden vor allem sicherheitskritische Szenarien getestet. Diese treten im normalen Fahrverlauf selten auf und werden daher kontrolliert aufgeschaltet und getestet. In Kapitel 2 wurde das hochkomplexe und nichtlineare Verhalten des Zusammenspiels Reifen und Fahrbahn beschrieben. Da nach heutigem Stand der Technik und Wissenschaft nicht alle möglichen auftretenden Phänomene nachvollzogen werden können, ist der Ansatz zur Validierung mit einem deduktiven Vorgehen problematisch. Daher wird mit der Hilfe von Äquivalenzklassen und einem systematischen Vorgehen eine Szenarien-Datenbank erstellt. Diese eignet sich zur Verifizierung des Reibwertschätzers. Als eines der größten Risiken werden ein spontaner Abfall des Reibwertes und eine darauffolgende Notbremsung gesehen. Da das System aufgrund des kritischen Fehlers einen zu geringen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhält, kann es zu einer Kollision kommen. Nach der Definition im Situationskatalog ist ein Unterschied zwischen „Soll“- und „Ist“-Reibwert in Höhe von 0,3 als ein Sprung zu sehen, was einem kritischen Fehler 2. Art entspricht (siehe Abschnitt 4.4). Betrachtet man die statistische Häufigkeit eines extremen Reibwertsprungs, ist die Häufigkeit ein bis zehn Ereignisse pro Jahr und Laufleistung von 20 000 Kilometern (VDA, 2015).

Damit dieses Verhalten verifiziert werden kann, müssen Szenarien definiert werden, die für einen extremen Reibwertsprung relevant sind. Die in Kapitel 2 festgelegten externen Einflussgrößen, die sich direkt auf den Reibwert beziehen, können nach (Pegasus) den Ebenen eines Szenariomodells zugeordnet werden. Aus diesen Ebenen lassen sich Äquivalenzklassen bilden (siehe Tabelle 6.1). Mit diesen können systematisch Reibwertsprünge identifiziert werden.

Ebene	Einflussfaktor	Äquivalenzklassen
E1: Fahrbahn	Oberflächenbeschaffenheit	{Beton, Asphalt, Kopfsteinpflaster}
E5: Umgebungstemperatur	Temperatur	{eiskalt, kalt, warm, heiß}
E5: Umgebungsbedingungen	Zwischenschicht	{trocken, feucht, nass, sehr nass, Schnee, Eis}

Tabelle 6.1: Mögliche Äquivalenzklassen für externe Einflussparameter

In den Szenarien, bei denen ein oder mehrere Einflussfaktoren stark springen, wird eine Logik zur systematischen Versuchsplanung für sicherheitskritische Szenarien erstellt. Mit diesem Vorgehen können bisher unbekannte und unsichere Szenarien identifiziert werden. Beispielhaft dafür wird anhand des Szenarios „Wasseransammlung“ auf der Fahrbahn bei einem schlagartigen Übergang der Zwischenschicht von „trocken“ auf „sehr nass“ geprüft. Dabei wird die Sensitivität zur Erkennung von Reibwertsprüngen für den integrierten Mechanismus überprüft. Schematisch ist der Mechanismus in der Tabelle 6.2 zur Identifizierung von Reibwertsprüngen dargestellt.

Szenario	Einflussfaktor	Änderung
Brückenüberfahrt	Oberflächenbeschaffenheit	Beton <-> Asphalt
	Temperatur	kalt <-> eiskalt
	Zwischenschicht	nass <-> Eis
Tunneldurchfahrt	Oberflächenbeschaffenheit	Beton <-> Asphalt
	Temperatur	warm <-> kalt, kalt <-> eiskalt
	Zwischenschicht	trocken <-> nass, trocken <-> Schnee
Wasseransammlung auf der Fahrbahn	Zwischenschicht	trocken <-> sehr nass
⋮	⋮	⋮

Tabelle 6.2: Szenarientabelle zur Identifikation von Reibwertsprüngen

### 6.1.3 Analyse von Kundenszenarien

Die Kunden fahren über den Lebenszyklus die meisten Kilometer. Daher bedienen sich die OEM an den Kundenfeedbacks, die sie über die Fahrzeughändler zurückspielen. Damit das statistische Konfidenzlevel der Validierungsergebnisse erhöht werden kann, werden die Kundenrückmeldungen zu den HAF-Systemen eingeholt. So kann zum einen die Häufigkeitsverteilung von Szenarien der Systemperformance und zum anderen die Leistung des menschlichen Fahrers eingeteilt werden. Durch die Feldbetrachtung ist es möglich, repräsentative Datensätze zu bekommen und diese auf die jeweiligen längs- und querdynamischen Effekte auszuwerten. Wie beschrieben, sind diese Daten besonders hilfreich, da diese von Serienfahrzeugen im normalen Gebrauch und mit Seriensensorik erfasst wurden. In Kapitel 6 wird eine Vorgehensweise beschrieben, wie diese erhobenen Felddaten in der Validierungsmethode für zukünftige Projekte genutzt werden können, um die Reibwertschätzung nachhaltig zu verbessern.

## 6.2 Versuchsaufbau

Im kommenden Abschnitt wird der Versuchsaufbau des Fahrzeuges und der verwendeten Hard- und Software aufgezeigt. Zur späteren Versuchsdurchführung ist dazu die FuT zu definieren und zu integrieren. Da bei der Durchführung immer ein Referenzreibwert benötigt wird, ist hierzu ebenfalls ein System zur Messung notwendig.

### 6.2.1 Sensorik und Fusionsalgorithmus

Wie bereits beschrieben, ist es das Ziel, den Reibwert mit bestehender Seriensensorik zu ermitteln. Daher wird als Versuchsfahrzeug ein Porsche 911 Carrera (Typ 992) mit serienmäßiger Nässesensorik verwendet. Zur Nachvollziehbarkeit und Validierung wird zusätzlich im Fahrzeuginnenraum eine Referenzkamera angebracht.

Die einzelnen Sensorwerte werden über Bus-Systeme zusammengeführt und über eine Schnittstelle zum Fahrzeug-Gateway geführt und abgegriffen. Jedes Steuergerät und seine Daten müssen somit separat zur anstehenden Fusion aufbereitet und zentral fusioniert werden. Für den Fahrzeugzugang und die Toolkette für die Messtechnik wird in der vorliegenden Arbeit auf Soft- und Hardware der Firma Vector Informatik GmbH zurückgegriffen. Damit können die Sensorwerte in Echtzeit über ein USB-Interface ausgelesen und mit Hilfe eines Messrechners visualisiert werden. Damit diese Bus-Botschaften decodiert werden können, ist eine freigegebene FIBEX- Netzwerkkonfigurationsdatei notwendig. Parallel dazu wird von der USB-Referenzkamera ein Videostream aufgezeichnet. Dieser wird zeitsynchron als MP4-Datei zu

allen anderen Messwerten und Datenströmen in CANape erfasst und als MDF-Datei gespeichert. Eine vollständige Auswertung der erfassten Signale, dazugehöriger Abtastraten, Auflösungen und Messbereiche ist im Anhang zu finden. Zur Datenverarbeitung und Auswertung in Echtzeit wird das parametrierte Simulink-Modell mit Hilfe des *Simulink-Coder* auf Microsoft Visual C++ kompiliert und als C-Code dynamisch in einer Programmbibliothek als (.dll) abgelegt. So kann der Code auf einem Messrechner, echtzeitfähigen Mikrocontroller oder Fahrzeugsteuergerät ausgeführt werden.

Der Versuchsaufbau mit den jeweiligen Schnittstellen ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

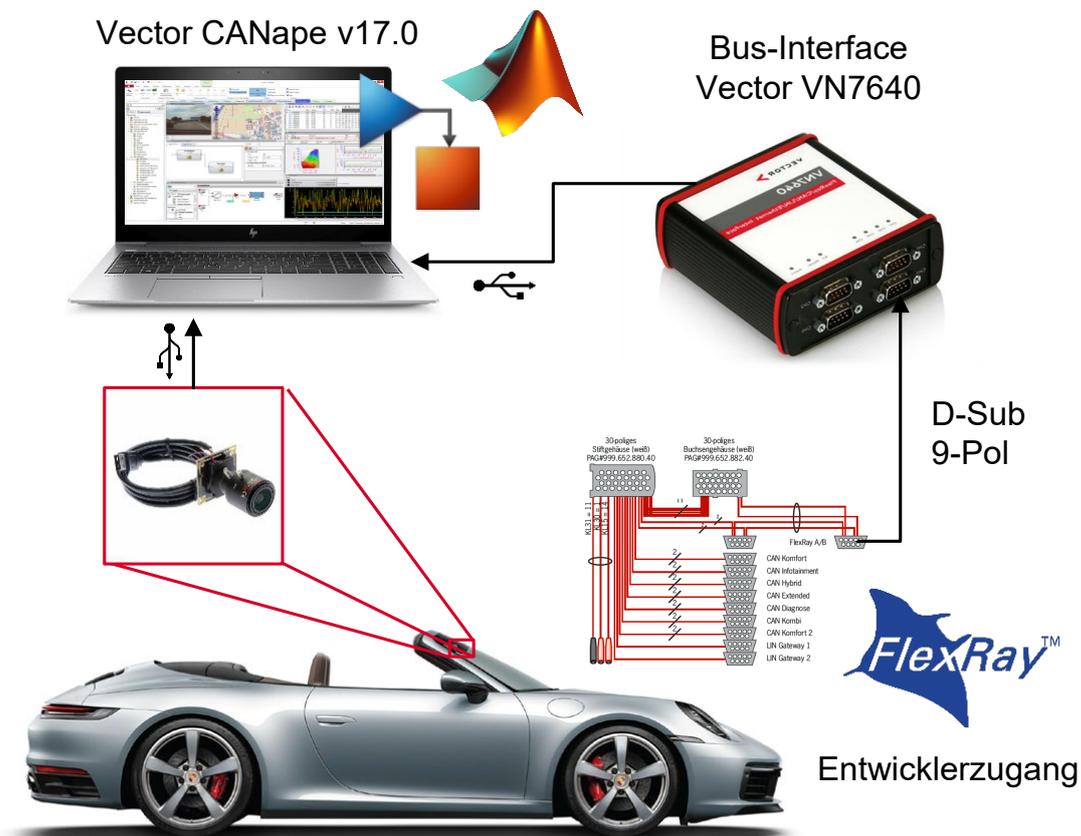


Abbildung 6.1: Porsche 911 Carrera 4S (Typ 992), Versuchsaufbau und Schnittstelle

Bei der Durchführung wird der kompilierte C-Code in CANape hinterlegt, auf dem Messrechner gestartet und mit den Messsignalen gespeist. Die visuelle Ausgabe erfolgt nahezu in Echtzeit und wird zusammen mit den Messwerten zeitsynchron gespeichert. Der notwendige Referenzreiwert wird in CANape als Messfunktion berechnet und ebenfalls zu der jeweiligen gespeicherten Datei abgelegt. Ändert sich ein Messwert/Sensorsignal, werden der Referenzreiwert und das Simulink-Modell neu berechnet. Dabei entspricht die Abtastrate der kleinsten Abtastrate des Referenzsignals. Über das CANape Interface können einzelne Parameter des Modells angepasst und resultierende Auswirkungen auf das Modellverhalten wie zum Beispiel die Laufzeit untersucht werden. Dieses Vorgehen hat den großen Vorteil, dass bereits während

der Versuchsfahrt online erste Auswertungen und Optimierungen stattfinden können. Es ist schematisch in Abbildung 6.2 dargestellt.

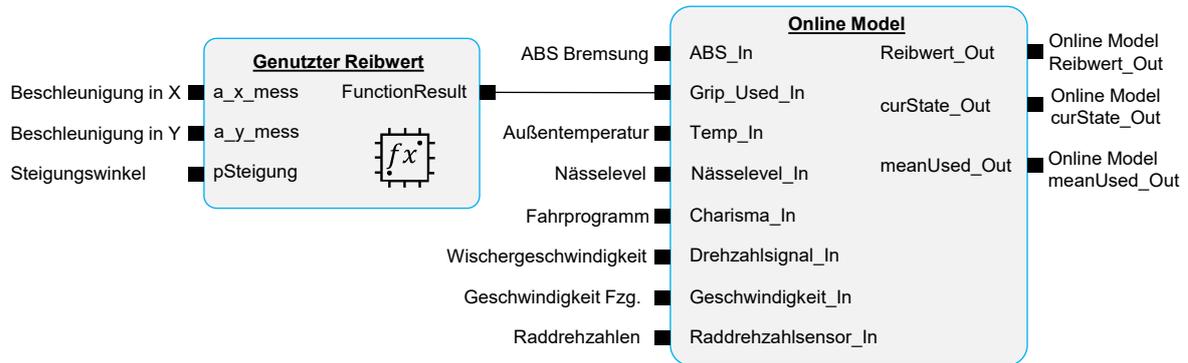


Abbildung 6.2: Verknüpfung von Messfunktion und Simulink-Modell in CANape

Die Erfassung des Referenzwertes und die Offline-Auswertung wird in 6.3.2 beschrieben.

## 6.2.2 Versuchsfahrzeuge

Da die Versuchsfahrten zeitlich versetzt waren und die Plausibilität der jeweiligen Sensorwerte validiert werden sollte, wurden zwei verschiedene Fahrzeuge verwendet. Eine Erprobung wurde mit einem Porsche 911 Carrera 4S (Typ 992) Coupé durchgeführt, die anderen mit der gleichen Fahrzeuggeneration, aber in der Ausführung als Cabriolet.



Abbildung 6.3: Versuchsfahrzeuge – 911 Carrera 4S (Typ 992)

Alle Versuchsfahrten wurden mit Winterbereifung, identischen Reifendrücken, Herstellern und Profiltiefen durchgeführt (siehe Anhang). Die Validierung des Schätzers mit Sommerreifen wurde mit einem bereits vorhandenen Datensatz erstellt und ist im Anhang zu finden. Die Sensitivität des Schätzers muss so entwickelt sein, dass auch der Tausch der Bereifung abgedeckt ist, ohne den Schätzalgorithmus jedes Mal zu kalibrieren. Die Versuchsdurchführung war kundennah. Das heißt, alle Quer- und Längsbeschleunigungen liegen im kundennahen Bereich und es liegen keine Temperatureffekte am Reifen aufgrund einer dynamischen Fahrweise vor.

Bei der ersten Erprobungsfahrt war das Signal des Raddrehzahlmessers sprunghaft. Aus diesem Grund wurden die Messwerte mit Hilfe des GPS-Signals und der daraus berechneten Geschwindigkeit ermittelt.

### 6.2.3 Referenzreibwert

Wie eingehend in der V&V-Strategie beschrieben, bietet sich eine ABS-Regelbremsung als effektbasierendes Vorgehen an, um den Algorithmus zur Reibwertschätzung zu validieren. Wie in Abschnitt 4.4 erläutert, wird dazu der Quotient aus Aufstandskraft und übertragener Reibkraft mit Hilfe von serienmäßig verbauter Sensorik ermittelt. Diese ist in der Lage, die Aufbaubeschleunigung in x-, y-, z-Richtung und die Gierrate auszugeben. Die Reibwertberechnung setzt sich additiv aus der Kraftübertragung zu der Fahrbahn, der daraus resultierenden negativen Beschleunigung in x-Richtung, der Erdbeschleunigungskomponente und der Abtriebskraft zusammen. Die Abtriebskraft wird aufgrund des geringen Einflusses im verwendeten Geschwindigkeitsbereich vernachlässigt. Außerdem besteht die Annahme, dass sich das Fahrzeug gegenüber dem Schwerfeld der Erde ausschließlich um die Nickachse deutlich dreht. Unter Verwendung des Kamm'schen Reibkreises wird anteilig die Querbeschleunigung bis  $4 \text{ m/s}^2$  berücksichtigt.

Resultierend kann der ausgenutzte Reibwert aus den erfassten Signalen der Steigung  $S$ , Aufbaubeschleunigung in x- und y-Richtung  $a_x, a_y$  und der Erdbeschleunigung  $g$  folgendermaßen berechnet werden (39):

$$\begin{aligned} \mu_{used} &= \left| \frac{F_R}{F_N} \right| = \left| \frac{a_{reib} \cdot m_{fahrzeug}}{a_z \cdot m_{fahrzeug}} \right| = \left| \frac{a_{reib}}{a_z} \right| \\ a_z &= \cos(\theta) \cdot g \\ \theta &= \tan^{-1}(S) \\ a_{reib} &= \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{(a_{x,mess} + g \cdot \sin(\theta))^2 + a_{y,mess}^2} \\ \mu &= \frac{\sqrt{(a_{x,mess} + g \cdot \sin(\tan^{-1}(S)))^2 + a_{y,mess}^2}}{g \cdot \cos(\tan^{-1}(S))} \end{aligned} \tag{39}$$

Das beschriebene Vorgehen kann nur erfolgen, wenn das ABS-Steuergerät in den Regelbereich kommt. Durch den Auf- und Abbau des Bremsdruckes entsteht ein oszillierendes Signal. Damit dieses nicht zu einer Verfälschung des Ergebnisses führt, wird bei einem vorliegenden Regeleingriff das arithmetische Mittel über die Zeitdauer der Regelbremsung gebildet. Liegt

keine Regelbremsung vor, so wird auf die letzte Bremsung oder Sonderereignisse wie unterschiedlichen Schlupf referenziert. Abbildung 6.4 verdeutlicht dieses Vorgehen und zeigt das Reibwertreferenzsignal über der Zeit.

