

Ein kommunikationsbasiertes Gefahrstellenwarnsystem für Motorräder

Vom Fachbereich Maschinenbau an der
Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Benedikt Lattke
aus Schmitten im Taunus

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf
Tag der Einreichung:	30. April 2012
Tag der mündlichen Prüfung:	26. Juni 2012

Darmstadt 2012

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt. Die Inhalte dieser Dissertation wurden in den von mir geleiteten FZD-Teilprojekten der Forschungsprojekte „MoLife“ und „SenComBox“ erarbeitet. Beide Projekte wurden im Rahmen des Zentralen Innovationsprogrammes Mittelstand (ZIM) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert und in Kooperation mit der Firma carhs.communication GmbH durchgeführt.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner für die hervorragende Betreuung. Die tiefgehenden fachlichen Diskussionen mit ihm, die mir gewährten Freiheiten und die stetige Unterstützung haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Bert Breuer, dem Gründer und ehemaligen Leiter von FZD, danke ich für seine konstruktive Kritik und hilfreichen Anmerkungen in meinen Doktorandenseminaren.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats und die wertvollen Hinweise zur Erstellung dieser Arbeit.

Dem BMWi danke ich für die Förderung und somit für die Möglichkeit zu einem spannenden wissenschaftlichen Thema. Die erfolgreiche Durchführung der beiden genannten Projekte war nur möglich durch die gute Zusammenarbeit und Unterstützung durch die Firma carhs.communication GmbH. Hierfür danke ich recht herzlich. Besonderer Dank gilt Herrn Dr. rer. nat. Alois Mauthofer für die vielen Ideen zu Projektbeginn und Herrn Dipl.-Ing. Richard Eberlein für die Unterstützung beim Versuchsträgeraufbau sowie bei der prototypischen Realisierung. Der Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH, hier insbesondere Herrn Oliver Fuchs, danke ich für die Zurverfügungstellung eines Versuchsmotorrades. Ohne dieses wären viele Versuche nicht möglich gewesen.

Viele Institutionen haben durch Zurverfügungstellung von Datenmaterial oder Versuchseinrichtungen zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Hierfür danke ich der Bundesanstalt für Straßenwesen, dem Hessischen Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen sowie der Hockenheim-Ring ADAC FSZ GmbH.

Allen Mitarbeitern von FZD, einschließlich der Werkstätten und des Sekretariats, danke ich für das äußerst angenehme, oft freundschaftliche und stets kollegiale Arbeitsumfeld. Für die fruchtbaren Diskussionen und wertvollen Hinweise in Bezug auf diese Arbeit bedanke ich mich besonders bei den beiden FZD-Motorradforschern Kai und Patrick, meinen Bürokollegen Nico und Andree sowie dem Motorradlehrbeauftragten Dr.-Ing. Alois Weidele.

Mein Dank geht auch an die vielen Studenten, die im Rahmen studentischer Arbeiten sowie als wissenschaftliche Hilfskräfte zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. In

besonderer Weise bedanke ich mich bei den Herren Sebastian Barth, Daniel Hanssmann, Kamil Klonecki, Tobias Müller, Ralph Schad, Daniel Schröter, Tim Schulze, Frank Sperber, Martin Zademach und Christoph Zinke.

Meine Freundin Julia und meine Familie haben großes Verständnis für meine Arbeit aufgebracht und mir den notwendigen Rückhalt gegeben. Sie schenken mir viel Kraft und Mut. Dafür bedanke ich mich von Herzen. Meinen Eltern und Großeltern im Speziellen danke ich dafür, mir eine so ausgezeichnete Ausbildung ermöglicht zu haben.

Benedikt Lattke

Schmittgen, April 2012

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	IX
Zusammenfassung	XIII
1 Einführung	1
1.1 Unfallgeschehen in Deutschland	1
1.2 Motivation	2
1.3 Ziele der Arbeit	3
1.4 Methodik und Aufbau der Arbeit	4
2 Stand von Forschung und Technik	6
2.1 Kommunikationstechnik für Motorräder	6
2.1.1 Honda Advanced Safety Vehicle	6
2.1.2 BMW Connected Ride	6
2.1.3 Sonstige	7
2.2 Kommunikationsbasierte Warnsysteme	8
2.3 Warn- und Informationselemente	11
2.4 Fazit zum Stand von Technik und Forschung	12
2.4.1 Kommunikationsbasierte Warnsysteme (für Motorräder)	12
2.4.2 Warn- und Informationselemente	13
2.5 Ermittlung des Forschungsbedarfes	13
3 Potentialbewertung	15
3.1 Untersuchung des Unfallgeschehens von Motorrädern	15
3.1.1 Ursachen von Motorradunfällen	15
3.1.2 Unfalldatenbankrecherche	17
3.2 Nutzerbefragung	20
3.2.1 Datenbasis	21
3.2.2 Durchführung	21
3.2.3 Ergebnisse	22
3.3 Fazit	24
4 Untersuchungswerkzeuge	25
4.1 Versuchsmotorrad	25
4.2 Sensorik	26
4.3 Koordinatensysteme	27
4.3.1 Definition verwendeter Koordinatensysteme	27
4.3.2 Ergänzende Definition von Drehbewegungen	28
4.3.3 Koordinatentransformation	28

4.4	Rollwinkelschätzung	29
4.4.1	Rolldynamik	29
4.4.2	Kalman-Filter-Entwurf	30
4.4.3	Schätzgenauigkeit	32
5	Fahrdynamik in Gefahrstellen	34
5.1	Gefahrstellenerkennung - Stand der Technik	34
5.1.1	Kritische Kurvenfahrsituationen	34
5.1.2	Reibwertsprünge bei Geradeausfahrt	37
5.2	Unebene Fahrbahn	41
5.2.1	Bewertung der Fahrbahnlängsunebenheit	42
5.2.2	Höhenlängsprofile von Fahrbahnen	42
5.2.3	Allgemeiner Unebenheitsindex	44
5.2.4	Erkennung unebener Fahrbahnen	45
5.2.5	Hypothesenbildung	48
5.3	Einzelne Fahrbahnschäden	49
5.3.1	Beschreibung von Einzelschäden	49
5.3.2	Erkennung von Einzelschäden	50
5.3.3	Hypothesenbildung	54
5.4	Ausweichmanöver	55
5.4.1	Motorrad-Ausweichmanöver in der Literatur	55
5.4.2	Erkennung von Ausweichmanövern	56
5.4.3	Hypothesenbildung	59
5.4.4	Beispiele für Mustermanöver	59
6	Evaluierung der Erkennungsmethoden	60
6.1	Unebene Fahrbahn	60
6.1.1	Validierungsversuche	60
6.1.2	Ergebnisse	63
6.1.3	Fazit	66
6.1.4	Diskussion	66
6.2	Einzelne Fahrbahnschäden	68
6.2.1	Validierungsversuche	68
6.2.2	Ergebnisse	70
6.2.3	Fazit	75
6.2.4	Diskussion	75
6.3	Ausweichmanöver	77
6.3.1	Validierungsversuche	77
6.3.2	Ergebnisse	80
6.3.3	Fazit	84
6.3.4	Diskussion	85
7	Warnmaßnahmen	87
7.1	Methodik	87
7.2	Anforderungen	87
7.2.1	Anforderungen an die HMI-Gestaltung	87
7.2.2	Anforderungsdefinition	88

7.3	Warnstrategie	89
7.3.1	Warnstufen	89
7.3.2	Warnzeitpunkte	90
7.4	Bewertung und Zuordnung von Warnelementen	91
7.5	Gestaltungsbeispiele	92
7.5.1	Vorauswahl	92
7.5.2	Bewertung und Zuordnung	93
8	Bewertung von Warnmaßnahmen	95
8.1	Konzeption einer Probandenstudie	95
8.1.1	Probandenkollektiv	95
8.1.2	Versuchsaufbau	96
8.1.3	Probandenbewertung	98
8.2	Ergebnisse	99
8.2.1	Informierende Warnstufe	99
8.2.2	Alarmierende Warnstufe	102
8.3	Fazit	105
8.3.1	Informierende Warnstufe	105
8.3.2	Alarmierende Warnstufe	105
8.4	Diskussion	106
9	Gesamtfazit und Ausblick	107
A	Anhang	109
A.1	Unfallgeschehen in Deutschland	109
A.1.1	Unfallzahlen	109
A.1.2	Jahresfahrleistung	110
A.1.3	Bestandsdaten	111
A.1.4	Unfallrisiken	111
A.2	Bestimmung von GIDAS-Gewichtungsfaktoren	112
A.3	Nutzerbefragung	113
A.3.1	Datenbasis	113
A.3.2	Fragebogen zur Gefahrstellenbewertung	114
A.3.3	Umfrageergebnisse	116
A.4	Kalman-Filter zur Rollwinkelschätzung	117
A.4.1	Grundlagen	117
A.5	Unebeheitsbestimmung	118
A.5.1	Merkmale der Strecken zur Validierung der Unebenheitserkennung	118
A.5.2	Vergleich der Referenzgrößen	118
A.6	Verläufe zur Unebenheitserkennung	119
A.6.1	Strecke S1	119
A.6.2	Strecke S2	120
A.6.3	Strecke S3	121
A.7	Erkennung von Ausweichmanövern	122
A.7.1	Falscherkennung	122
A.8	Bestimmung von Warnzeitpunkten	122