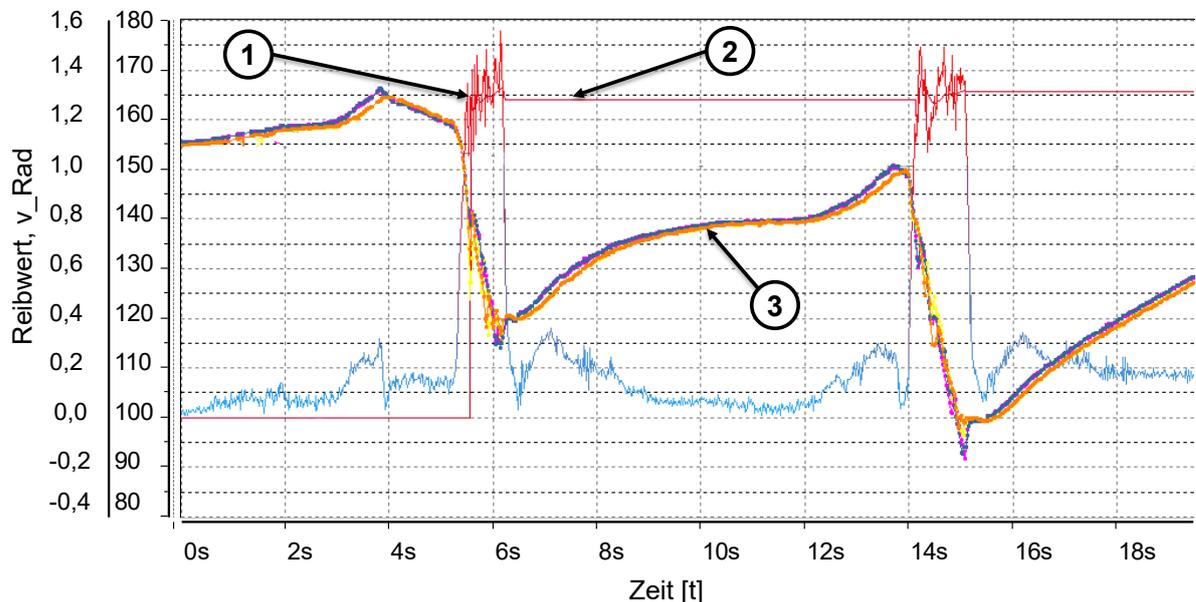


Abbildung 6.4: Geschätzter Reibwert (1), ausgenutzter Reibwert (2), Fahrzeuggeschwindigkeit in km/h (3)

## 6.3 Versuchsfahrten auf öffentlichen Straßen

Die ersten Versuchsfahrten wurden auf einem abgeschlossenen Prüfgelände (PG) der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG durchgeführt. Bei diesen Fahrten wurden die Ergebnisse der Messfahrten mit den Referenzreibwerten des PGs abgeglichen und bestätigt. Des Weiteren wurden verschiedene Szenarien wie zum Beispiel die Fahrt durch hohes Wasser simuliert und dadurch die Systeme wie die Nässesensorik validiert, bevor die Versuchsfahrten auf öffentlichen Straßen durchgeführt wurden. Die anstehenden Routen wurden so geplant, dass möglichst viele verschiedene Temperaturbereiche, Höhendifferenzen und Straßenverhältnisse durchfahren wurden. Der aufgezeichnete Streckenverlauf wird in Abschnitt 6.3.2 dargestellt.

### 6.3.1 Methodik der Datenerhebung

Die aufgezeichneten Daten werden als MDF-File abgelegt und können über CANape ausgewertet und visuell dargestellt werden. Visuell kann über den Schätzalgorithmus nur der geschätzte Reibwert geplottet werden. Dieser kann online über den gemessenen Signalen oder offline anhand des Simulink-Modells visualisiert werden. Die Online-Darstellung hat den Vorteil, dass während der Fahrt Iterationen und Optimierungen des Algorithmus erfolgen können.

Beispielhaft wird mit Abbildung 6.5 der Schätzreibwert für eine Aufzeichnungsfrequenz in Grün (1) abgebildet.

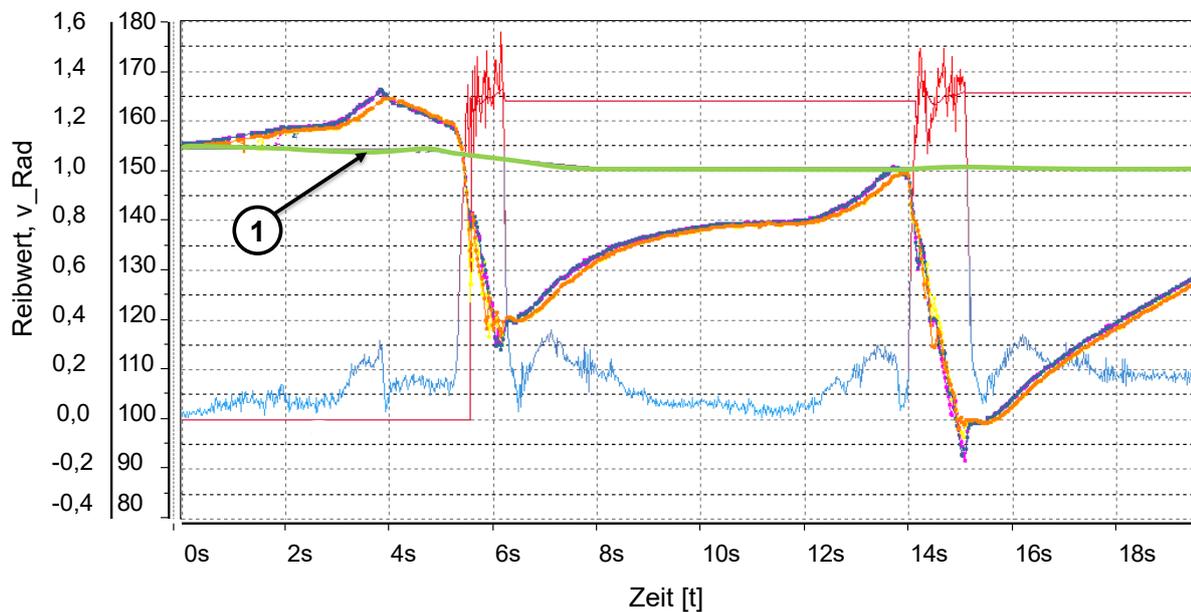


Abbildung 6.5: Visualisierung Schätzreibwert (1)

In Summe wurden während der Versuchsfahrten über zehn Stunden Datenmaterial gesammelt. Damit eine statistische Analyse der Messpunkte erfolgen kann, werden diese Daten per Data-Mining ausgewertet. Dazu werden CANape-Skripte im programmeigenen CASL-Format genutzt. Die Ausgabe und ihre Benutzeroberfläche sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Bei der Übergabe der Daten für das Data-Mining werden die Datensätze nach ABS-Regel Eingriffen durchsucht. Als Prämisse für einen Treffer wurden eine maximale Querbewegung von 0,4 g und eine minimale Dauer des Eingriffes definiert. Die Bestimmung des Referenzreibwertes erfolgt mit diesen Daten, wie in Abschnitt 6.2.3 beschrieben, unter Anwendung des Kamm'schen Reibkreises. Da eine ABS-Regelbremsung eine gewisse Latenzzeit bis zur stabilen Verzögerung aufweist, wurden ABS-Eingriffe, die kürzer als 1 s anhielten, nicht betrachtet. Der Zeitpunkt für einen Treffer und die Ausgabe des Referenzreibwertes wird immer auf die fallende Flanke des ABS-Signals gesetzt. Alle anderen Sensorabgriffe und der vom Algorithmus geschätzte Reibwert werden zwei Sekunden davor abgegriffen, damit die erhobenen Daten wie Geschwindigkeit, Raddrehzahl oder die Aufbaubeschleunigung nicht von der Regelbremsung beeinflusst werden. Außerdem hat dieses Vorgehen den Vorteil, dass die Prädiktion des Algorithmus für den Reibwertschätzer validiert werden kann.

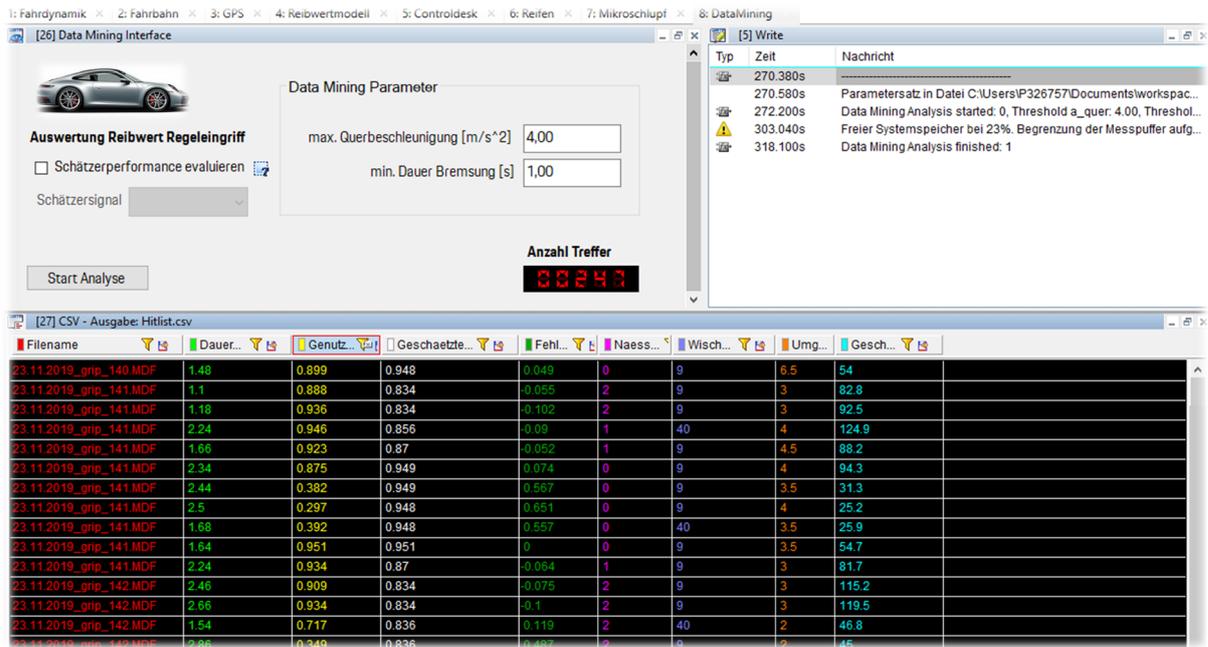


Abbildung 6.6: Data-Mining-Interface

Für das Data-Mining können beliebig viele Verzeichnisse ausgewählt werden. Die angegebenen Referenzreibwerte werden wie in 6.2.3 beschrieben und unter der Anwendung von virtuellen Messkanälen berechnet. Der Algorithmus kann je nach Umfang in CANape oder Simulink angepasst und kompiliert werden. Nach dem Durchlauf des Data-Mining werden die Treffer und die dazugehörigen Werte wie die Dauer der ABS-Regelbremsung, Referenzreibwert, geschätzter Reibwert und alle weiteren Eingangsgrößen des Algorithmus tabellarisch ausgegeben. Diese ausgegebenen Daten können zur schnellen Begutachtung über CANape visualisiert werden. Des Weiteren wird für jeden einzelnen Messwert eine .csv-Datei abgelegt. Zur Erstellung einer Statistik kann diese Datei mit einem MATLAB-Skript maschinell eingelesen werden. Durch dieses Modell und diese Vorgehensweise können sehr große Datensätze effizient und zielgerichtet ausgewertet werden.

### 6.3.2 Auswertung der erhobenen Messdaten

Das Ziel der Routenplanung und Datenerhebung war so ausgelegt, dass gemäß der V&V-Strategie möglichst viele kundennahe Use-Case-Fälle abgedeckt werden konnten. Daher wurden die Versuchsfahrten zeitlich so versetzt, dass zum einen hohe Temperaturen, wie bei einer Fahrt in den Sommerurlaub, und zum anderen sehr niedrige Temperaturen, wie zum Beispiel bei einem Ausflug zum Skifahren, vorzufinden waren. Zwei der fünf Routen werden exemplarisch in Abbildung 6.7 gezeigt.

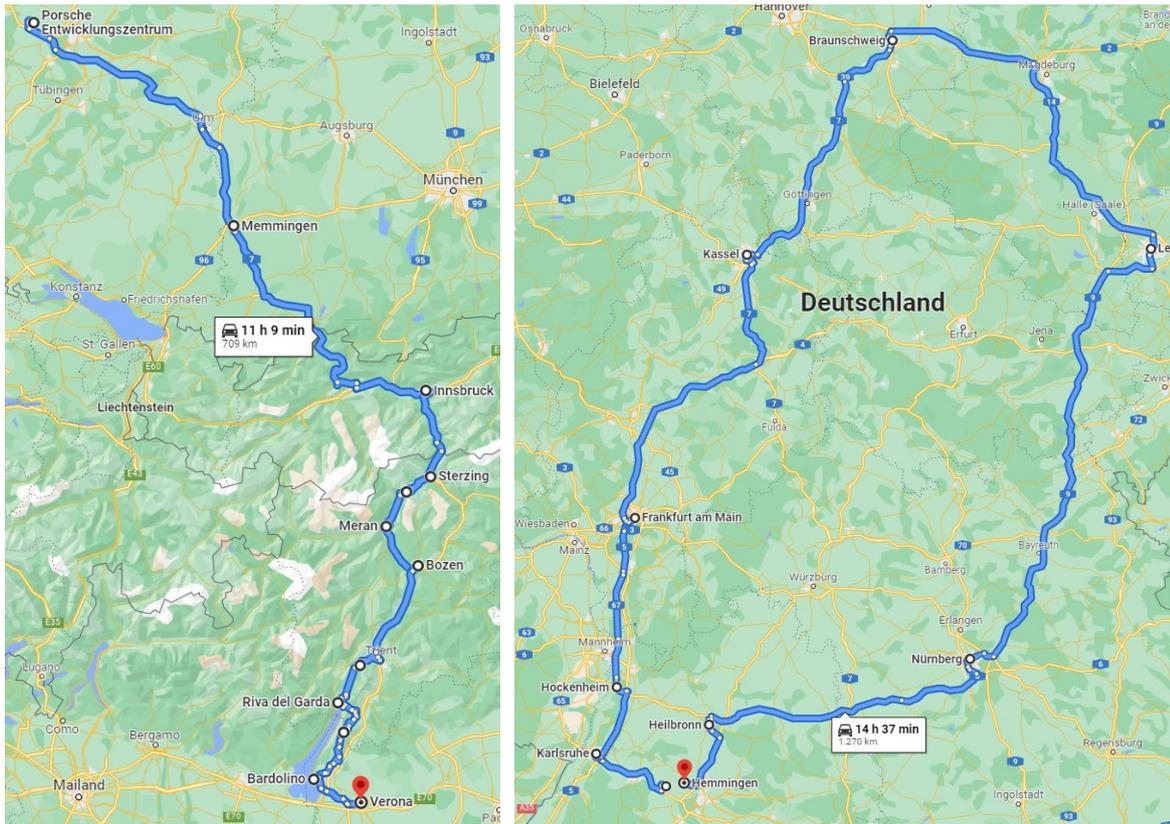


Abbildung 6.7: Beispielhafte Routen der Versuchsfahrten

Damit der Algorithmus zur Reibwertschätzung ausreichend validiert werden konnte, wurden an verschiedenen Streckenabschnitte Bremspunkte mit Regeleingriffen durchgeführt. Damit auch der Einfluss von verschneiten Straßen erfasst werden konnte, wurden alpine Passstraßen bis über 2 000 Meter über dem Meeresspiegel abgefahren. Dies ist beispielhaft in Abbildung 6.8 dargestellt. Entlang der Route wurden Bremspunkte gesetzt, welche die Ausnutzung des Reibwerts beschreiben.

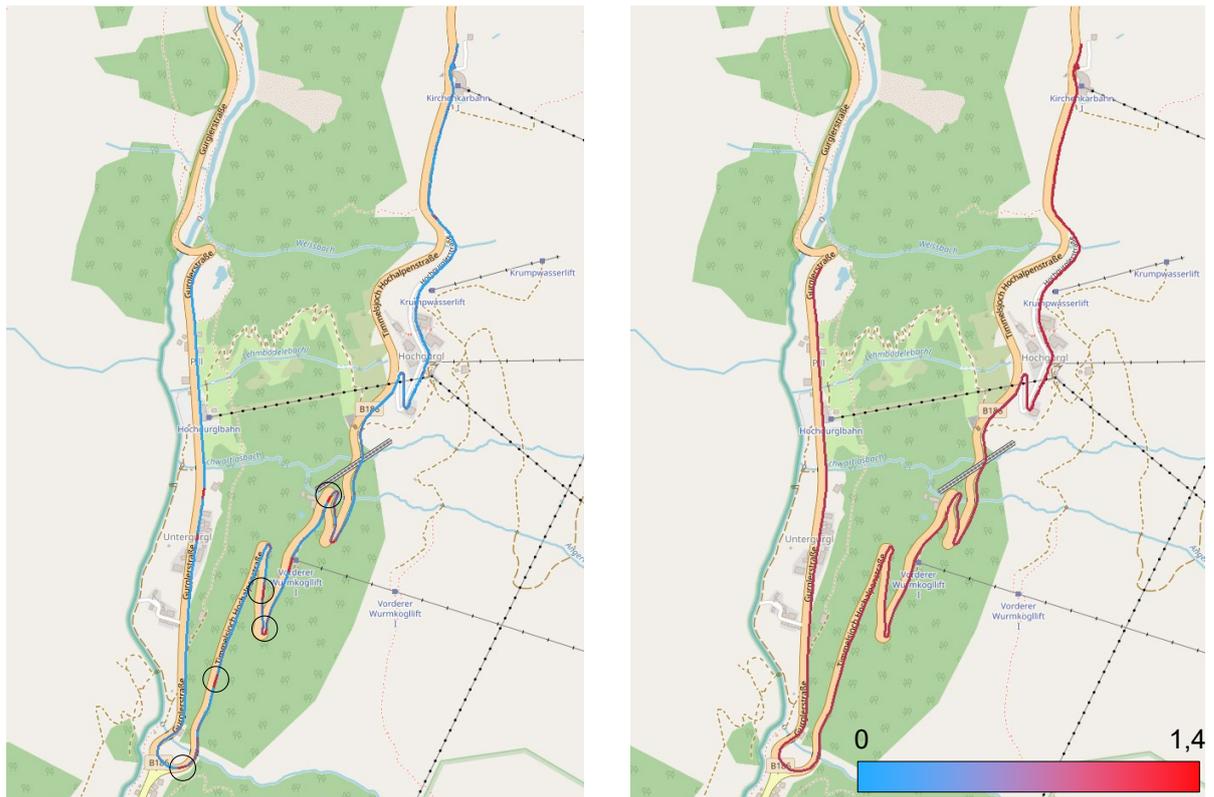


Abbildung 6.8: Darstellung des genutzten (l.) und des geschätzten (r.) Reibwerts über die Strecke

Über CANape konnten die einzelnen Bremspunkte mit Hilfe von Data-Mining gefunden und mit den erfassten Sensordaten sowie Bildern der Referenzkamera plausibilisiert werden. Diese Art von Auswertung und Betrachtung ist besonders hilfreich bei der Definition der Corner-Cases. Ein Corner-Case ist in der Abbildung 6.9 mit der Schneefläche am rechten Fahrbahnrand dargestellt.



Abbildung 6.9: ABS-Regelbremsung und Referenzkamerabild

In der Summe wurden über alle Messfahrten durch die Anwendung von Data-Mining 351 Datensätze identifiziert, die in folgender Boxplot-Darstellung vom 25. bis 75. Perzentil dargestellt sind. Die gestrichelte Linie gibt alle Messpunkte wieder. Der höchste gemessene Reibwert lag bei 1,423, der niedrigste bei 0,234.

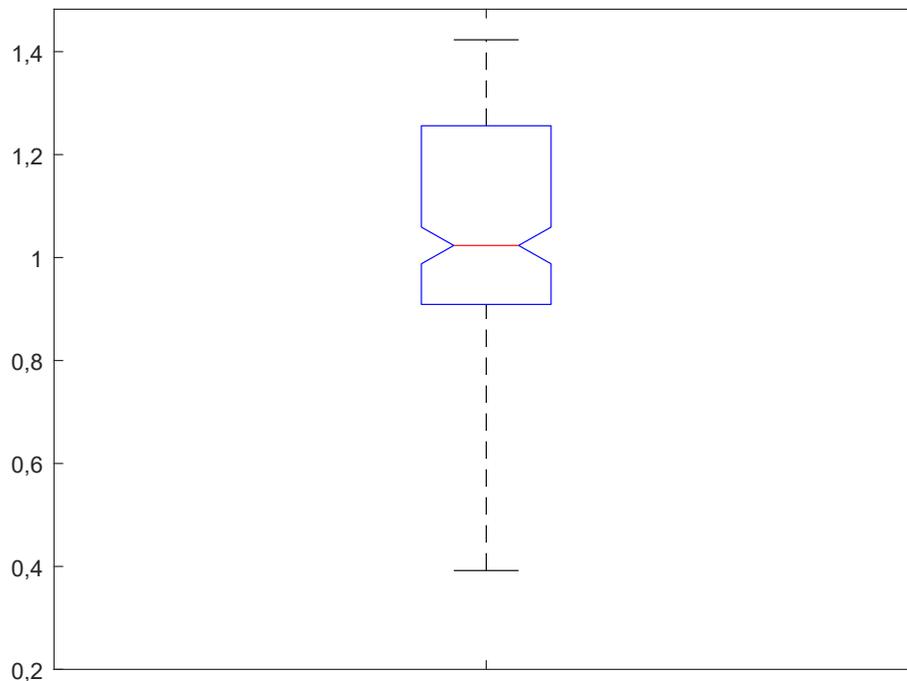


Abbildung 6.10: Boxplot – Perzentile aller erhobenen Referenzwerte

Als Nächstes werden die Messdaten in Bezug auf die Bedeckung der Merkmalsräume und Einflussfaktoren analysiert. Daraus ist zu erkennen, dass für das Zwischenmedium eine große Verteilung erzielt wurde. Die Verteilung der Messpunkte ist trotz geringer Größe des Datensatzes gleichmäßig. Abbildung 6.11 zeigt, dass der Reibwert bei steigender Wischergeschwindigkeit und Nässelevel abfällt.

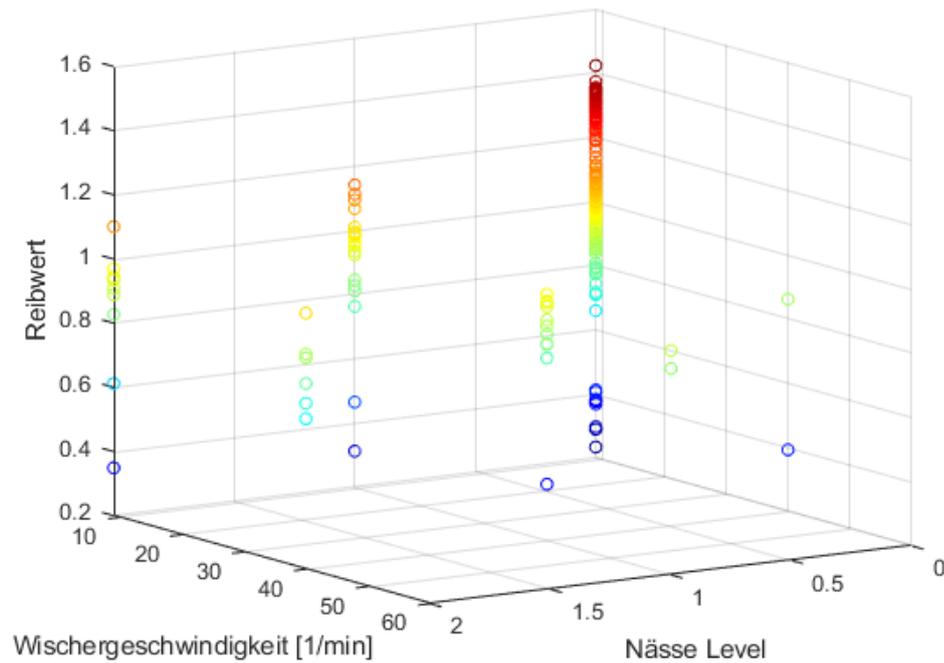


Abbildung 6.11: Reibwerte über Nässelevel und Wischergeschwindigkeit

Im Anschluss an diese Auswertung wurde die Verteilung über die Fahrzeuggeschwindigkeit betrachtet. Dabei sind zwei Gruppen zu erkennen: die erste bei geringen Geschwindigkeiten und niedrigen Reibwerten, die zweite mit höheren Geschwindigkeiten und mittleren bis hohen Reibwerten. Vergleicht man die Werte mit den Aufzeichnungen der Referenzkamera, ist zu erkennen, dass bei schlechteren Umweltbedingungen wie Regen oder Schnee, bei denen potenziell geringere Reibwerte vorliegen, langsamer gefahren wird. Des Weiteren sind zwei Messaussetzer des GPS-Signals bei 0 km/h zu sehen. Der Zusammenhang von Geschwindigkeit und Reibwert, der in (Gnadler, et al., 1995) dargestellt wird, konnte aus den vorhandenen Messdaten nicht bestätigt werden. Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13 zeigen die Korrelationen von Umgebungstemperatur und Geschwindigkeit zum Reibwert.

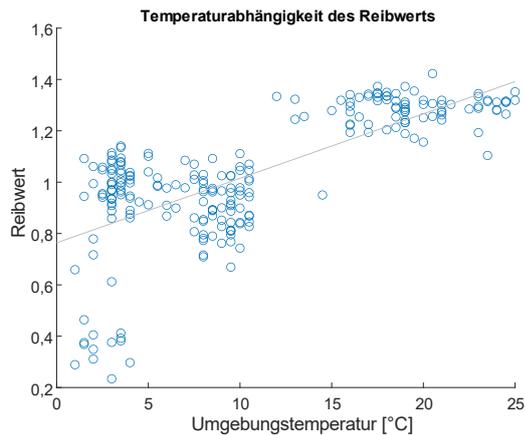


Abbildung 6.12: Referenzreibwerte über Temperatur,  $R=0,28$

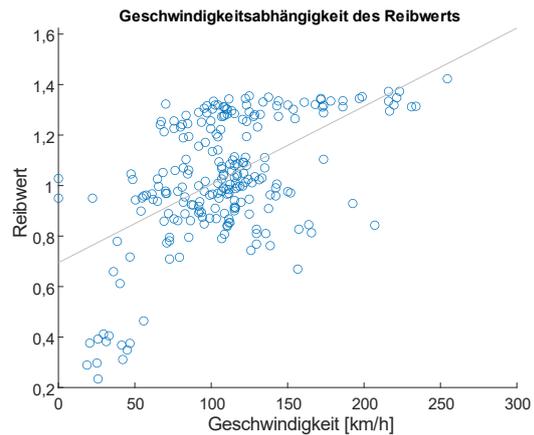


Abbildung 6.13: Referenzreibwerte über Geschwindigkeit,  $R=0,554$

Anhand der Auswertung und der Betrachtung der Bremswege wird deutlich, dass die Schwellwerte für die Klassifikation sehr wichtig sind. Daher wird im Folgenden die bereits vorgeschlagene Klassifikation mit Hilfe der eingefahrenen Messdaten verifiziert. Unter Verwendung des k-Means-Clusteralgorithmus werden die Daten nach den drei Clustern  $\mu \in \{\text{niedrig, mittel, hoch}\}$  sortiert. Dieser Algorithmus bietet sich an, wenn die vorhandenen Daten eine Tendenz zu Klassen mit ähnlicher Größe und minimaler Varianz aufweisen. Dabei ist unter Varianz der Abstand der einzelnen Datenpunkte zu dem Clusterzentrum zu verstehen. Zu Beginn wurde das nichtdeterministische Clustering mit zufällig gewählten Startdatenpunkten für die Zentren der Cluster initialisiert. Zur Vermeidung der Konvergenz in lokalen Minima des mittleren Abstands wurde das Clustering zehn Mal mit randomisierten Startdatenpunkten wiederholt. Das Ergebnis war ein stabiles, reproduzierbares und globales Minimum. Die 351 Referenzwerte aus den jeweiligen Aufzeichnungen wurden im Anschluss mit folgendem Ergebnis geclustert: 47 Datensätze im Cluster niedrig, 96 Datensätze im Cluster mittel und 208 Datensätze im Cluster hoch. Die Cluster sind in Abbildung 6.14 zu sehen.

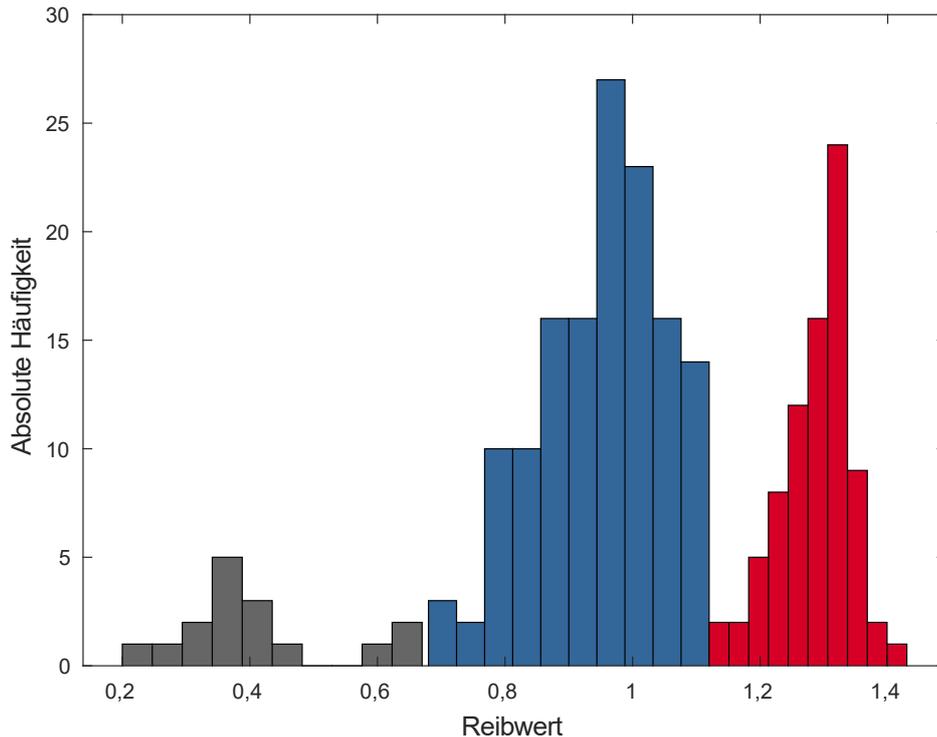


Abbildung 6.14: Klassifizierung der erfassten Reibwerte

Aufgrund der Darstellung anhand eines Histogramms ist bei den mittleren und hohen Häufigkeiten eine Überlappung zu erkennen. Die einzelnen Cluster weisen folgende Zugehörigkeiten auf:

$$\textit{niedrig} \in [0,23; 0,67]$$

$$\textit{mittel} \in [0,70; 1,11]$$

$$\textit{hoch} \in [1,13; 1,423]$$

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Äquivalenzklassen eine gute Näherung zu den in Abschnitt 2.5 erläuterten Klassen aufweisen. Damit eine Aussage über die Häufigkeit der jeweiligen Klasse getroffen werden und eine Auswertung der Fehlerarten in Bezug auf die Referenzklassen sowie geschätzten Klassen erfolgen kann, wird in Abbildung 6.15 die prozentuale Zugehörigkeit dargestellt.

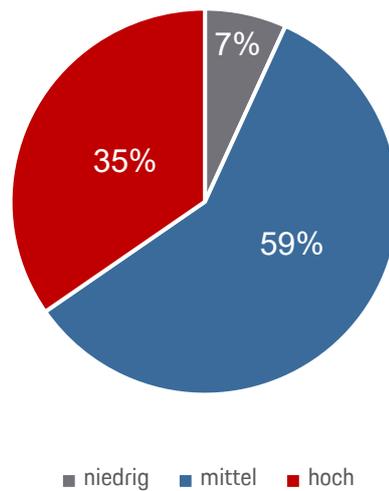


Abbildung 6.15: Aufteilung der Datenpunkte auf die Äquivalenzklassen

Aus Referenz- und Schätzwert lässt sich die mittlere Abweichung  $\bar{E}$  berechnen:

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\mu_{\text{schätz}} - \mu_{\text{ref}}| = 0,183 \quad (40)$$

Im Kontext von Machine-Learning wird für die Berechnung der Abweichung von Schätzer und Regressionsalgorithmen des Öfteren der *Root-Mean-Squared-Error (RMSE)* verwendet. Im vorliegenden Fall beträgt dieser:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mu_{\text{schätz}} - \mu_{\text{ref}})^2} = 0,222 \quad (41)$$

Mit dieser Berechnung hat man zwar eine Aussage über die Güte der Schätzung, aber nicht über die Bewertung der Sicherheitsbilanz. Hierfür wird der Abgleich von der Schätzung, Realität und dessen Einteilung in die Äquivalenzklassen betrachtet. Dabei ist aus Tabelle 6.3 zu entnehmen, dass der Schätzer zu 79,8 % die korrekte Klasse ermittelte. Bei 7,7 % wurde der Reibwert unterschätzt und bei 12,5 % überschätzt.

		Realität			
		hoch	mittel	niedrig	
Schätzung	hoch	189	25	3	217
	mittel	19	63	16	98
	niedrig	0	8	28	36
		208	96	47	351

Tabelle 6.3: Bewertung der Güte des Reibwertschätzers auf allen Fahrbahntypen

Bei genauer Betrachtung ist auffällig, dass die Güte der Schätzungen bei mittleren und hohen Reibwerten deutlich besser ist als die bei niedrigen Reibwerten. Bei keinem Datensatz wurde ein niedriger Reibwert prognostiziert, wenn die Referenzmessung einen niedrigen Wert ausgab. Die Analysen der Kameradaten und Sensorauswertungen haben gezeigt, dass dies vor allem daran lag, dass der Schätzalgorithmus einen kurzzeitigen Reibwertabfall aufgrund von zum Beispiel Schnee auf der Fahrbahn nicht erfassen kann. Außerdem waren die Umgebungstemperaturen der Messwerte stets über dem Gefrierpunkt, was den Schätzalgorithmus dazu veranlasste, mittlere Reibwerte auszugeben.

Für die Validierung des Schätzers sind vor allem die in Tabelle 6.4 dargestellten kritischen Fehler (KF) relevant. Die Fehlschätzungen müssen nun gegen das Validierungsziel bewertet werden. Dieses wurde wie beschrieben anhand der Unfälle mit Personenschaden abgeleitet. Daher sind die Fehlschätzungen dahingehend zu prüfen, ob sie zu einem Personenschaden führen würden.

	SF	KF
1. Art	8,1%	11,69%
2. Art	0%	4,5%
3. Art	0%	0,86%

Tabelle 6.4: Relative Häufigkeiten – störende und kritische Fehler

Für Gefahren- und Risikoanalysen der Automobilindustrie werden Bewertungsmaßstäbe herangezogen, die von einer Arbeitsgruppe (*Severity*) definiert werden. Dabei wird zum Beispiel als Obergrenze für Auffahrunfälle ohne Personenschaden bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h festgelegt (Burger et al. 2012). Für die vorliegende Arbeit folgen daher als Worst-Case-Betrachtung die maximale Geschwindigkeit und maximale Reibwertdifferenz des KF, bei Auffahren auf ein stehendes Hindernis.

Als Basis für diese Darstellung wird unterstellt, dass bei der Längsführung immer vom Reibwertminimum der jeweiligen Klasse gerechnet wird. Als untere Grenze für einen plausiblen Reibwert wurde 0,3 definiert. Damit die einzelnen kritischen Fehler und deren Auswirkung besser zu erfassen sind, werden diese in Tabelle 6.5 dargestellt.