A.9	Probandenstudie	123
A.9.1	Probandenaufteilung	123
A.9.2	Probandenfragebogen	124
A.9.3	Ergebnisse der Probandenbewertungen	128
A.9.4	Statistische Auswertung der Probandenbewertungen	131
	Literaturverzeichnis	132

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	m/s^2	Beschleunigung
$\hat{a}$	m/s^2	Amplitude der Beschleunigung
a_{ψ_v}	m/s^2	“künstliche“ Messgröße
AUN	m^3	Allgemeiner Unebenheitsindex
$\overline{AUN}$	m^3	AUN -Mittelwert
AUN_S	m^3	AUN -Schwellwert
AUN_W	m^3	AUN -Warnwert
B	m	Seitenversatz
c^*	—	Korrelationskoeffizient
c_{RR}	—	Korrelationsfaktor (Rollrate)
c_{RW}	—	Korrelationsfaktor (Rollwinkel)
d_B	m/s^2	Bremsverzögerung
E	diverse	Signalenergie
F	N	Kraft
f_0	Hz	Abtastfrequenz
F_G	N	Gewichtskraft
f_g	Hz	Grenzfrequenz
F_S	N	Seitenkraft
g	m/s^2	Normfallbeschleunigung
h	m	Profilhöhe
$\dot{h}$	m/s	Profilhöhenänderung
h_{eff}	m	effektive Höhe
h_s	m	Schwerpunkthöhe
L	m	(Wellen-) Länge
l	m	Radstand
l_h	m	Abstand von Schwerpunkt zu hinterem Radaufstandspunkt
l_v	m	Abstand von Schwerpunkt zu vorderem Radaufstandspunkt
m	kg	Masse
n	—	Anzahl
n_W	$1/\text{s}$	Raddrehzahl
P	diverse	Signalleistung
r	m	Nachlauf
R^2	—	Bestimmtheitsmaß
R^2_{korr}	—	korrigiertes Bestimmtheitsmaß

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
R_K	m	Kurvenradius
s	m	Weg
s_{Br}	m	Bremsweg
SF	—	Sicherheitsfaktor
s_{GPS}	m	Ungenauigkeit der Positionsbestimmung
s_H	m	Entfernung zur Gefahrstelle
s_R	m	Reaktionsweg
T	s	Periodendauer
t	s	Zeit
T_0	s	Abtastintervall
$t_{Ausweich}$	s	Ausweichzeit
t_F	s	Zeitfensterlänge
t_{Kurve}	s	Kurveneintrittszeitpunkt
t_{pass}	s	Passierzeitpunkt
t_R	s	Reaktionszeit
t_{th}	s	Time to Hazard
T_{Ty}	s	Länge eines Tukey-Fensters
t_{warn}	s	Warnzeitpunkt
v	m/s	Geschwindigkeit
$\hat{v}$	m/s	Amplitude der Geschwindigkeit
$\tilde{v}$	m/s	Median der Geschwindigkeit
v_0	m/s	Anfangsgeschwindigkeit
v_{Kurve}	m/s	Kurveneintrittsgeschwindigkeit
v_{pass}	m/s	Passiergeschwindigkeit
v_{warn}	m/s	Warngeschwindigkeit
$\check{w}$	—	Welligkeit
w_{Ty}	—	Tukey-Fensterfunktion
x	m	x-Position
y	m	y-Position
z	m	z-Position
$\hat{A}$	diverse	(diskrete) Systemmatrix
$\hat{C}_k$	diverse	(diskrete) Messmatrix zum Zeitpunkt k
Q	diverse	Varianz-Kovarianzmatrix des Prozessrauschens
R	diverse	Varianz-Kovarianzmatrix des Messrauschens
x	diverse	Zustandsvektor
y	diverse	Messvektor

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$\dot{\beta}$	°/s, rad/s	Schwimmwinkelgeschwindigkeit
$\dot{\beta}_{ist}$	°/s, rad/s	Ist-Schwimmwinkelgeschwindigkeit
$\dot{\beta}_{soll}$	°/s, rad/s	Soll-Schwimmwinkelgeschwindigkeit
$\Delta\dot{\beta}_{grenz}$	°/s, rad/s	Schwellwert
Δs	m	Streckenabschnitt

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
δ	$^{\circ}, \text{rad}$	effektiver Lenkwinkel
$\dot{\delta}$	$^{\circ}/\text{s}, \text{rad/s}$	effektive Lenkwinkelrate
δ_{H}	$^{\circ}, \text{rad}$	Lenkerwinkel
$\dot{\delta}_{\text{H}}$	$^{\circ}/\text{s}, \text{rad/s}$	Lenkerwinkelrate
Φ_{E}	diverse	Spektrale Energiedichte
Φ_{P}	diverse	Spektrale Leistungsdichte (Zeitkreisfrequenz-Bereich)
$\check{\Phi}_{\text{P}}$	diverse	Spektrale Leistungsdichte (Wegkreisfrequenz-Bereich)
λ	$^{\circ}, \text{rad}$	Rollwinkel
$\dot{\lambda}$	$^{\circ}/\text{s}, \text{rad/s}$	Rollrate
$\ddot{\lambda}$	$^{\circ}/\text{s}^2, \text{rad/s}^2$	Rollbeschleunigung
λ_0	$^{\circ}, \text{rad}$	Amplitude des Rollwinkels
$\dot{\lambda}_0$	$^{\circ}/\text{s}, \text{rad/s}$	Amplitude der Rollrate
λ_{th}	$^{\circ}, \text{rad}$	physikalisch wirksamer Rollwinkel
μ	—	Kraftbeiwert
ν	$^{\circ}, \text{rad}$	Nickwinkel
$\dot{\nu}$	$^{\circ}/\text{s}, \text{rad/s}$	Nickrate
$\ddot{\nu}$	$^{\circ}/\text{s}^2, \text{rad/s}^2$	Nickbeschleunigung
Θ_{A}	kgm^2	Rollträgheitsmoment
σ	diverse	Standardabweichung
τ	$^{\circ}, \text{rad}$	Lenkkopfwinkel
τ_{Gr}	s	Gruppenlaufzeit
τ_{P}	s	Phasenlaufzeit
$\mathcal{T}_{\text{S}}$	m	Kriterium zur Bewertung von Einzelschäden
$\bar{\mathcal{T}}_{\text{S}}$	m	Mittelwert des Kriteriums $\mathcal{T}_{\text{S}}$
$\mathcal{T}_{\text{U}}$	m	Kriterium zur Bewertung von Fahrbahnnunebenheiten
$\mathcal{T}_{\text{U}, \Delta s}$	m	Kriterium $\mathcal{T}_{\text{U}}$, gemittelt über Strecke Δs
Ω	1/m	Wegkreisfrequenz
Ω_0	1/m	Bezugswegkreisfrequenz
ω	1/s	Zeitkreisfrequenz
ω_{B}	1/s	Bandbreite
Ψ	—	Korrelationsfunktion
ψ	$^{\circ}, \text{rad}$	Gierwinkel
$\dot{\psi}$	$^{\circ}/\text{s}, \text{rad/s}$	Gierrate
$\ddot{\psi}$	$^{\circ}/\text{s}^2, \text{rad/s}^2$	Gierbeschleunigung

Indizes

Zeichen	Bezeichnung
1h	Muster 1 (halb)
1v	Muster 1 (voll)
2h	Muster 2 (halb)
2v	Muster 2 (voll)
ADMA	Sensoreinheit ADMA
E	Ortsfestes Koordinatensystem
glatt	geglättetes Signal
grenz	Grenzwert
h	hinten
IMU	Sensoreinheit LC-IMU
max	Maximalwert
Mess	Messung
min	Minimalwert
Muster	Muster
V	Fahrzeugfestes Koordinatensystem
v	vorne
W	Rad-Koordinatensystem
X	X-Achse
Y	Y-Achse
Z	Z-Achse

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
ABV	Automatischer Blockierverhinderer
ADMA	Automotive Dynamic Motion Analyzer
ASV	Advanced Safety Vehicle
CV-Modell	Constant Velocity Model
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
Fzg.	Fahrzeug
GIDAS	German In-Depth Accident Study
GPS	Global Positioning System
HMI	Human Machine Interface
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
kbW	kommunikationsbasiertes Warnsystem
LC-IMU	Low-Cost-Inertialmesseinheit
RSU	Road Side Unit
TTC	Time To Collision
TTH	Time To Hazard
UDB	Unfalldatenbank der Versicherer

Zusammenfassung

Unfallzahlen zeigen, dass Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit beim Motorradfahren erforderlich sind. Zusätzlichen Sicherheitsgewinn im Straßenverkehr verspricht die Vernetzung der Fahrzeuge zu einem kooperativen Verkehrssystem (Inter-Fahrzeug-Kommunikation). In Motorrädern schon heute teilweise vorhandene Fahrdynamiksensoren (z. B. Raddrehzahlsensoren oder Drehratensensoren zur Schräglagenbestimmung) liefern zahlreiche Informationen über aktuelle Fahrzustandsgrößen. Dies motiviert zur Kombination von Fahrdynamiksensoren mit Kommunikationstechnik in einem Fahrerassistenzsystem für Motorräder, welches sensorbasiert Gefahrstellen erkennt und über drahtlose Kommunikation Warnmeldungen an andere Verkehrsteilnehmer versendet.