Fehlertyp	Reibwert Längsführung	Bremsweg berechnet [m]	Tatsächlicher Reibwert	Tatsächlicher Bremsweg [m]	$\Delta v$ [km/h]
KF 1. Art	0,9	124	0,6	142	33
KF 2. Art	0,6	145	0,3	237	61
KF 3. Art	0,9	124	0,3	234	76

Tabelle 6.5: Aufprallgeschwindigkeiten nach Fehlerart

Der Analyse ist zu entnehmen, dass es bei allen drei Fehlerarten und im Falle eines Unfalles zu Personenschäden kommen kann. Bei hohen Aufprallgeschwindigkeiten aus KF 3. Art muss von Todesopfern ausgegangen werden. Zu diesen Unfällen kann es immer dann kommen, wenn eine Gefahrenbremsung bei niedrigen Reibwerten oder Reibwertsprüngen notwendig ist. Aus dem Situationskatalog der FuSi und dem Verband der Automobilindustrie (VDA) kann entnommen werden, dass mit einer Gefahrenbremsung mit Verzögerungen von mehr als  $0,6 \text{ m/s}^2$  1 bis 10 Mal pro Jahr gerechnet werden kann. Bezogen ist diese Aussage auf eine jährliche Fahrstrecke von 20 000 km. Da es bei diesen Aussagen keinen Bezug auf den vorliegenden Reibwert gibt, wird unterstellt, dass die Anzahl der Gefahrenbremsungen statistisch unabhängig vom Reibwert ist. Daraus ergeben sich maximal 0,0005 Gefahrenbremsungen pro gefahrenen Kilometer. Berechnet man die Wahrscheinlichkeit für den Grenzwert der relativen Anzahl der kritischen Fehler bei niedrigen und mittleren Reibwerten, ergibt sich:

$$p_{KF} = \frac{44}{143} = 0,31 \quad (42)$$

Die daraus resultierende Wahrscheinlichkeit für einen Personenschaden bei der jährlichen Fahrleistung von 20 000 km liegt dementsprechend bei:

$$p_{Personenschaden} \approx 0,31 \cdot 0,0005 = 1,5 \times 10^{-4} \quad (43)$$

### 6.3.3 Bewertung der Güte des Reibwertschätzers auf Autobahnen

In der Einleitung und Abschnitt 4.2 wurde erläutert, dass der Einsatz eines Reibwertschätzers auf Autobahnen am sinnvollsten ist. Die Güte des Schätzers bezogen auf alle Fahrten hat gezeigt, dass speziell Reibwertsprünge ein Problem darstellen. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Güte des Schätzers bei hohen und mittleren Reibwerten deutlich besser ist. Zur Verifikation dieser Aussage wurde eine weitere Erprobung durchgeführt. Gefahren wurden ca. 2500 Kilometer auf deutschen Autobahnen. Dabei wurden durch Anwendung des Data-Mining 119 Datensätze zur Ermittlung des tatsächlichen Reibwerts erhoben. Diese sind in Abbildung 6.16 dargestellt.

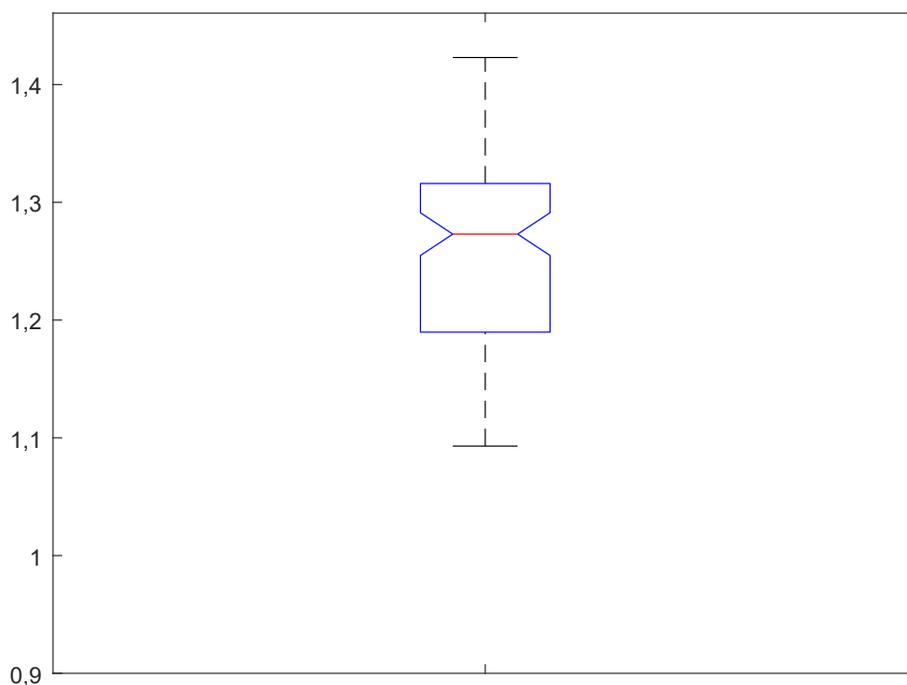


Abbildung 6.16: Boxplot – Perzentile Referenzwerte auf Autobahnen

Bei diesen Aufnahmen lag der höchste Reibwert bei 1,425 und der niedrigste bei 0,669. Betrachtet man alle Datensätze, setzt diese in Korrelation zu den Umgebungstemperaturen, so wird auch hier deutlich, dass ein großer Zusammenhang zwischen Temperatur und vorliegendem Reibwert existiert. Dies wird in Abbildung 6.17 und Abbildung 6.18 verdeutlicht.

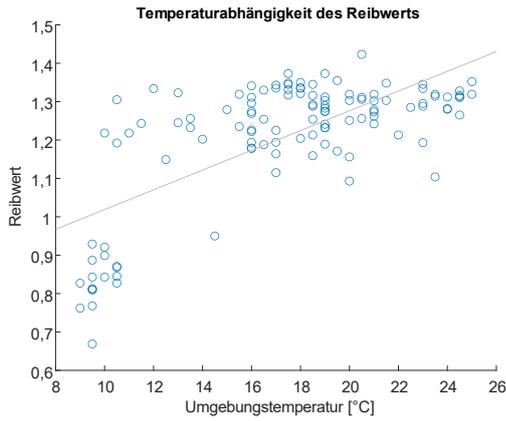


Abbildung 6.17: Referenzreibwerte über Temperatur

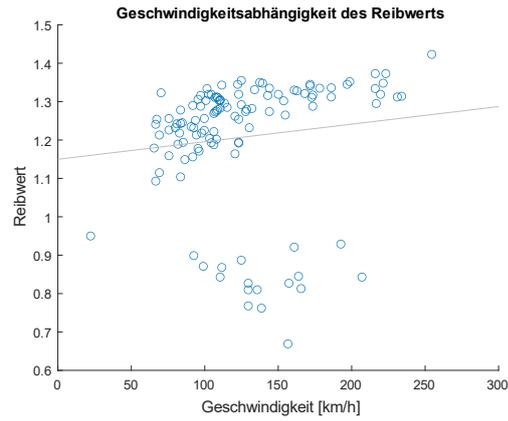


Abbildung 6.18: Referenzreibwerte über Geschwindigkeit

Auch hier wird der „Root Mean Square Error“ verwendet, um eine Aussage zur Güte des Schätzers zu bekommen. Für die Umgebungstemperatur wird ebenfalls der *Root-Mean-Squared-Error (RMSE)* berechnet. Im vorliegenden Fall beträgt dieser:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mu_{schätz} - \mu_{ref})^2} = 0,2224 \tag{44}$$

Vergleicht man diesen Wert mit dem errechneten RMSE über alle Daten, ist zu sehen, dass die Güte des Schätzers auf Autobahnen besser ist. Damit ein Abgleich der Sicherheitsbilanz gezogen werden kann, wird in Tabelle 6.6 ein Abgleich der Schätzung und Einteilung in Äquivalenzklassen erstellt.

		Realität			
		hoch	mittel	niedrig	
Schätzung	hoch	112	1	0	113
	mittel	0	19	0	19
	niedrig	0	0	0	0
		112	20	0	132

Tabelle 6.6: Bewertung der Güte des Reibwertschätzers auf Autobahnen

Bereits aus dieser Auswertung ist zu sehen, dass die Güte des Schätzers auf Autobahnfahrten deutlich besser ist. Von 119 erhobenen Datensätzen war eine Schätzung nicht korrekt. Diese Schätzung ist in Tabelle 6.7 exemplarisch dargestellt.

Dauer ABS [s]	$\mu$ genutzt	$\mu$ geschätzt	Fehler	Nässe-level	Temperatur [°C]	Wischerdrehzahl. [1/min]	Geschw. [km/h]	Fahrbahn
1,52	0,845	1,032	0,187	1	10,5	9	163,8	nass

Tabelle 6.7: Auswertung Datensätze der Autobahnfahrten

Wie zu sehen ist, beträgt der Schätzfehler 0,187. Gemäß der Bewertungsmetrik bedeutet dies einen kritischen Fehler der 2. Art.

## 6.4 Verifizierung des $\mu$ -Sprung-Szenarios

Die in 6.1 beschriebenen Versuche, wie z. B. die Wasserdurchfahrt und der damit verbundene  $\mu$ -Sprung, wurden auf dem Prüfgelände der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG durchgeführt. Dafür wurde die asphaltierte Kreisbahn mit einem Durchmesser von 100 m auf einem Teilabschnitt definiert und konstant bewässert.<sup>33</sup>



Abbildung 6.19: Kreisbahn Porsche AG; bewässerter Abschnitt in blau, Anfahrstrecke in schwarz, Verzögerungsstrecke in rot

Die Versuche auf der Kreisbahn wurden mehrmals durchgeführt. Zu Beginn der Versuchsdurchführung wurden spezifische Manöver zur Freigabe der Messtechnik gefahren, bevor auf öffentlichen Straßen getestet wurde. Außerdem wurden nach den Erprobungsfahrten gezielte

<sup>33</sup> vgl. Abschnitt 2.4

Manöver nachgefahren und die Messergebnisse aus der Erprobung validiert. Die Bewässerung und der Wasserfilm sind in Abbildung 6.20 und Abbildung 6.21 zu sehen, die Wetterbedingungen in Tabelle 6.8.

Temperatur	Luftfeuchte	Windgeschwindigkeit	Globalstrahlung
17,4°C	51%	12,6 km/h	634 W/m <sup>2</sup>

*Tabelle 6.8: Wetterbedingungen am Versuchstag, PAG Wetterstation Weissach*

Es wurde so bewässert, dass die gesamte Breite der Strecke bedeckt war und fast keine Rauigkeitsspitzen des Asphalt zu sehen waren. Die Versuchsdurchführung erfolgte folgendermaßen:

- Fahrzeuginbetriebnahme (Check: Reifen, Messtechnik, Sensorik),
- Warmfahren Fahrzeug (zwei kundennahe Runden auf dem Außenkurs),
- ABS-Referenzbremsung auf trockenem Abschnitt,
- Bewässerungsmenge kontrollieren,
- definierte Geschwindigkeit einstellen <sup>34</sup>,
- Anfahrt auf Wasserabschnitt (Lenkrad 0 Grad),
- mittig im Wasserabschnitt ABS-Regelbremsung.



*Abbildung 6.20: Prüfgelände Porsche AG, Bewässerter Streckenabschnitt*

<sup>34</sup> Durchführung mit 30 km/h, 50 km/h und 80 km/h



Abbildung 6.21: Prüfgelände Porsche AG, Übergangsbereich trocken zu nass (l), Wasserfilm Fahrbahn (r)

Die aufgezeichneten Messwerte sind in Abbildung 6.22 und Tabelle 6.9 dargestellt. Zu sehen ist der Verlauf des geschätzten und tatsächlichen Reibwerts bei der Wasserdurchfahrt und ABS-Regelbremsung. Der blaue Graph zeigt den Verlauf der Anfahrt. Dieser steigt sofort an, wenn auf der Wasserfläche die ABS-Regelbremsung eingeleitet wird. Nun ist zu sehen, dass kurz nach dem ersten Eingriff des Reglers der Reibwert von circa 1,05 auf 0,9 degradiert wird. Ein Grund hierfür sind die sofortige Erkennung der Nässe auf der Scheibe und Spritzwasser im Radhaus. Dieses Verhalten verifiziert die in 6.3.3 beschriebene Funktionalität zur Identifikation von Reibwertsprüngen. Nach der Weiterfahrt ist bei Sekunde 15 zu sehen, dass der geschätzte Reibwert erneut reduziert wird. Der Grund hierfür ist die Ausfahrt aus der Wassers-trecke und auftretendes Spritzwasser im Radhaus, was zu einem Ausschlag der Nässesens-rik führt. Der Grund für die Verzögerung ist, dass die Erfassung erst nach Rotation der Räder erfolgt und das Aufspritzen der Nässe von den Körperschallsensoren detektiert wird. Das Ein-fahren in den Nassbereich wurde von den Nässesensoren zu träge erfasst und daher der Reibwert nicht schnell genug reduziert. Außerdem ist zu sehen, dass der Reibwert nach vier Sekunden ohne weiteres Ereignis auf den Eingangswert zurückgesetzt wird.

Der tatsächliche Referenzreibwert lag bei diesen Versuchen bei 1,152. Dieser wurde vom Schätzalgorithmus um 0,141 unterschätzt, was an der Spontanität der Einflussfaktoren und dem verzögerten Ausschlag der Nässesensorik liegt. Des Weiteren ist der Schätzalgorithmus, wie bereits beschrieben, defensiv und auf Sicherheit ausgelegt und neigt dadurch zum leichten Unterschätzen.

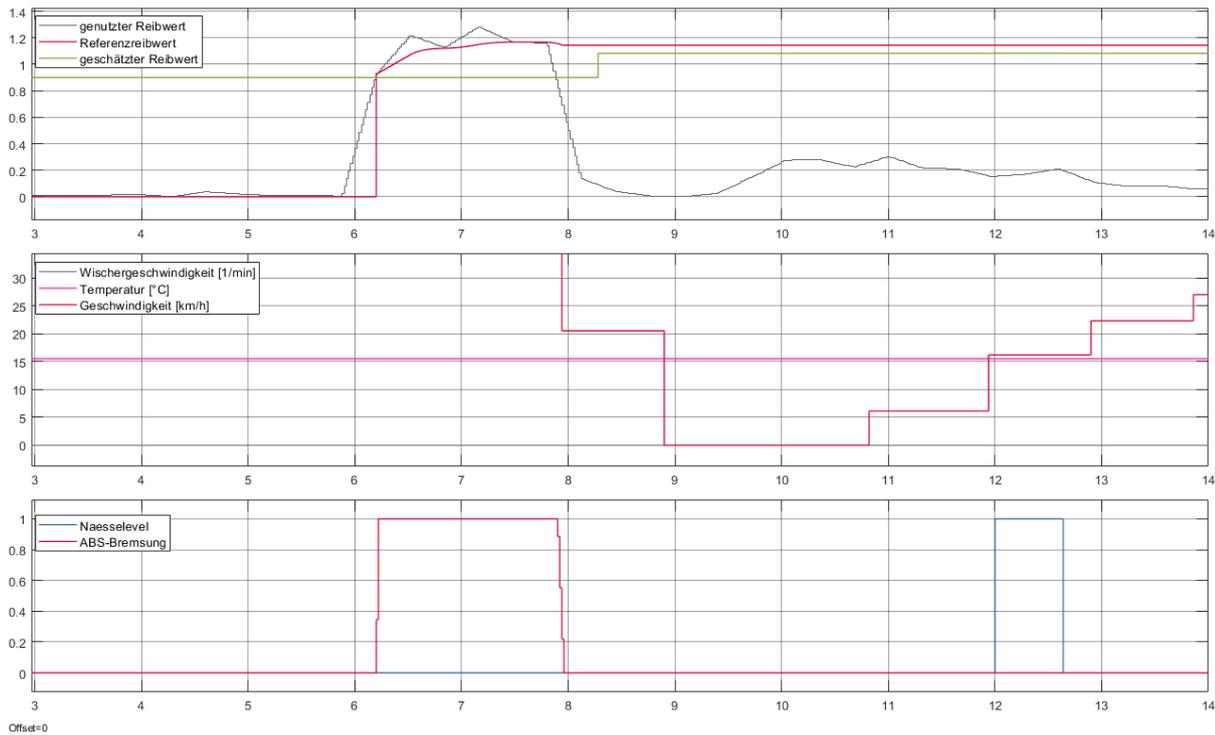


Abbildung 6.22: Aufzeichnung Messfahrt auf dem Prüfgelände

Die einzelnen Versuchsläufe wurden mit der identischen Testgeschwindigkeit mehrmals durchgeführt. Die Versuche bei 30 km/h konnten nur zum Teil ausgewertet werden, da das Fahrzeug so schnell zum Stillstand kam, dass der definierte Schwellwert (0,5 s) für die ABS-Gefahrenbremsung nicht erreicht wurde. Wie zu sehen ist, werden bei allen Versuchsfahrten die tatsächlichen Reibwerte unterschätzt. Die hohen Reibwerte sind auf das gute Drainagevermögen der Reifen<sup>35</sup> zurückzuführen. Selbst bei einer Durchführung des Versuchs mit 120 km/h kam es zu keinem Aquaplaning-Effekt. Aus der Summe der Versuche ergibt sich ein mittlerer Referenzreibwert für Nässe mit 1,106 und für trockene Versuchsdurchführung mit 1,109. Des Weiteren ist bei der Auswertung der Daten auffällig, dass die im Fahrzeug gemessene Außentemperatur um 2,5 °C von der an der Wetterstation gemessenen Temperatur abweicht. Der Grund hierfür ist die Einbaulage des Temperatursensors im Bugteil, der durch das kalte Spritzwasser die Umgebung des Sensors abkühlt.

<sup>35</sup> vgl. Anhang Reifenvermessung

Dauer ABS [s]	$\mu$ genutzt	$\mu$ geschätzt	Fehler	Nässelevel	Temperatur [°C]	Wischerdrehzahl. [1/min]	Geschw. [km/h]	Fahrbahn
0,64	1,06	1,051	-0,016	0	15,5	9	29,5	nass
0,94	1,030	0,998	-0,032	0	15,0	9	46,8	nass
0,96	1,098	0,900	-0,198	0	14,5	9	47,5	nass
1,08	1,183	0,900	-0,283	0	14,5	9	75,6	nass
1,68	1,152	1,011	-0,141	0	15,5	9	73,8	nass
0,64	0,989	1,037	0,048	0	16,0	9	28,8	trocken
0,98	1,093	1,007	-0,086	0	17,0	9	46,8	trocken
0,56	1,183	1,019	-0,164	0	17,5	9	70,9	trocken
0,88	1,169	1,008	-0,162	0	17,5	9	70,2	trocken

*Tabelle 6.9: Versuchsfahrten Kreisbahn mit ABS-Regelbremsung*

Abschließend wird festgestellt, dass der implementierte Sicherheitsmechanismus in zwei von fünf Nasstests aktiviert wurde, der von der Fuzzy-Logik geschätzte Reibwert aber besser den tatsächlichen Reibwert abbildet.

## 7 Zusammenfassung

Zu Beginn wurde in der vorliegenden Arbeit die aktuelle Situation vom teil- bis hin zum vollautomatisierten Fahren aufgezeigt. Dabei wurde die Problematik sichtbar, dass bei automatisierten Fahrfunktionen ab SAE <sup>36</sup> Stufe 3 das Fahrzeug ein Umgebungsmodell benötigt. Das Umgebungsmodell wurde im weiteren Verlauf so spezifiziert, dass es in erster Linie auf den Fahrbahnreibwert zurückzuführen ist. Ohne diesen Wert kann eine automatisierte Fahrfunktion, wie zum Beispiel ein Autobahnpilot, die geplante Trajektorie und vor allem den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug nicht korrekt bestimmen. Heutige Applikationen sind alle auf trockener Straße mit hohen Reibwerten entwickelt. Des Weiteren sind Stand heute keine Vorgehensmodelle zur Absicherung von Systemen und Fahrfunktionen größer SAE Stufe 2 vorhanden. Für die Absicherung wurde eine Methode als Weiterentwicklung der ISO 26262 veröffentlicht. Genannt wird das Vorgehensmodell nach SOTIF <sup>37</sup>. Dieses hat sich in der vorliegenden Arbeit als zielführende Methode erwiesen. Die zu erwartenden Risiken für eine SAE Stufe 3 Funktion konnten in Anlehnung und Fortführung dieser Methodik bewertet und eine Verifizierungs- und Validierungsstrategie entwickelt werden. Dazu wurde eine Unfallstatistik mit der Aufteilung der Unfälle nach Fahrbahnzustand erarbeitet, um ein Validierungsziel für den Reibwertschätzer abzuleiten. Dieses wurde zusammen mit der Bremsstrategie verwendet, um eine Metrik zu erstellen, die unter Verwendung von Äquivalenzklassen die Messung der Performance des Schätzalgorithmus erlaubt. Damit die Aussagekraft der Validierung alle Betrachtungsfälle umfasst, mussten Worst-Case-Betrachtungen durchgeführt und Annahmen getroffen werden. Die Erhebung dieser Validierungsdaten erfolgte mit einem Tool, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde und einen erheblichen Vorteil in Bezug auf die Auswertungszeit und die Verarbeitung der Datenmenge darstellte. Durch den geringen Anpassungsaufwand konnte während der Erstellung der vorliegenden Arbeit der Schätzalgorithmus kontinuierlich weiterentwickelt und der Zeitaufwand für die SOTIF-Iteration stark verkürzt werden. Für die Reibwertschätzung selbst wurde auf der Basis einer Fuzzy-Logik ein Algorithmus entwickelt, der es möglich macht, den vorliegenden Reibwert mit einer gewissen Prädiktion so zu schätzen, dass dieser in die drei Klassen hoch, mittel und niedrig eingeteilt werden kann. Dazu wurden als Eingangsparameter für das Schätzmodell ausschließlich Sensoren verwendet, die in einem Porsche 911 Carrera 4S (Typ 992) serienmäßig erhältlich sind.

---

<sup>36</sup> Norm zur Klassifizierung und Definition von Systemen, die das automatisierte Fahren beschreiben.

<sup>37</sup> Safety of the Intended Functionality (SOTIF). Betrachtung der Sollfunktion und mögliche Fehler, die im Zusammenhang von assistierten und teilautomatisierten Fahrzeugsystemen auftreten können.

## 7.1 Wissenschaftlicher Beitrag

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt und aufgezeigt, dass es im Zusammenhang mit assistierten und teilautomatisierten Fahrfunktionen unabdingbar ist, den Fahrbahnzustand zu erfassen und zu klassifizieren. Des Weiteren ist eine Methodik für die Verifizierung und Validierung der erfassten Fahrbahnzustände notwendig. So wurde im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit der Stand der Technik zur Reibwertschätzung analysiert und anhand einer neuartigen Kombination von Methoden erweitert. Mit einer Fuzzy-Logik konnte ein neuer Algorithmus entwickelt werden, der echtzeitfähig in einem Serienfahrzeug und mit Seriensensorik den Reibwert schätzt und ausgibt. Aus dieser Ausgabe und der im Rahmen dieser Arbeit analysierten Kunden-Use-Case konnten Äquivalenzklassen für die Reibwertschätzung abgeleitet werden.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit war die Definition einer Verifikations- und Validierungsstrategie. Diesbezüglich wurde der Stand der Technik um ein innovatives Anwendungsbeispiel unter Anwendung von SOTIF, Experteninterviews und der Best-Practices-Methode<sup>38</sup> maßgeblich erweitert. Da die Empfehlung der Ethik-Kommission<sup>39</sup> eine positive Risikobilanz von Assistenzsystemen fordert, wurde die Leistungsfähigkeit des Schätzalgorithmus mit der menschlichen Leistungsfähigkeit in der Validierungsphase verglichen. Dazu wurde unter Anwendung der Unfallstatistik ein Validierungsziel abgeleitet und zur Anwendung gebracht.

Aufbauend auf bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten wurde eine umfangreiche Vernetzung von Testmanövern auf Prüfgeländen und Testdaten von mehreren Versuchsfahrten auf öffentlichen Straßen erprobt. Hierbei wurden die Versuchsfahrten geografisch so definiert, dass ein möglichst breites Spektrum an Umwelteinflüssen erprobt werden konnte. Zur Erprobung und sofortigen Anpassung des Schätzers wurde ein neuartiges Tool entwickelt, das es ermöglicht, die Vielzahl der erhobenen Daten automatisiert zu analysieren und noch während der Fahrt anzupassen.

Als Ergebnis kann dargestellt werden, dass der entwickelte Schätzalgorithmus den tatsächlichen Reibwert schätzt und schlussendlich mit der neu entwickelten Verifikations- und Validierungsmethode abgesichert werden kann.

---

<sup>38</sup> Zusammenfassung aller Sicherheitsmethoden für das automatisierte Fahren (SAE Stufe 3 und 4) und Einführung einer Methodik zur Nachvollziehbarkeit.

<sup>39</sup> Von der Bundesregierung verabschiedetes Regelwerk: ethische Leitlinien für das automatisierte und vernetzte Fahren (SAE Stufe 4 und 5).

## 7.2 Risikobilanz des Systems

Unter Verwendung der beschriebenen Methodik zur Bewertung des Schätzalgorithmus ergibt sich für die Function under Test (FuT) eine Risikobilanz. Diese besagt, dass die Unfallwahrscheinlichkeit pro Kilometer bei  $3.2 \times 10^{-4}$  liegt (Destatis, 2021). Die Unfallwahrscheinlichkeit des Menschen liegt bei gleicher Strecke bei  $3.5 \times 10^{-8}$ . Das bedeutet, dass weitere Entwicklungstätigkeiten erforderlich sind, um die Risikobilanz zu verringern und die Güte des Schätzers zu erhöhen. Jedoch ist anzumerken, dass sich die Risikobilanz auf die Auswertung aller gefahrenen Strecken bezieht.

Als Gründe für die Abweichung und als Potenziale für folgende Forschungen ist zu nennen:

Bei der Fahrt auf hohen Alpinstraßen kam es durch Schneeüberwehungen zu sofortigen Reibwertsprüngen, die vom Schätzalgorithmus nicht erkannt wurden. Die Auswertung der Bilder der Referenzkamera zeigte dies deutlich. Daher wird empfohlen, einen Algorithmus zu entwickeln, der den Bereich vor dem Fahrzeug optisch erfasst und in drei Kategorien trocken, nass und verschneit einordnet. Dazu bietet sich die fahrzeuginterne Frontkamera an. Erste Analysen bestätigen die Wirksamkeit, siehe dazu auch (Raste, et al., 2019) und (Ebborg, 2019).

Die hohen Schätzfehler wurden bei Temperaturen größer gleich drei Grad, ohne Niederschlag und bei ABS-Regelbremsung auf schneebedeckter Fahrbahn ermittelt. Damit das Validierungskonzept gültig ist, wurden bei den Sicherheitsnachweisen einige Worst-Case-Annahmen getroffen. Zwei davon sind die Anzahl der ABS-Gefahrenbremsungen, die ein durchschnittlicher Fahrer pro Jahr durchführt, und die Diskretisierung des Reibwerts. Des Weiteren wurde die Optimierung des Schätzers auf die mittlere Abweichung ausgelegt. Im Zusammenhang der vorliegenden Arbeit konnten so die besten Ergebnisse erzielt werden. Bezieht man den Use Case im ersten Schritt auf eine Funktion der automatisierten Längsführung, ist eine defensivere Applikation empfehlenswert. Dadurch wäre die mittlere Abweichung in gewissen Bereichen höher, aber die Überschätzung des vorliegenden Reibwertes geringer. Die Verifizierungsfahrten auf dem Prüfgelände zeigten bei trockenen und nassen Bedingungen keine weiteren Risiken. Deutlich wurde der Einfluss der Reifen. Der Unterschied von Sommer- und Winterreifen bis zu Temperaturen von vier Grad Celsius auf nasser Fahrbahn war marginal. Einen deutlich größeren Einfluss hat die Profiltiefe und somit die Drainageeigenschaft des Reifens. Eine nützliche Implementierung wäre ein Algorithmus, der aufgrund des Fahrerprofils und der Servicedaten immer den aktuellen Reifenstatus verarbeitet.

### 7.3 Maßnahmen zur Verbesserung der Risikobilanz

Damit die Risikobilanz des Schätzers und von dessen Algorithmus verbessert werden kann, können folgende Potenziale ausgewiesen werden:

- Implementierung der Frontkamera zur prädiktiven Erkennung und Einordnung des Straßenzustands,
- Erfassung einer großen Datenbasis über Kundenprofile mit anschließender Applikation der Fuzzy-Logik aufgrund von Fehlerhäufigkeit,
- Verwendung eines ML-Algorithmus zur Identifikation weiterer Inputgrößen und Optimierung der Zugehörigkeitsfunktionen sowie Regelbasis.

Ein weiterer Ansatz ist die Optimierung der V&V-Strategie<sup>40</sup>. Anhand einer größeren Datenbasis können mögliche Szenarien detaillierter beschrieben und getroffene Worst-Case-Szenarien plausibilisiert und aufgelöst werden.

### 7.4 Maßnahmen zur Verbesserung der V&V-Strategie

Bei der Formulierung des Validierungsziels lassen sich Optimierungspotenziale identifizieren. So kann durch eine Metrik die Schadensschwere eines Unfalls berücksichtigt werden, woraus die Aussagekraft der Validierung verbessert werden kann. Damit dies erfolgen kann, müssen mehr Daten der Unfallstatistik erfasst und zielgerichtet ausgewertet werden. Liegen diese Daten vor, so können die Verteilung der Fahrten auf die jeweiligen Reibwertkategorien und die Anzahl der ABS-Gefahrenbremsungen genauer zugeordnet werden. Außerdem helfen die Daten bei der technischen Freigabe der Funktion, da durch eine größere Menge an Daten auch ein größerer Szenarienraum abgedeckt wird. Dies kann ergänzend durch den *Grey-Box-Ansatz*, der nach (Wood, et al., 2019) eine rein stochastische Erhebung der Validierungsdaten beschreibt, durchgeführt werden. Die gewählten Versuchsfahrten haben dazu beigetragen, dass zufällige unbekannte und unsichere Szenarien identifiziert wurden, aber diese ersetzen nicht einen datengetriebenen Ansatz. Beide Verfahren ergänzen sich und durch die Kombination können viele Vorteile erzielt werden.

So haben statistisch erhobene Daten den Vorteil, dass innerhalb eines Datensatzes die Häufigkeitsverteilung der Realität entspricht. Darüber hinaus muss bei den durchschnittlichen Laufleistungen der Fahrzeuge davon ausgegangen werden, dass sicherheitskritische Zustände, die sogenannten Corner-Cases, nicht betrachtet werden. Diese Betrachtung kann anhand des wissensbasierten Ansatzes erfolgen. Zur praktischen Durchführung wird im Folgenden eine

---

<sup>40</sup> Verifizierung und Validierung Strategie

Vorgehensweise vorgeschlagen, die szenarienbasierte Versuche mit statistischen Fahrten vereint und dadurch eine genauere Bewertung der Risikobilanz zulässt.

Ein Szenario wird definiert aus der Summe der möglichen Fahrtszenarien, die aus der Zuordnung und Ausprägung der Einzelparameter resultiert. Damit ein Parameter beschrieben werden kann, müssen diese gruppiert und nach Auswirkungen in Äquivalenzklassen zugeordnet werden. Zur Gruppenbildung kann die Vorgehensweise nach (Pegasus Project 2019) genutzt werden, die in Abbildung 7.1 aufgeführt ist.



Abbildung 7.1: Ebenensystem für Szenarien nach (Pegasus Project 2019)

Die in Kapitel 2 beschriebenen Einflussfaktoren der Reibwertschätzung können zur Diskretisierung verwendet werden. Ein Vorteil dieser Klassen ist, dass sich Versuchsfahrten besser planen lassen.

Des Weiteren kann entschieden werden, ob eine Versuchsfahrt oder eine statistische Absicherungsmethode, wie zum Beispiel das *Design of Experiments*, anzuwenden ist. Generell sollte dabei eine Szenariendatenbank eingerichtet werden, damit die Versuche und externe Einflüsse strukturiert abgelegt und bearbeitet werden können. Ein Beispiele hierfür in (Feilhauer 2018) nachzuschlagen und in Abbildung 7.2 dargestellt.

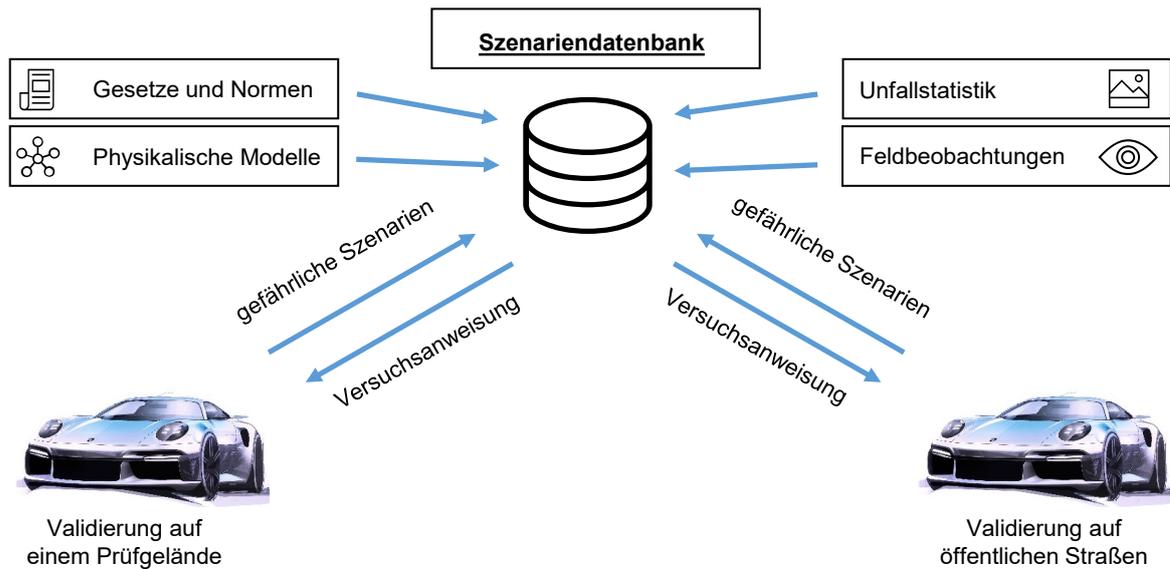


Abbildung 7.2: Optimierung der V&V-Strategie

Dieser strukturierte Ansatz, lässt sich unter Anwendung von den beschriebenen Äquivalenzklassen effizient und reproduzierbar durchführen. Ein Genauigkeitsverlust durch die Diskretisierung des kontinuierlichen Raums der Fahrmanöver ist anzunehmen. Er kann durch die Erstellung der Äquivalenzklassen auf der Grundlage von realen Daten für die Szenariendatenbank minimiert werden. Des Weiteren können neue Informationen wie zum Beispiel: Gesetze, Normen, Daten aus Kundenanalysen, physikalischen Modellen wie zum Beispiel Wetterdatenmodellen, kontinuierlich integriert werden. Mit diesen Daten könnten Aufenthaltsmodelle erstellt werden, die in Abhängigkeit von den Wetterdaten und Jahreszeiten den Situationskatalog ergänzen und eine gewisse Prädiktion bieten, die eine detailliertere und genauere Risikobewertung für das Gesamtsystem ermöglicht.