Kommunikationsbasierte Fahrerassistenzsysteme für Motorräder beschränkten sich bisher vor allem auf Kreuzungsszenarios. Erste kommunikationsbasierte Systeme zur Warnung vor Gefahrstellen, wie Baustellen oder Einsatzfahrzeugen, wurden realisiert. Mit Ausnahme eines Systems, das die Längsbeschleunigung eines bremsenden Motorrades auswertet, ist bisher kein System im Motorrad bekannt, das basierend auf der Auswertung von Fahrdynamiksensorik Gefahrstellen erkennt, um Warnmeldungen zu generieren.

Daher werden in dieser Arbeit folgende Grundlagen zur Entwicklung eines kommunikationsbasierten Warnsystems für Motorräder untersucht:

- Identifizierung von relevanten Gefahrstellen, die zu Unfällen führen, die durch das genannte Fahrerassistenzsystem vermieden werden können.
- Analyse der Fahrdynamik von Motorrädern zur Ableitung von Kriterien, die auf der Auswertung der Daten von Sensoren im Motorrad basieren und relevanten Gefahrstellen bzw. kritischen Fahrsituationen eindeutig zuzuordnen sind.
- Untersuchungen zur Gestaltung und Bewertung von Warnmaßnahmen in einem kommunikationsbasierten Fahrerassistenzsystem für Motorräder.

Die Identifizierung von relevanten Gefahrstellen beruht auf der Auswertung einer Unfalldatenbank und einer Motorradfahrer-Befragung zu Gefahrstellen. Als potentiell vermeidbar und relevant erweisen sich demnach Unfälle aufgrund von nicht angepasster Kurvengeschwindigkeit, Reibwertsprüngen (z. B. durch Ölflecken, Rollsplitt), Fahrbahnschäden (z. B. Bodenwellen, Unebenheiten) und Hindernissen (z. B. liegengebliebene Fahrzeuge).

Ein neues aus der Definition des Allgemeinen Unebenheits-Index (AUN) abgeleitetes Kriterium zur Erkennung von Gefahrstellen aufgrund unebener Fahrbahn basiert auf der Leistungsdichte der vertikalen Radgeschwindigkeit. Zur Bestimmung des Kriteriums werden Fahrzeuglängsgeschwindigkeit und Radvertikalbeschleunigung gemessen und in einer Signalkette verarbeitet. Bei Versuchen auf Fahrbahnen unterschiedlicher Unebenheit bewährt sich das Kriterium zur Erkennung von unebenen Fahrbahnen ($AUN > 18 \text{ cm}^3$).

Die kumulierte Energiedichte der vertikalen Radgeschwindigkeit im Wellenlängenbereich von 0,5 m bis 2,5 m erweist sich als unabhängig von Art und Form eines einzelnen erhabenen Fahrbahnschadens. Ein neues daraus abgeleitetes Kriterium zeigt in Probandenversuchen einen eindeutigen Zusammenhang zu von Fahrern gewünschten Warngeschwindigkeiten. Demnach bewährt sich dieses Kriterium als Maß für die subjektiv empfundene Gefährlichkeit eines einzelnen erhabenen Fahrbahnschadens.

Die Analyse von Ausweichmanövern führt zur Definition eines „Standard-Ausweichmanövers“, das durch Musterverläufe von Rollrate und Rollwinkel beschrieben wird. Vergleiche der entsprechenden Messgrößen mit den Musterverläufen durch Bestimmung eines Korrelationsfaktors ermöglichen einen Rückschluss auf Ausweichmanöver. In Ausweichversuchen ermittelte Werte der Korrelationsfaktoren zeigen mit wenigen Ausnahmen eindeutige Unterschiede zu „fahrdynamisch ähnlichen“ Manövern (z. B. Überholmanöver). Damit kann dieses neue Kriterium zur Erkennung von Ausweichmanövern herangezogen werden.

Eine Zusammenfassung bereits bekannter Möglichkeiten zur Erkennung der anderen identifizierten Gefahrstellen ergänzt die Kriterien zur Gefahrstellenerkennung. Dies beinhaltet die Bestimmung des Reibwertes bei Geradeausfahrt sowie die Erkennung kritischer Kurvenfahrsituationen, z. B. aufgrund nicht angepasster Kurvengeschwindigkeit.

Neben einem Modul zur Erkennung von Gefahrstellen ist eines zur Warnung des Fahrers Bestandteil eines kommunikationsbasierten Warnsystems. Daher werden unter Berücksichtigung motorradspezifischer Anforderungen neue Methoden zur Gestaltung und Bewertung von Warnmaßnahmen im Motorrad abgeleitet und angewendet. Daraus resultiert eine zweistufige Warnstrategie, bestehend aus einer informierenden und einer alarmierenden Warnstufe.

Mit den Warnelementen Warnblitz, LED-Leiste, Display, haptischer Sitz, Warnton und Sprachwarnung werden für jede Warnstufe drei Gestaltungsvarianten realisiert. Zur Bewertung erfolgt eine Probandenstudie ($n = 36$). In dieser führen alle drei Varianten der ersten, informierenden Warnstufe zu signifikanten Geschwindigkeitsunterschieden im Vergleich zu ungewarnten Fahrten. Eine Variante, bestehend aus Display und haptischen Sitz, bewährt sich hinsichtlich aller gestellten Anforderungen. Dies gilt insbesondere für den Gefahrstellenerwartungsgrad und die Verzeihlichkeit im Falle einer Falschwarnung.

Bei der zweiten, alarmierenden Warnstufe führt nur eine der realisierten Varianten, bestehend aus Sprachwarnung und LED-Leiste, zu einem signifikanten Geschwindigkeitsunterschied zu ungewarnten Fahrern. Die Verzeihlichkeit hinsichtlich einer Falschwarnung ist bei allen Varianten niedriger als bei der ersten Warnstufe. Mit Ausnahme dieses Punktes bewährt sich die genannte Kombination hinsichtlich der Anforderungen.

In der vorliegenden Arbeit wird somit die gesamte Kette der Gefahrstellenerkennung und Fahrerwarnung untersucht. Daraus ergeben sich wichtige Grundlagen zur Entwicklung eines kommunikationsbasierten Warnsystems für Motorräder. Dies beinhaltet validierte Kriterien zur sensorbasierten Erkennung von Gefahrstellen sowie in Probandenversuchen bewährte Gestaltungsbeispiele für eine wirksame, akzeptierte und angemessene Warnung von Motorradfahrern.

1 Einführung

1.1 Unfallgeschehen in Deutschland

Dieser Abschnitt behandelt das Unfallgeschehen in Deutschland seit 1991 für Insassen von Pkw und Aufsassen von Motorrädern (Krafträder, Kraftroller und Leichtkrafträder). Alle Angaben basieren auf den Daten des Statistischen Bundesamtes¹ (DESTATIS), des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung² (DIW) und des Kraftfahrt-Bundesamtes³ (KBA). Die verwendeten Daten befinden sich in Tabellenform im Anhang A.1.

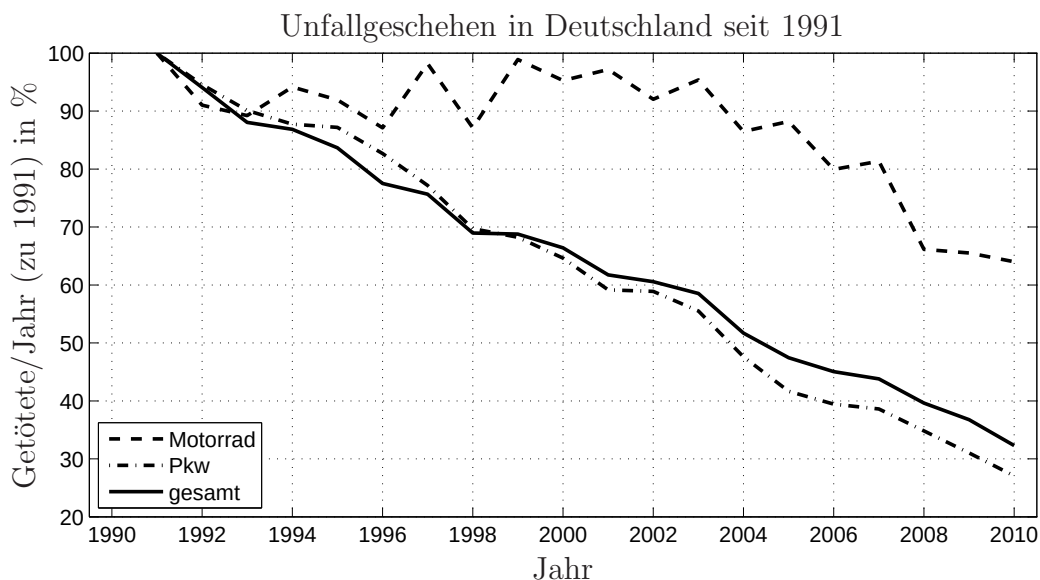


Abbildung 1.1: Anzahl tödlich verunglückter Verkehrsteilnehmer in Deutschland (bezogen auf das Jahr 1991)