## 8 Literaturverzeichnis

- Acosta, Manuel, Kanarachos, Stratis und Blundell, Mike. 2017. *Road Friction Virtual Sensing: A Review of Estimation Techniques with Emphasis on Low Excitation Approaches*. Coventry CV1 5FB, UK: Coventry University, 2017. doi.org/10.3390/app7121230.
- Adamski, Dirk. 2014. *Simulation in der Fahrwerktechnik: Einführung in die Erstellung von Komponenten- und Gesamtfahrzeugmodellen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN: 978-3-658-06536-2.
- Altenburg, Sven, Kienzler, Hans-Paul und Maur, Alex. 2018. *Einführung von Automatisierungsfunktionen in der Pkw-Flotte; Im Auftrag des ADAC e. V.* Schweiz: Prognos AG, 2018.
- Bachmann, Thomas. 1998. *Wechselwirkung im Prozeß der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, 1998. ISBN 3183360128,.
- Becker, Nicolas. 2019. *The Safety of the Intended Functionality. Report on ISO/TC22/SC32/WG8 activities*. s.l.: Hg. v. Internationale Organisation für Normung, 2019.
- Bertsche, Bernd, et al. 2009. *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme - Grundlagen und Bewertung in der frühen Entwicklungsphase*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-85089-2.
- Bittner, Kurt und Spence, Ian. 2004. *Use Case Modeling*. Boston: Pearson Education, Inc., 2004. ISBN 0201709139.
- Böhme, Johann Friedrich. 1998. *Stochastische Signale - Eine Einführung in Modelle, Systemtheorie und Statistik mit Übungen und einem Matlab Praktikum*. Stuttgart: Teubner, 1998. ISBN 978-3-519-16160-8.
- Börcsök, Josef. 2011. *Funktionale Sicherheit*. Berlin: VDE-Verlag, 2011. ISBN-13: 978-3-800-75357-4.
- Borgeest, Kai. 2008. *Elektronik in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2008. ISBN-13: 978-3-8348-9459-5.
- Borgelt, Christian, et al. 2003. *Neuro-Fuzzy-Systeme - Von den Grundlagen künstlicher Neuronaler Netze zur Kopplung mit Fuzzy-Systemen*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft/GWV Fachverlage GmbH, 2003. ISBN-13: 978-3-528-25265-6.
- Bosch. 2015. Bosch Mobility Solutions. [Online] Robert Bosch GmbH, 19. 05 2015. [Zitat vom: 11. Juli 2018.] <https://www.bosch-mobility-solutions.de/de/produkte-und-services/pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge/automatisiertes-fahren/stauassistent/>.
- Bowden, Frank Philip und Tabor, David. 2001. *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford: University of Cambridge, 2001. ISBN-13: 978-0-198-50777-2.
- Braess, Hans-Hermann und Seiffert, Ulrich. 2013. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. Bd. 7. Auflage. ISBN-13: 978-3-658-01691-3.

- Breuer, Bert und Bill, Karlheinz. 2017. *Bremsenhandbuch, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017. ISBN-13: 978-3-658-15488-2.
- Breuer, Bert und Strothjohann, Thomas. 2002. *Der Darmstädter Reifensensor – Ein mechatronisches System zur Ermittlung dynamischer Größen im rotierenden Reifen*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2002.
- Breuer, Bert, et al. 1994. *Method and Instruments for On-Board Measurement of Tyre/Road Friction*. Darmstadt: Sae technical paper 942470, 1994. Society of Automotive Engineers, INC.
- Brückert, Matthias, Gauterin, Frank und Unrau, Hans-Joachim. 2012. Bundesanstalt für Straßenwesen. *Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren*. [Online] September 2012. [Zitat vom: 22. 12 2019.] <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/575/file/S78b.pdf>.
- Brünglinghausen, Christiane. 2015. Wie das Recht automatisiertes Fahren hemmt. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*. 2015, Bd. 117. Jahrgang, 4/2015.
- Burckhardt, Manfred. 1993. *Fahrwerkstechnik: Radschlupf - Regelsysteme*. Würzburg: Vogel Verlag, 1993. ISBN-13: 978-3-802-30477-4.
- Burger, Christine, et al. 2013. *Situationskatalog E-Parameter nach ISO 26262 - 3 V3.0*. Stuttgart: Audi, BMW, Daimler, Porsche, Volkswagen, 2013.
- Cockburn, Alistair. 2008. *Use Cases effektiv erstellen*. Heidelberg: REDLINE GmbH, 2008. ISBN-13: 3-8266-1796-6.
- Czichos, Horst. 2019. *Rechatronik, Regeln und Steuern*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2019. ISBN-13: 978-3-658-26293-8.
- DESTATIS. 2021. <http://www.destatis.de>. *destatis*. [Online] Statistisches Bundesamt, 26. März 2021. [Zitat vom: 28. 05 2021.] [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/VerkehrsunfaelleMonat/VerkehrsunfaelleM2080700171124.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/VerkehrsunfaelleMonat/VerkehrsunfaelleM2080700171124.pdf?__blob=publicationFile).
- Destatis, Statistisches Bundesamt. 2021. *Fachserie 8 Reihe 7 Verkehrsunfälle - 2009 bis 2019*. s.l.: Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021. Artikelnummer: 2080700197004.
- Deutscher Wetterdienst. 2018. Deutscher Wetterdienst, GBG SWIS - Wetterinformationssystem für das Straßenwesen. [Online] 31. 12 2018. [Zitat vom: 05. 01 2019.] <http://www.dwd.de/DE/leistungen/gbgswis/gbgswis.html>.
- DGQ, Band 13-11. 2012. *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*. s.l.: Deutsche Gesellschaft für Qualität, 2012. ISBN-13: 978-3-410-32333-4.
- Dieckmann, Thomas. 1992. *Der Reifenschlupf als Indikator für das Kraftschlusspotential*. Hannover: Universität Hannover, Dissertation, 1992.
- DIN EN 61508. 2010. *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme*. s.l.: Beuth Verlag, 2010.
- Dixon, Richard. 2018. *Trends in der Automobil-Sensorik*. Berlin: Springer, 2018. ISBN-13: 978-3-662-56309-0.

- Duesterloh, Dario. 2018. *Funktionsoptimierung und Komplexitätsbeherrschung im Entwicklungsprozess mechatronischer Fahrwerksysteme am Beispiel elektromechanischer Lenksysteme*. Duisburg: Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2018.
- Ebberg, Joern. 2019. Bosch Invented for life. *Besser als ein Paar Augen: Bosch-Kamera mit KI für Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren*. [Online] Bosch, 30. 08 2019. [Zitat vom: 13. 02 2020.] <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/besser-als-ein-paar-augen-bosch-kamera-mit-ki-fuer-fahrerassistenz-und-automatisiertes-fahren-197120.html>.
- Ebert, Christof. 2014. *Systematisches Requirements Engineering*. Heidelberg: dpunkt.verlag GmbH, 2014. ISBN-13: 978-3-86490-139-3.
- Eckert, Alfred, et al. 2011. *Emergency steer & brake assist - a systematic approach for system integration of two complementary assistance systems*. Washington, DC: ESV - 22nd Enhanced Safety of Vehicles Conference, 2011. Paper Number 11-0111.
- Eckstein, Lutz. 2010. *Vertikal- und Querdynamik von Kraftfahrzeugen Federungssysteme*. Aachen: fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen, 2010. ISBN: 3940374210.
- Eichhorn, Ulrich. 1994. *Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn - Einflussgrößen und Erkennung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994. ISBN-13: 978-3-183-22212-4.
- Fach, Markus. 2000. *Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn*. s.l.: ATZ Automobiltech, 2000.
- . 2008. *Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn*. Darmstadt, Dissertation: Technische Universität, 2008. urn:nbn:de:tuda-tuprints-9312.
- Fausten, Michael. 2014. *Verfahren zum Bestimmen des Haftreibungswerts  $\mu$  aus dem Lenkmoment. DE10319662B4* Deutschland, 16. Januar 2014. Reibwertidentifikation.
- Feilhauer, Marius. 2018. *Absicherung von Fahrerassistenzsystemen*. Universität Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut Hochleistungsrechner, Dissertation, 2018.
- Filler, Thies. 2019. *Entwicklung einer Methodik für die durchgängige Integration von Hardware und Softwaremodellen in Simulationen für Fahrfunktionen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. ISBN-13: 978-3-658-26307-2.
- Fraden, Jacob. 2015. *Handbook of Modern Sensors*. San Diego, CA, USA: Springer, 2015. ISBN-13: 978-3-319-19303-8.
- Freuer, Andreas. 2016. *Ein Assistenzsystem für die energetisch optimierte Längsführung eines Elektrofahrzeugs*. Wiesbaden: Springer, 2016. ISBN-13: 978-3-658-13604-8.
- Fröhlich, Martin. 2007. *Ein robuster Zustandsbeobachter für ein semiaktives Fahrwerkregelsystem*. München: Technische Universität München, 2007. Dissertation.

- G.Lufft-GmbH. 2017. <https://www.lufft.com>. *Bedienungsanleitung MARWIS/StaRWIS*. [Online] 23. März 2017. [Zitat vom: 05. Oktober 2018.] <https://www.lufft.com/de-de/produkte/download-de/bedienanleitung-lufft-marwis-starwis-de/>.
- Gebhardt, Vera, et al. 2013. *Funktionale Sicherheit nach ISO 26262*. Heidelberg: dpunkt.Verlag, 2013.
- GIDAS, Internetauftritt. 2018. [gidas.org](http://www.gidas.org). *gidas.org*. [Online] 29. Dezember 2018. <http://www.gidas.org>.
- Gnadler, Rol, et al. 1995. *Ermittlung von my-Schlupf-Kurven an PKW-Reifen*. Karlsruhe: FAT Schritreihe (119), 1995.
- Grünberg, Heiko. 1999. *Untersuchung des Radradienverhältnisses und des Schlupfaufkommens als Beitrag zur Fahrsicherheit*. s.l.: VDI-Verlag, 1999. 3183378124, 9783183378128.
- Gustafsson, Fredrik. 1997. *Slip-based Tire-Road Friction Estimation*. England: Elsevier, 1997. DOI: 10.1016/S0005-1098(97)00003-4.
- Halgamuge, S.K. und Herpel, H.-J, Glesner, M. 1993. *Echtzeit Fahrbahnzustandserkennung mit Fuzzy-Neuronalen Netzen*. Dortmund: Springer Verlag, 1993. ISBN-13: 978-3-540-57524-5.
- Hartmann, Bernd und Eckert, Alfred. 2017. Fahrbahnzustandserkennung als neuer Teil der aktiven Fahrsicherheit. *ATZelektronik*. 2017, Ausgabe 5/2017.
- Haudum, Martin, et al. 2018. *Vehicle side-slip angle estimation on a banked and low-friction road*. s.l.: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2018. doi:10.1177/0954407017732852.
- Heimann, Bodo, et al. 2016. *Mechatronik, Komponenten - Methoden - Beispiele*. München: Carl Hanser Verlag München, 2016. ISBN-13: 978-3-446-44451-5.
- Heißing, Bernd, Ersoy, Metin und Gies, Stefan. 2013. *Fahrwerkhandbuch – Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme Mechatronik, Perspektiven*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 4. Auflage, 2013. ISBN-13: 978-3-658-01992-1.
- Heizmann, Michael, et al. 2014. *Signalverarbeitung bei Multisensoren*. Heidelberg: Springer Verlag, 2014. ISBN-13: 978-3-642-29941-4.
- Hering, Ekbert, et al. 2018. *Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer*. Berlin Heidelberg: Springer, 2018. ISBN-13: 978-3-662-57579-6.
- Herrmann, Martin. 2019. Sensormodelle für die Entwicklung und Absicherung automatisierter Fahrfunktionen. *ATZ Extra*. 24, S 20-23, 2019, DOI: 10.1007/s35778-019-0008-4.
- Hesse, Stefan und Schnell, Gerhard. 2018. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. Wiesbaden: Springer Verlag, 2018. ISBN-13: 978-3-658-05867-8.
- Hofmann, Martin. 2020. *Prozessoptimierung als ganzheitlicher Ansatz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2020. ISBN-13: 978-3-658-26625-7.

- Holldorb, Christian, Streich, Markus und Uhlig, Melina. 2015. *Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten*. Bergisch Gladbach: Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2015. ISBN-13: 978-3-95606-178-3.
- Holzmann, Frederic, Bellino, Mario und Siegwart, Rola. 2006. *Predictive estimation of the road-tire friction coefficient*. München: 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2006. DOI: 10.1109.
- Holzschulte, Jens. 2006. *Analyse der Reifenverformungen für eine Identifikation des Reibwerts und weiterer Betriebsgrößen zur Unterstützung von Fahrdynamikregelsystemen*. Aachen: Technische Hochschule, Dissertation, 2006. ISBN: 978-3-925194-79-5.
- Isermann, Rolf. 2006. *Fahrdynamik-Regelung*. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2006. ISBN-13: 978-3-8348-0109-8.
- ISO 22839. 2013. *Forward vehicle collision mitigation systems - Operation, performance, and verification requirements*. Geneva: International Standard, 2013. ISO 22839:2013.
- ISO 26262. 2011. *Straßenfahrzeuge - Funktionale Sicherheit*. s.l.: Beuth Verlag, 2011.
- ISO/Pas 21448, 2019;. 2019. *Road vehicles — Safety of the intended functionality*. s.l.: International Organisation for Standardisation, 2019.
- Jung, Steffen und Selegard, Raffael. 2018. *Verfahren zur Reibwertermittlung und zum Betreiben eines Kraftfahrzeugs*. DE102016220692A1 Deutschland, 26. April 2018. Reibwertidentifikation.
- Kalra, Nidhi und Groves, David. 2017. *The enemy of good. Estimating the cost of waiting for nearly perfect automated vehicles*. Santa Monica Calif.: s.n., 2017. ISBN-13: 978-0-833-09937-2.
- Karrenberg, Ulrich. 2017. *Signale Prozesse Systeme*. Berlin: Springer Vieweg, 2017. ISBN-13: 978-3-662-52659-0.
- Karrenberg, Ulrich. 2017. *Signale - Prozesse - Systeme - Eine intermediale und interaktive Einführung in die Signalverarbeitung*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ISBN-13: 978-3-662-52658-3.
- Kim, Seunghoon. 2019. *The Automotive Safety Trends. ISO26262 2nd Edition, SOTIF, Security and Agile*. s.l.: Hg. v. Vector Informatik GmbH, 2019.
- Klempau, Frank. 2003. *Untersuchungen zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystems im fahrenden Fahrzeug*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt; Dissertation, 2003. ISBN: 3-18-357612-0.
- Konrad, Michael und Schramm, Markus. 2018. *Absicherung von Assistenzsystemen per Sensorfusion*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018. ISSN: 0001-2785.
- Koskinen, Sami und Peussa, Pertti. 2009. *In-vehicle road friction monitoring*. Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2009. <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/SafetySecurityReview09.pdf>.
- Kuttner, Thomas. 2015. *Praxiswissen Schwingungsmechanik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH, 2015. ISBN-13: 978-3-658-04637-8.

- Leimbach, Frank. 2019. *"Der Mensch ist ein Risiko für automatisiertes Fahren"*. s.l.: ATZ Extra 24, 2019. 10.1007/s35778-019-0007-5.
- Lex, Cornelia. 2015. *Estimation of the Maximum Coefficient of Friction between Tire and Road Based on Vehicle State Measurements*. Graz: Dissertation, 2015. ISBN: 978-3-85125-422-8.
- Lex, Cornelia, et al. 2016. *Einfluss von Reifen- und Fahrbahneigenschaften auf die Funktionalität von Fahrerassistenzsystemen*. Bamberg: University of Bamberg Press, 2016. ISBN-13: 978-3-658-25938-9.
- Li, L., et al. 2014. *Comprehensive tire–road friction coefficient estimation based on signal fusion method under complex maneuvering operations*. China: Elsevier, 2014.
- Lufft, Fahrbahnsensor IRS31Pro-UMB. 2018. Lufft. [Online] 31. 12 2018. <https://www.lufft.com/de-de/produkte/strassen-runwaysensoren-308/intelligenter-passiver-fahrbahnsensor-irs31pro-umb-1792/>.
- Lufft, MARWIS specifications. 2018. Lufft. [Online] 31. 12 2018. [http://www.lufft-marwis.com/en\\_US/specifications](http://www.lufft-marwis.com/en_US/specifications).
- Lunze, Jan. 2016. *Regelungstechnik 1 - Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Heidelberg: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2016. ISBN-13: 978-3-662-52677-4.
- Maier, Christoph. 2013. *Integriertes Modell zur Entwicklung von funktional sicheren Produkten in der Automobilbranche*. Stuttgart: Universität Stuttgart; Dissertation, 2013. ISBN: 978-3-8396-0644-5.
- Marchthaler, Reiner und Dingler, Sebastian. 2017. *Kalman-Filter*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN-13: 978-3-658-16727-1.
- Masters, Brooke. 2019. Self-driving car companies find that going it alone is difficult. *Financial Times*. [Online] 2019. [Zitat vom: 19. 08 2019.] <https://www.ft.com/content/39c01b56-9be5-11e9-9c06-a4640c9feebb>.
- Matusko, Jadranko, Petrovic, Ivan und Peric, Nedeljko. 2007. *Neural network based tire/road friction force estimation*. Zagreb (Kroatien): Elsevier, 2007.
- Maurer, Markus, et al. 2015. *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Berlin: Springer Vieweg, 2015. ISBN-13: 978-3-662-45853-2.
- Maurer, Thomas. 2013. *Bewertung von Mess- und Prädiktionsunsicherheiten in der zeitlichen Eingriffsentscheidung für automatische Notbrems- und Ausweichsysteme*. Duisburg: Universität Duisburg-Essen, 2013. Dissertation.
- Mayer, Eugen. 2006. all-electronics. [Online] 14. 06 2006. [Zitat vom: 07. 01 2019.] <https://www.all-electronics.de/wp-content/uploads/migrated/article-pdf/74583/ei06-06-070.pdf>.
- Mayer, Ralph. 2018. *Internationales  $\mu$ -Symposium 2018 Bremsen-Fachtagung*. Berlin: Springer, 2018. ISBN-13: 978-3-662-58023-3.
- Meffert, Beate und Hochmuth, Olaf. 2018. *Werkzeuge der Signalverarbeitung*. Berlin: Humboldt-Universität zu Berlin, 2018. DOI 10.18452/19595.