Abbildung 1.1 zeigt den Verlauf aller tödlich verunglückten Verkehrsteilnehmer sowie zusätzlich den der Pkw-Insassen und Motorrad-Aufsassen in Deutschland seit 1991. Sowohl die Anzahl aller getöteten Verkehrsteilnehmer (1991: 11300, 2010: 3648, -67,7%) als auch der Pkw-Insassen (1991: 6801, 2010: 1840, -72,9%) ist um über zwei Drittel zurückgegangen. Der Rückgang im Motorradbereich ist mit 36,0% deutlich geringer (1991: 992, 2010: 635). Dieser Vergleich berücksichtigt allerdings nicht die Unterschiede in der Bestandsentwicklung von Pkw (1991: 32,1 Mio., 2010: 41,4 Mio., +29,0%) und Motorrädern (1991: 1,48 Mio., 2010: 3,65 Mio., +146%).

Abbildung 1.2 (links) zeigt daher das bestandsbezogene Risiko, d. h. die Anzahl der Getöteten im Jahr pro 10.000 amtlich zugelassener Fahrzeuge. Dieses ist mit einem

¹Statistisches Bundesamt (2011): Zeitreihen 2010, S. 4 ff.

²Kunert et al. (2011): Kraftfahrzeugverkehr 2010, S. 16

³KBA (2010): Fahrzeugzulassungen, S. 10 und S. 18

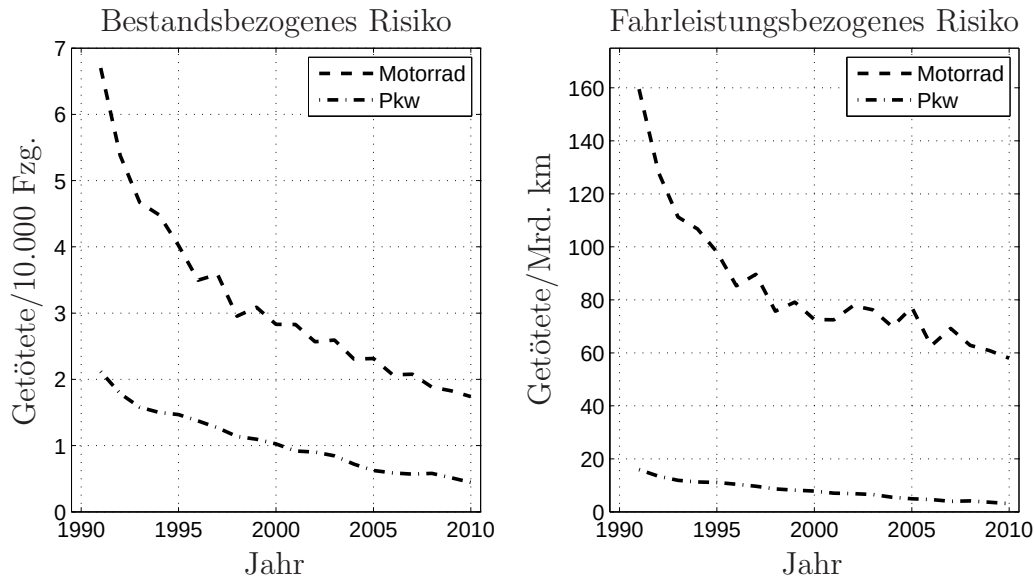


Abbildung 1.2: Bestandsbezogenes Risiko: Getötete pro 10.000 zugelassener Fahrzeuge, fahrleistungsbezogenes Risiko: Getötete pro 1 Mrd. gefahrener Kilometer

Rückgang um 74,0% für Motorräder ähnlich stark gesunken wie für Pkw mit einem Rückgang um 79,2%. Trotz dieses vergleichbaren Rückgangs war 2010 das Risiko, beim Motorradfahren tödlich zu verunglücken, pro zugelassenem Fahrzeug (Fzg.) fast viermal höher (1,74 Getötete/10.000 Fzg. im Vergleich zu 0,44 Getöteten/10.000 Fzg.). Das höhere Risiko wird auch durch eine Betrachtung des fahrleistungsbezogenen Risikos, d. h. der Anzahl der Getöteten pro 1 Mrd. Fahrkilometer, deutlich. Die dazugehörigen Verläufe sind in Abbildung 1.2 (rechts) dargestellt. Rein statistisch betrachtet war demnach 2010 das Risiko, mit einem Motorrad zu verunglücken, über 18mal höher als beim Pkw-Fahren (58,0 Getötete/Mrd. km im Vergleich zu 3,1 Getöteten/Mrd. km).