- Menesklou, Wolfgang. 2017. *Skript Elektrotechnik Teil B*. Karlsruhe: Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft - University of applied sciences, 2017.
- Meyer, Martin. 2017. *Signalverarbeitung - Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2017. ISBN-13: 978-3-658-18320-2.
- Möder, Michael. 2018. *Digitale Signalverarbeitung in der Messtechnik*. Berlin: Springer, 2018. 978-3-662-56612-1.
- Moeller, Timo, et al. 2018. Reserve a seat-the future of mobility is arriving early. *Hg. v. McKinsey Center for Future Mobility*. 2018.
- Moll, Klaus-Uwe. 2018. *Quality Management in Product Development*. Ingolstadt: Technische Hochschule Ingolstadt, 2018.
- Müller, Dr.-Ing. Gerd und Müller, Prof. Dr.-Ing. Steffen. 2015. *Messung von Reibwerten unter Realbedingungen zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2015.
- Müller, Gerd, et al. 2017. *FAT 299 - Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen*. Berlin: FAT - Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., 2017. ISSN: 2192-7863.
- Müller, Igor. 2011. *Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2011. ISBN-13: 978-3-86918-118-9.
- Müller, Steffen, Uchanski, Michael und Hedrick, Karl. 2003. Estimation of the Maximum Tire-Road Friction Coefficient. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2003, Vol. 125.
- Nezami, Siamak. 2018. *Anforderungsidentifikation, Bewertung und Optimierung eines vorliegenden Reibwertsignals für automatisierte Fahrfunktionen*. Ingolstadt: Technische Hochschule, Masterthesis, 2018.
- Pacejka, Hans und Bakker, Eggbert. 1993. *The magic formula tyre model, tyre models for vehicle dynamic analysis, Proceedings of the 1st international colloquium on tyre models for vehicle dynamic analysis*. 1993. ISBN: 90-265-1332-1.
- Pacejka, Hans B. 2012. *Tire and Vehicle Dynamics*. Rotterdam: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN-13: 978-0-080-97017-2.
- Pacejka, Hans. 2006. *Tire and Vehicle Dynamics*. Amsterdam: Elsevier, 2006. ISBN: 9780080543338.
- Pegasus, Projekt. The Pegasus Method. <https://www.pegasusprojekt.de/en/pegasus-method>. [Online] [Zitat vom: 27. 10 2019.] <https://www.pegasusprojekt.de/en/pegasus-method>.
- Persson, B. 2001. *Theory of rubber friction and contact mechanics*. s.l.: The Journal of Chemical Physics, 2001. DOI: 10.1063/1.1388626.
- Persson, B., et al. 2005. Rubber friction on wet and dry road surfaces: The sealing effect. <https://www.aps.org/>. [Online] 2005. [Zitat vom: 23. 11 2019.] <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.71.035428>. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.035428.

- Porsche AG. 2016. Porsche newsroom. [Online] 03. Februar 2016. [Zitat vom: 22. Juni 2018.] <https://newsroom.porsche.com/de/unternehmen/porsche-oliver-blume-vorstandsvorsitzender-ceo-interview-mission-e-12184.html>.
- Porsche, AG. 2017. Porsche Newsroom - Das Medien-Portal von Porsche. *Weitblick*. [Online] 25. 04 2017. [Zitat vom: 21. 08 2018.] <https://newsroom.porsche.com/de/christophorus/ausgabe-380/porsche-christophorus-panamera-4s-inno-drive-philip-markschlaeger-13415.html>.
- Porsche-AG. 2019. Newsroom-Das Medien-Portal von Porsche. *Newsroom-Das Medien-Portal von Porsche*. [Online] 8. Juni 2019. [Zitat vom: 21. Juni 2018.] <https://newsroom.porsche.com/de/media-search.html?filter=news&term=taycan#>.
- Puente León, Fernando und Bauer, Sebastian. 2017. *Praxis der Digitalen Signalverarbeitung*. Karlsruhe: Scientific Publishing, 2017. ISBN-13: 978-3-7315-0651-5.
- Raste, Thomas, Lauer, Peter und Hartmann, Bernd. 2019. *Entwicklung eines Road Condition Observers im Projekt "Vehicle Motion Control"*. Berlin: Springer, 2019. ISBN-13: 978-3-662-58023-3.
- Rausch, Mathias. 2007. *FlexRay - Grundlagen, Funktionsweise, Anwendung*. s.l.: Hanser, 2007. ISBN-13: 978-3-446-41530-0.
- Reif, Konrad. 2010. *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag, 2010. ISBN-13: 978-3-8348-9717-6.
- . 2016. *Sensoren im Kraftfahrzeug*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. ISBN-13: 978-3-658-11210-3.
- Reis, Dennis und Reichardt, Maximiliane. 2019. *Autonomes Fahren und die rechtlichen Fragen*. [Hg. v. Automobil Industrie] s.l.: Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 2019.
- Reway, Fabio. 2018. *Testen von Umfeldsensoren für automatisiertes Fahren*. Technische Hochschule Ingolstadt: DLR Symposium, 2018.
- Robert Bosch GmbH. 2007. *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2007. ISBN-13: 978-3-8348-0138-8.
- Robert-Bosch-GmbH. 2017. Bosch Mobility Solutions. [Online] 2017. [Zitat vom: 25. 07 2018.] [https://www.bosch-mobility-solutions.de/media/global/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driving-safety-systems/brake-booster/ibooster/produktdatenblatt\\_ibooster.pdf](https://www.bosch-mobility-solutions.de/media/global/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driving-safety-systems/brake-booster/ibooster/produktdatenblatt_ibooster.pdf).
- Roddeck, Werner. 2014. *Handbuch Maschinenbau*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014. ISBN-13: 978-3-658-06597-3.
- Root, Elena. 2009. *Aspekte des Sicherheitsbegriff in der automobilen Anwendung*. Koblenz: Universität Koblenz-Landau, FB Informatik, 2009.
- Runkler, Thomas A. 2015. *Data Mining - Modelle und Algorithmen intelligenter Datenanalyse*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN-13: 978-3-8348-2171-3.
- Ruser, Heinrich und Puente, Fernando. 2007. *Informationsfusion - Eine Übersicht*. München: Oldenbourg Verlag, 2007. DOI 10.1524/temme.2007.74.3.93.

- SAE J3016. 2018. *Taxonomy and Definitions for Terms and Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. 2018.
- Schmidt, Herrad und Schwabl-Schmidt, Manfred. 2014. *Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung*. Wiesbaden: Springer Verlag, 2014. ISBN-13: 978-3-658-03522-8.
- Schmidt, Martin, et al. 2011. *Funktionale Sicherheit - Umgang mit Unabhängigkeit, rechtlichen Rahmenbedingungen und Haftungsfragen*. Saar: Hg. v. SGS TÜV, 2011.
- Schmiedel, Bernhard. 2014. *Fahrbahn-Nässe und Fahrbahn-Glätte-Detektion zur Warnung vor gefährlichen Fahrzuständen*. Weissach: Masterthesis, 2014.
- Schmiedel, Bernhard. 2018. *Indirekte Schätzung des Fahrbahn-Nässegrads zur Detektion von gefährlichen Fahrzuständen*. Karlsruhe: Univeristäts Dissertation noch nicht veröffentlicht, 2018.
- Schmiedel, Bernhard und Gauterin, Frank. 2019. *Tire Splash and Spray Directly before and during Hydroplaning*. s.l.: Tire Science and Technology, 2019. ISSN: 0090-8657.
- Schmiedel, Bernhard, Gauterin, Frank und Unrau, Hans-Joachim. 2019. *Study of system layouts for road wetness quantification via tire spray*. s.l.: Springer Nature Switzerland AG, 2019. DOI 10.1007/s41104-019-00044-y.
- Schnieder, Lars und Hosse, René S. 2019. *Leitfaden Safety of the Intended Funxtionality*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2019. ISBN-13: 978-3-658-25023-2.
- Schramm, Dieter und Weber, Thomas. 2020. *Sensorsystem zur autonomen Fahrbahnzustandserkennung (SEEROAD)*. Duisburg-Essen: Universität Duisburg-Essen, 2020. Förderkenzeichen: 19A16016D.
- Schramm, Dieter, Hiller, Manfred und Bardini, Roberto. 2018. *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Berlin: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-662-54481-5.
- Schramm, Ernst Joachim. 2002. *Reibung von Elastomeren auf rauen Oberflächen und Beschreibung von Nassbremseigenschaften von PKW-Reifen*. Regensburg und Hannover: Universität Regensburg, 2002.
- Shalev-Shwartz, Shai, Shammah, Shaked und Shashua, Am. 2017. *On a Formal Model of Safe and Scalable Self-driving Cars*. 2017.
- Singh, Kanwar-Bharat, Arat, Mustafa-Ali und Taheri, Saied. 2012. *Enhancement of Collision Mitigation Braking System Performance Through Real-Time Estimation of Tire-road Friction Coefficient by Means of Smart Tires*. Virginia Tech: SAE International, 2012. doi: 10.4271/2012-01-2014.
- Sprinzi, Michael, Strecker, Jörg und Werner, Thomas. 2009. *Verfahren zur Ermittlung des Reibwerts zwischen Reifen und Fahrbahn in einem Fahrzeug*. DE102009002245B4 Germany, 07. 04 2009.
- Staiger, Sebastian, Nosrat Nezami, Siamak und Schramm, Dieter. 2019. *Requirements & evaluation of friction information for the integration in vehicle systems*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. ISBN-13: 978-3-658-25939-6.

- Staiger, Sebastian. 2015. *Entwicklung einer Methode zur Beurteilung der Kontrollierbarkeit von Fehlfunktionen bei Fahrzeugprojekten*. s.l.: HTWG Konstanz, 2015.
- Steiger, Gerhard. 2016. *Towards a new mobility – the driver becomes the passenger*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN-13: 978-3-658-21443-2.
- Steinbach, Till. 2019. *Ethernet-basierte Netzwerkarchitekturen für künftige Echtzeitsysteme im Automobil*. s.l.: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 2019.
- Steinmeyer, Simon. 2014. *Probabilistische Fahrzeugumfeldschätzung für Fahrerassistenzsysteme*. Braunschweig: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2014. Dissertation.
- Stotz, Dieter. 2019. *Elektromagnetische Verträglichkeit in der Praxis*. Heidelberg: Springer, 2019. ISBN-13: 978-3-662-58874-1.
- Strumpf, Horst. 1997. *Handbuch der Reifentechnik*. Wien: Springer Verlag, 1997. ISBN-13: 978-3-7091-6519-5.
- Stüker, Dirk. 2004. *Heterogene Sensordatenfusion zur robusten Objektverfolgung im automobilen Straßenverkehr*. Oldenburg: Dissertation, 2004.
- Tille, Thomas. 2018. *Automobil-Sensorik 2 - Systeme, Technologien und Applikationen*. Berlin: Springer Vieweg, 2018. ISBN-13: 978-3-662-56309-0.
- Ullrich, Siegfried, Glaeser, Klaus-Peter und Sandler, Klaus. 1996. *Der Einfluß der Textur auf Reifen/Fahrbahngeräusch und Rollwiderstand*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 1996. ISBN-13: 978-3-894-29927-9.
- UNECE. 2017. UNECE. *UN Vehicle Regulations*. [Online] 30. November 2017. [Zitat vom: 02. 10 2018.]  
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2017/R079r3e.pdf>.
- Unterreiner, Michael. 2013. *Modellbildung und Simulation von Fahrzeugmodellen*. Duisburg: Universität Duisburg-Essen, 2013. Dissertation.
- Vaid, Kamal und Becker, Marco (Herausgeber). 2018. *Selbst ist das Auto - automatisiertes und autonomes Fahren. Die Zukunft der Mobilität*. Hamburg: Diplomica Verlag GmbH, 2018. ISBN-13: 978-3-961-46-584-2.
- VDA, Band 14. 2008. *Präventive QM Methoden in der Prozesslandschaft*. s.l.: Verband der Automobilindustrie, 2008.
- VDA, Verband der Automobilindustrie. 2015. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. *Automatisierung*. 2015.
- VDI 2206. 204. Verein Deutscher Ingenieure. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. 06 204.
- Vector Informatik, GmbH. 2019. Functional Safety and SOTIF. Principles and Practice. [Online] Vector Informatik GmbH, 2019. [Zitat vom: 21. 01 2020.]  
[https://assets.vector.com/cms/content/events/2019/VTT19/presentations/VTT19\\_23102019\\_Functional\\_Safety\\_and\\_SOTIF-Principles\\_and\\_Practice.pdf](https://assets.vector.com/cms/content/events/2019/VTT19/presentations/VTT19_23102019_Functional_Safety_and_SOTIF-Principles_and_Practice.pdf).
- Verband der Automobilindustrie, VDA. 2015. *Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. s.l.: Verband der Automobilindustrie e. V., 2015.

- W.E., Meyer und H. E., Kummer. 1964. *Die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn*. s.l.: ATZ, 1964.
- Weitzel, Dirk Alexander. 2013. *Objektive Bewertung der Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme*. Darmstadt: TU Darmstadt, 2013.
- Wiedemann, Jochen und Kerber, Stefan. 2001. *Bestimmung des maximalen Kraftschlusses an mit ABV ausgerüsteten Fahrzeugen und Fahrzeugzügen*. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), 2001.
- Winner, Hermann und Schopper, Michael. 2021. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021. DOI 10.1007/978-3-658-05734-3\_46.
- Winner, Hermann, et al. 2015. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN-13: 978-3-658-05733-6.
- Wirdemann, Ralf. 2011. *Scrum mit User Stories*. München: Carl Hanser Verlag München Wien, 2011. ISBN-13: 978-3-446-42660-3.
- Witte, B und Zuurbier, J. 1995. *Erfassung des Haftreibungsbeiwerts im fahrenden Fahrzeug und Messung von Reifenparametern bei verschiedenen Fahrbahnoberflächen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, Volume 1224, 1995. 3-18-091224-3.
- Wood, Matthew, et al. 2019. *Safety First for Automated Driving*. s.l.: Hg. v. L. L. C. Aptive Service US, Audi AG, Bayrische Motoren Werke AG, Beijing Baidu Netcom Science Technology Co., Ltd, Continental Teves AG & Co oHG, Daimler AG, HERE, FCA, Infineon, INTEL, Volkswagen AG, 2019.
- Zacher, Serge und Reuter, Manfred. 2017. *Regelungstechnik für Ingenieure - Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2017. ISBN-13: 978-3-658-17631-0.
- Zehren, Raphael. 2020. *Optimierung und Validierung eines Reibwertschätzers für den Einsatz in der automatisierten Längsregelung von Sportwagen*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2020. 20-F-0001.
- Zimmermann, Hans-Jürgen, et al. 1993. *Fuzzy Technologien - Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1993. ISBN-13: 978-3-540-62199-7.
- Zimmermann, Werner und Schmidgall, Ralf. 2014. *Bussysteme in der Fahrzeugtechnik - Protokolle, Standards und Softwarearchitektur*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN-13: 978-3-658-02418-5.



## 9 Anhang

### Spezifikationen Versuchsfahrzeug

PORSCHE 911 CARRERA 4S (TYP 992)	
<b>Bezeichnung</b>	Porsche 992 C4S Coupe 3,0
<b>Max. Leistung</b>	331 kW bei 6500 r/min
<b>Vorderachse (VA)</b>	McPherson-Federbeinachse, Stabilisator vorn
<b>Hinterachse (HA)</b>	Mehrlenker-Hinterachse, Stabilisator hinten
<b>Lenkung</b>	Elektromechanische Servolenkung mit variabler Übersetzung
<b>Bremsanlage VA</b>	6-Kolben-Aluminium-Monobloc-Festsattelbremsen, Bremsscheibe innenbelüftet und gelocht mit Wolframcarbidbeschichtung
<b>Bremsanlage HA</b>	4-Kolben-Aluminium-Monobloc-Festsattelbremsen, Bremsscheibe innenbelüftet und gelocht mit Wolframcarbidbeschichtung
<b>Räder VA / HA</b>	8,5 J x 20 ET 53 / 11,5 J x 21 ET 67 (Sommer) 8,5 J x 20 ET 53 / 11 J x 21 ET 66 (Winter)
<b>Reifen VA / HA</b>	245/35 ZR20 / 305/30 ZR21 (95Y) Goodyear Eagle F1 Asymmetric 3 (Sommer) 245/35 R20 / 295/30 R21 (102V) XL M+S Michelin Pilot Alpin 5 (Winter)
<b>L x B x H</b>	4519 mm x 1852 mm x 1300 mm
<b>Spurweite VA / HA</b>	1589 mm / 1557 mm
<b>Radstand</b>	2450 mm
<b>Leergewicht (DIN)</b>	1565 kg
<b>cW</b>	0,29
<b>Stabilitätsprogramm</b>	Porsche Stability Management (PSM) inkl. ABS, ASR, MSR, ABD und Bremsassistent
<b>Getriebe</b>	8-Gang Doppelkupplungsgetriebe
<b>Antrieb</b>	Allradantrieb, elektrohydraulisch geregelte Längs- und Quersperre (HA)
<b>Aufhängung</b>	Stahlfedern, aktives Dämpfersystem (PASM)
<b>Fahrwerk</b>	Aktive Wankstabilisierung, Hinterachslenkung

Abbildung 9.1: Versuchsfahrzeug (Porsche-AG, 2019)

## Sensorspezifikationen

Messgröße	Sensor	Abtastrate [ms]	Beschreibung	Einbaulage 992	Quelle	Signal	Einheit	Bereich	Präzision
<b>Außentemperatur</b>	Außenfühler	80	Ungefilterter Wert des Außentemperatur-sensors	Bug Mittelteil v.r.n.l.	Klima_Sensor_02	BCM1_Aussen_temp_umgef	°C	-50 .. 76	0.5
<b>Wischergeschw.</b>	-	40	Durch Sensorik gemessene Wischgeschwindigkeit	Wischerantrieb vorne	Wischer_01	Wischer1_Wischgeschwindigkeit	min <sup>-1</sup>	10 .. 70	1
<b>Näsensensor</b>	Körperschallsensor	40	Gemessener Nässegrad	Radhauschale vorne	EFP	EFP_Naessee_Level	-	[0;1;2;Fehler]	-
<b>Beschleunigung</b>	Inertialsensor	20	Beschleunigung X-Richtung	-	ZFAS	EML_BeschlX	m/s <sup>2</sup>	-20.45 .. 20.45	0.02
		20	Beschleunigung Y-Richtung	-	ZFAS	EML_BeschlY	m/s <sup>2</sup>	-20.45 .. 20.45	0.02
<b>Geschwindigkeit</b>	Raddrehzahl-sensoren	20	Mittlere Umfangsgeschwindigkeit der	Rad	ESP	ESP_v_Signal	km/h	0 .. 655.32	0.01
<b>Kamerabild</b>	Kamera	33	Videosignal der USB-Kamera	Rückspiegel, nach vorne	USB Kamera	WebCam	-	640 x 480 px	-
<b>Bremsdruck</b>	Bremsdrucksensor	160	Druck im zentralen Bremszylinder	Bremszylinder	ESP	ESP_Bremsdruck	bar	-30 .. 276.6	0.3
<b>Steigung</b>	Virtueller Sensor	320	Steigung	-	TSK	TSK_Steigung_02	%	-100.8 .. 101.6	0.8
<b>GPS</b>	GPS Empfänger	160	Breitengrad	-	NavPos_01	NP_LatDegree	°	0 .. 90	0.000001
		160	Längengrad	-	-	NP_LongDegree	°	0 .. 180	0.000001
		160	GPS Geschwindigkeit	-	-	ND_Velocity	m/s	0 .. 102.1	0.1
		160	Höhe über NN	-	-	NP_Altitude	m	-500 .. 7686	2

Tabelle 9.1: Sensorspezifikationen

## Auszug Erhobene Messwerte

Index	Zeit in Messung [s]	Dauer ABS [s]	$\mu$ ge- nutzt	$\mu$ ges- chätzt	Fehler	Nässe- level	Temperatur [°C]	Wischer- geschw. [1/min]	Geschw. [km/h]
1	7,75	1,22	0,757	0,858	0,101	1	7,0	40	52,2
2	8,57	0,78	0,844	0,856	0,012	1	7,0	40	54,0
3	23,25	1,70	0,899	0,854	-0,044	1	7,0	40	54,0
4	66,91	0,88	0,799	0,857	0,058	2	7,0	50	66,6
5	82,41	1,98	0,845	0,844	-0,001	1	7,0	43	69,1
6	106,01	0,62	0,852	0,850	-0,002	1	7,0	43	70,9
7	50,03	0,50	1,111	0,968	-0,143	0	11,0	40	86,4
8	91,83	0,52	1,006	0,968	-0,038	0	10,5	9	97,2
9	91,21	1,10	0,842	0,870	0,029	2	11,0	46	121,3
10	3,79	0,62	0,693	0,856	0,162	2	10,5	60	90,0
11	38,40	0,70	0,721	0,867	0,146	1	10,0	60	104,4
12	83,59	0,58	0,771	0,867	0,096	2	10,0	60	106,9
13	27,73	1,12	0,535	0,879	0,344	1	2,0	9	22,3
14	28,39	0,60	0,527	0,879	0,352	1	2,0	9	28,8
15	43,79	2,02	0,507	0,907	0,400	1	2,0	9	29,5
16	80,10	1,24	0,820	0,879	0,059	1	2,0	9	92,5
17	12,98	1,30	0,670	0,873	0,203	1	2,5	40	47,5
18	44,72	1,84	0,774	0,871	0,097	1	2,0	40	49,3
19	84,28	0,64	0,640	0,857	0,217	1	2,5	9	72,7
20	86,54	1,76	0,787	0,856	0,069	1	2,5	9	73,8
21	97,86	0,68	0,708	0,867	0,159	1	2,5	40	72,7
22	16,38	0,90	0,833	0,600	-0,233	1	13,0	40	129,6
23	98,82	0,92	0,805	0,872	0,067	1	2,5	9	78,1
24	99,40	0,54	0,802	0,874	0,072	1	2,5	9	78,1
25	8,33	3,30	0,839	0,858	0,019	1	2,5	40	92,5
26	24,71	0,74	0,924	0,854	-0,070	1	3,0	9	97,2
27	26,15	0,76	0,924	0,854	-0,070	1	3,0	40	97,2
28	117,36	0,78	0,826	0,852	0,026	1	3,0	40	73,8
29	30,78	1,28	0,791	0,857	0,066	1	3,0	50	45,7
30	18,77	1,44	0,838	0,865	0,027	1	11,5	40	124,9
31	5,30	0,74	0,967	0,873	-0,094	1	12,0	46	172,8
32	17,84	1,42	0,921	0,600	-0,321	2	13,0	40	128,5
33	741,17	0,50	0,807	0,868	0,062	2	10,5	60	124,9
34	867,55	0,66	0,874	0,868	-0,005	1	10,5	60	168,1
35	1217,00	1,66	0,850	0,870	0,020	1	11,0	60	183,6
36	36,09	0,72	0,692	0,600	-0,092	2	12,5	40	115,9
37	2,92	0,64	1,067	1,051	-0,016	0	15,5	9	29,5
38	5,60	0,94	1,030	0,998	-0,032	0	15,0	9	46,8
39	10,01	0,96	1,098	0,900	-0,198	0	14,5	9	47,5
40	10,72	1,08	1,183	0,900	-0,283	0	14,5	9	75,6
41	7,89	1,68	1,152	1,011	-0,141	0	15,5	9	73,8
42	6,42	0,64	0,989	1,037	0,048	0	16,0	9	28,8
43	8,94	0,98	1,093	1,007	-0,086	0	17,0	9	46,8
44	7,52	0,56	1,183	1,019	-0,164	0	17,5	9	70,9
45	8,60	0,88	1,169	1,008	-0,162	0	17,5	9	70,2
...									
210	405,53	1,68	0,925	0,960	0,034	0	8,0	9	87,1
211	483,89	1,20	0,862	0,960	0,098	0	7,5	9	86,4

Tabelle 9.2: Erhobene Messwerte

## Skript für Schlupfkurve

Basierend auf der von Pacejka definierten Magic Formula Tire Model (Pacejka, 2012):

$$F_Y = D * \sin[C * \arctan\{B * \alpha - E(B * \alpha - \arctan(B * \alpha))\}]$$

Mit:

$$B = \frac{C_F \alpha}{CD}$$

$$D = \mu * F_Z$$

$$C = c_1 * \sin \left[ 2 \arctan\left(\frac{F_Z}{c_2}\right) \right]$$

(Werte B,C,D, c<sub>1</sub>,c<sub>2</sub>, können auch empirisch erschlossene Werte sein)

```
%%%%%%%%%% Tire_Magic_Formula %%%%%%%%%%%
```

```
%% Empirische Werte Reifenmodell %%
```

```
D= 1.1;
E= 0,65;
C= 2.0;
B= 6;
k= linspace (0,1.1);
s= linspace (0,0,3);
```

```
%% Formel %%
```

```
F=D*sin(C*atan(((B*k)-E*((B*k)-atan(B*k)))))+s;
```

```
%% Angabe für Plot %%
```

```
hold off
plot(F, "r", "LineWidth", 2)
grid on
hold on
ylim([0 1.3])
[MAX, pos_max] = max(F)
plot([pos_max pos_max], [0 MAX], 'k:', "LineWidth", 1);
plot([0 pos_max], [MAX MAX], 'k:', "LineWidth", 1);
xlabel("Schlupf [%]");
ylabel("Reibwert [ ]");
title ("Schlupfkurve");
clc;
```

## Skript für gleitenden Mittelwertfilter

```
%%% SKRIPT GLEITENDER MITTELWERT %%%
```

```
%Abtastung
```

```
Fs=5; % Abtastfrequenz
Ts= 1/Fs; % Abtastzeit
nfft= 501; % Datenpunkte
time=0:Ts:(nfft-1)*Ts; % Zeitvektor
```

```
% Erzeugen des Gleitenden Mittelwerts über 500 Datenpunkte
```

```
ReibwertSignal = Signal (7500:8000);
Datenpunkte = 5;
%% Wie viele Datenpunkte werden im Mittelwert berücksichtigt%%
```

```
%%% CODE %%%
```

```
coeff_gLMW = ones(1, Datenpunkte)/Datenpunkte;
gLMW = filter(coeff_gLMW, 1, ReibwertSignal);
```

```
%Berücksichtigen der Verschiebung
```

```
Delay = (length(coeff_gLMW)-1)/2;
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
%Skript für Erstellen des Plots unkorrigiertes Signal:
```

```
%plot(time,[ReibwertSignal gLMW]);
```

```
%hold on
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
% Plot des Signals mit berücksichtigter Verschiebung und korrigierten gleiten-
den Mittelwert %
```

```
plot(time,ReibwertSignal,...
time-Delay/Datenpunkte,gLMW);
```

```
ylabel('Reibwert');
```

```
xlabel("Zeit in Sekunden");
```

```
title('Reibwertsignal');
```

```
legend('Ursprüngliches Signal','Gefiltert','location','best');
```

## Skript für das Kalmanfilter

### %% Abstrahiertes Kalman-Filter Skript

```

close all;
clc;
Ts=0,02;           %Abtastzeit [Hz]
t=0:Ts:10;        %Zeitvektor [s]
std_noise=0,1;    %Messrauschen
var_noise=std_noise^2; %Varianz Messrauschen

%Ursprungssignal und Erzeugung des Rauschprozesses
signal=fzbFricUsed(7501:8001);
signal=transpose(signal);
meas=signal+std_noise*randn(size(signal));

%Varianz des Messrauschens(Einstellung Bandweite Filter)
var_process=0,075;

%Konstante Matrizen
Rn=var_noise; %Kovarianz Rauschen
Qn=[0 0;0 var_process]; %Kovarianz des Messrauschens
sig=[1 Ts; 0 1]; %Abtastzeit und Schritt
M=[1 0]; %Eingangsmatrix
H=M;
pos_s(1)=meas(1);
vel_s(1)=0;
pos_s(2)=meas(2);
vel_s(2)=(pos_s(2)-pos_s(1))/Ts;
X_piu=[pos_s(2);vel_s(2)]; %Annäherung an Signalursprung
P_piu=[std_noise sqrt(2*var_noise)/Ts]'*[std_noise sqrt(2*var_noise)/Ts]; %Ab-
schätzung des Fehlers

```

(Fortsetzung nächste Seite)

```

%Kalman filter
%Innerhalb der Schleife werden Prädiktion und Korrektur ausgeführt
for(i=3:length(signal))
X_meno=sig*X_piu;
P_meno=sig*P_piu*sig'+Qn;
Kk=P_meno*H'*(H*P_meno*H'+Rn)^(-1);
K_pos(i)=Kk(1,1);           %Speicherung Zwischenschritt
K_vel(i)=Kk(2,1);
X_piu=X_meno+Kk*(meas(i)-H*X_meno);
P_piu=( [1 0;0 1]-Kk*H)*P_meno;
pos_s(i)=X_piu(1,1);
vel_s(i)=X_piu(2,1);
end

%Kalman Verstärkung
g=K_pos(length(K_pos));
h=K_vel(length(K_vel));

%Ausgabe
figure;
hold on
plot(t,signal, 'b','LineWidth',2)
plot(t, pos_s, 'xr', 'MarkerSize', 5);
stairs(t, pos_s,'--m', 'LineWidth', 0,5)
legend('Reibwertsignal','Kalman Schätzung','Linearisiertes Signal');
title('Kalmanfilterung Reibwertsignal');
xlabel('Zeit in Sekunden');
ylabel('Reibwert [ ]');
xlim([0 6])

ylim([-0,1 1.1])

```

# Fuzzifizierung Eingangsgrößen

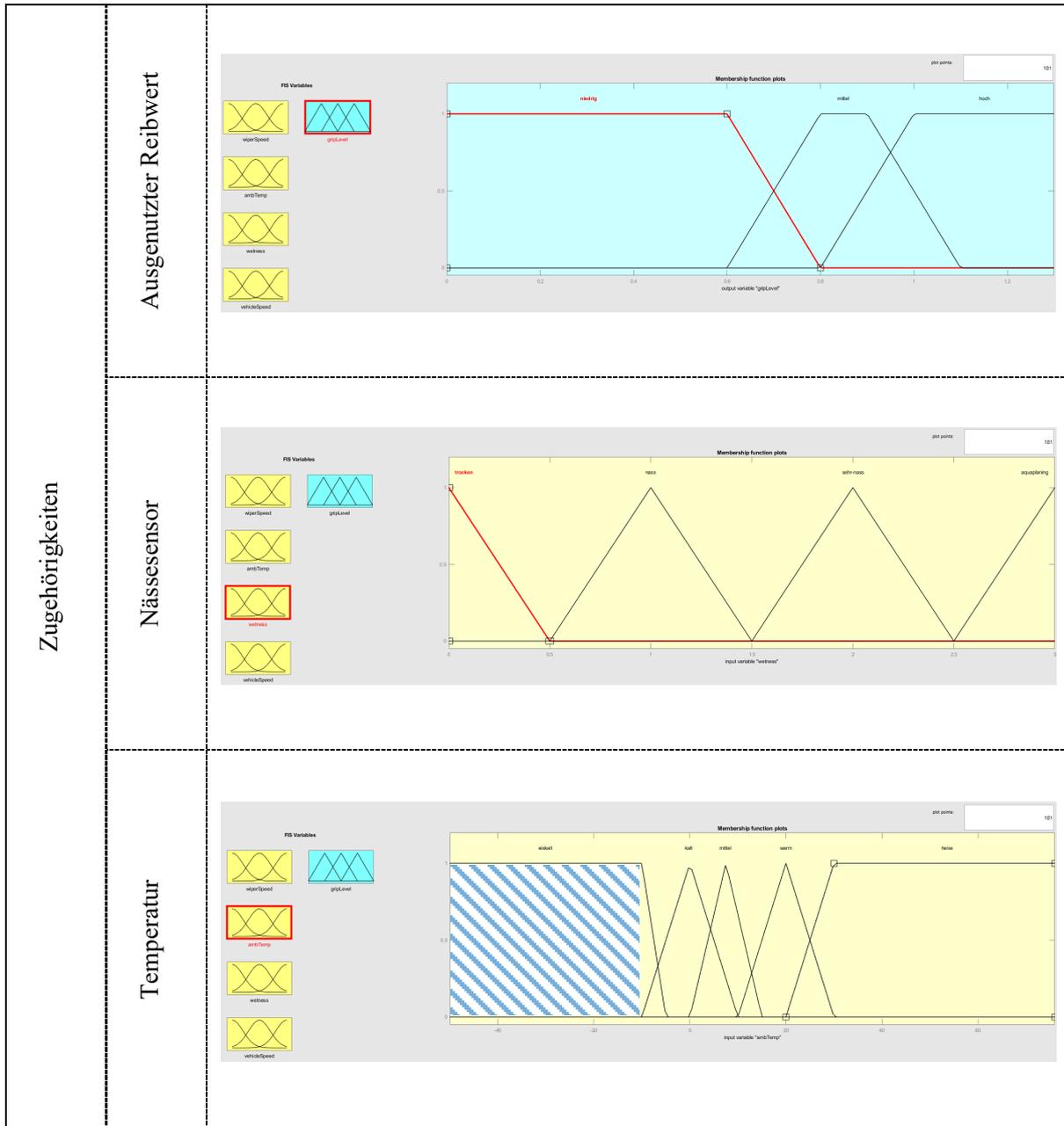


Abbildung 9.2: Fuzzifizierung Eingangsgrößen

# Elemente des Fuzzy Reglers

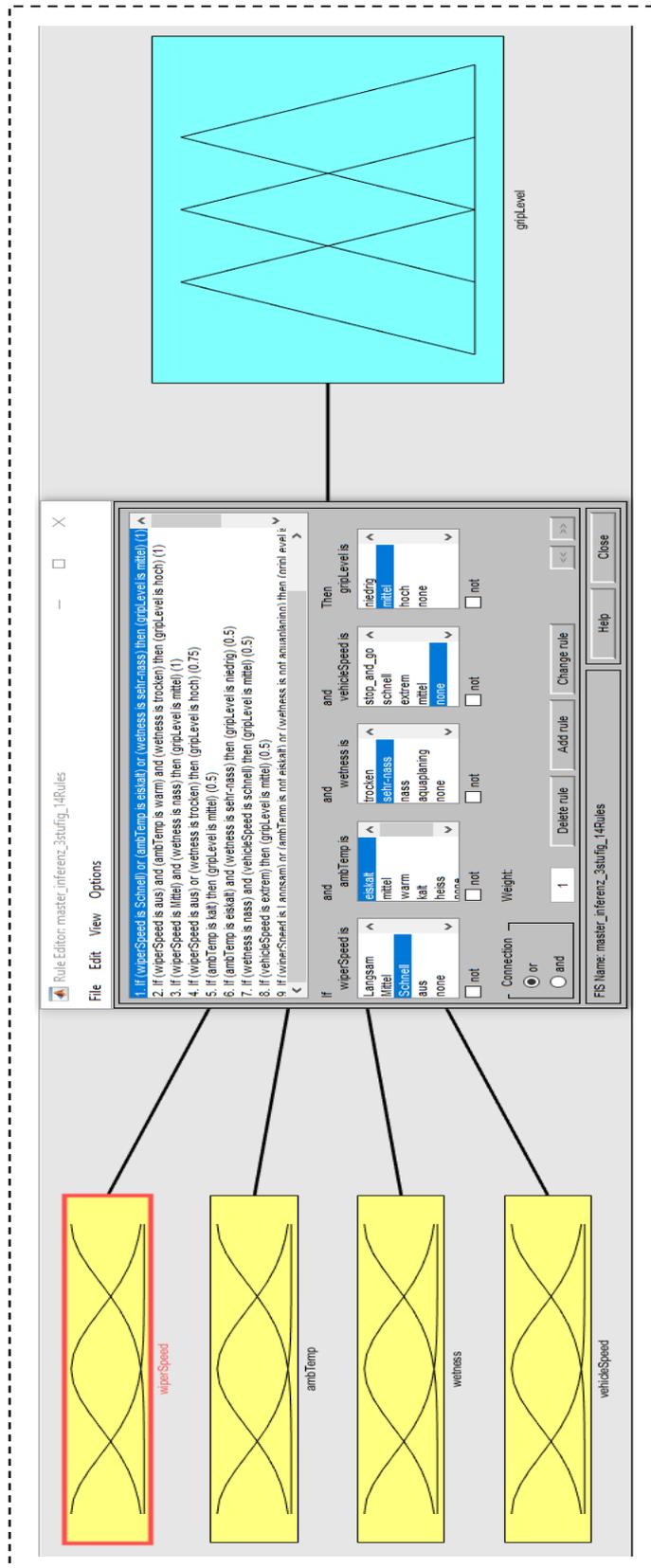


Abbildung 9.3: Elemente des Fuzzy Reglers

# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub | universitäts  
bibliothek

Diese Dissertation wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

**DOI:** 10.17185/duepublico/81799

**URN:** urn:nbn:de:hbz:465-20240417-113709-3

Alle Rechte vorbehalten.