1.2 Motivation

Die oben beschriebenen Vergleiche vernachlässigen zwar einige Faktoren zur Bestimmung des tatsächlichen Risikos beim Motorradfahren, z. B. den Einfluss des Faktors Mensch (Fahrverhalten, Risikoneigung), zeigen dennoch, dass Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit beim Motorradfahren erforderlich sind. Aufgrund der im Vergleich zu einem Pkw kaum vorhandenen Schutzzonen sind bei Motorrädern weniger Möglichkeiten der passiven Sicherheit, d. h. der Maßnahmen im Fahrzeug zur Milderung der Unfallfolgen, vorhanden. Der Nutzen der aktiven Sicherheit, d. h. der Maßnahmen zur Unfallvermeidung, ist daher für den Motorradfahrer von wesentlich höherer Bedeutung als für den Pkw-Fahrer⁴.

Einen hohen zusätzlichen Sicherheitsgewinn im Straßenverkehr verspricht die künftige Vernetzung der Fahrzeuge zu einem kooperativen Verkehrssystem mit Hilfe der drahtlosen

⁴Spörner (2006): Einflussgrößen durch Straßenführung und Umfeld, S. 50

Fahrzeugkommunikation^{5,6,7,8,9}. Weiterhin nahm in den letzten Jahren die Anzahl der Fahrerassistenzsysteme¹⁰ und damit die Anzahl der Sensoren, die in Kraftfahrzeugen z. B. fahrdynamische Zustände messen, stark zu. Diese Sensoren liefern eine Vielzahl von Informationen und bieten die Möglichkeit, weitere als die bisher realisierten Anwendungen umzusetzen. Die Kombination der Nutzung von Fahrdynamiksensoren und Fahrzeugkommunikation motiviert¹¹ zur Entwicklung eines kooperativen Warnsystems mit sensorbasierter Gefahrstellenerkennung unter Nutzung bereits vorhandener Sensorik.

Ein Austausch von Informationen ist nur möglich, wenn ein Kommunikationspartner zur Verfügung steht. Für die meisten Anwendungen von Fahrzeugkommunikation ist daher eine hohe Ausstattungsrate erforderlich. Matheus et al. gehen von einer Ausstattungsrate von mindestens 10% aller Verkehrsteilnehmer für erste Anwendungen aus¹². Dies erfordert zur Schaffung eines Nutzens für Erstanwender entsprechende Einführungsstrategien.

Eine Möglichkeit bietet das Fahrverhalten von Motorradfahrern. Da Motorradfahrer oft in Gruppen unterwegs sind, ermöglicht dies einen Nutzen von Anwendungen der Fahrzeugkommunikation in einer Einführungsphase. Sind alle Motorradfahrer einer Gruppe entsprechend ausgestattet, so stehen Kommunikationspartner in Reichweite zur Verfügung. Dies motiviert zur Entwicklung eines kooperativen Warnsystems mit sensorbasierter Gefahrstellenerkennung speziell für Motorräder. Daraus leiten sich die im nachfolgenden Abschnitt definierten Ziele der Arbeit ab.

1.3 Ziele der Arbeit

Ziele der Arbeit sind die Erarbeitung und die Evaluierung der funktionalen¹³ Grundlagen eines kommunikationsbasierten Warnsystems (kbW) für Motorräder, das sensorbasiert Gefahrstellen erkennt und über drahtlose Kommunikation Warnmeldungen an andere Verkehrsteilnehmer versendet, um diese rechtzeitig vor einer Gefahr zu warnen.



Abbildung 1.3: Funktionsweise eines kbWs

⁵Geissler et al. (2011): Assessment of the SAFESPOT cooperative systems, S. 371 f.

⁶Mühlbacher et al. (2011): Wirkung von C2X-basierten Fahrerassistenzsystemen, S. 71 f.

⁷Najm et al. (2011): Framework for Vehicle-to-Vehicle Communications, S. 2

⁸Sagisaka (2011): Toward Safety Technology Using ITS

⁹Weiß (2009): Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland, S. 5

¹⁰u. a. Winner et al. (2009): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, S. V

¹¹zunächst noch ohne Einschränkung auf eine Fahrzeugklasse

¹²Matheus et al. (2004): Economic Background of C2CC, S. 277

¹³Die Arbeit behandelt die Funktionsentwicklung. Die Themenbereiche Datenübertragung und Kommunikationstechnik werden nicht untersucht.

Abbildung 1.3 stellt die Funktionsweise eines solchen Systems dar. Der Blitz symbolisiert eine Gefahrstelle. Diese wird basierend auf der Auswertung von Sensordaten erkannt. Danach wird eine Warnnachricht generiert und diese entweder direkt oder über eine Road Side Unit (RSU) mit Gefahrstellenkarte an andere Motorradfahrer und weitere Verkehrsteilnehmer gesendet.

1.4 Methodik und Aufbau der Arbeit

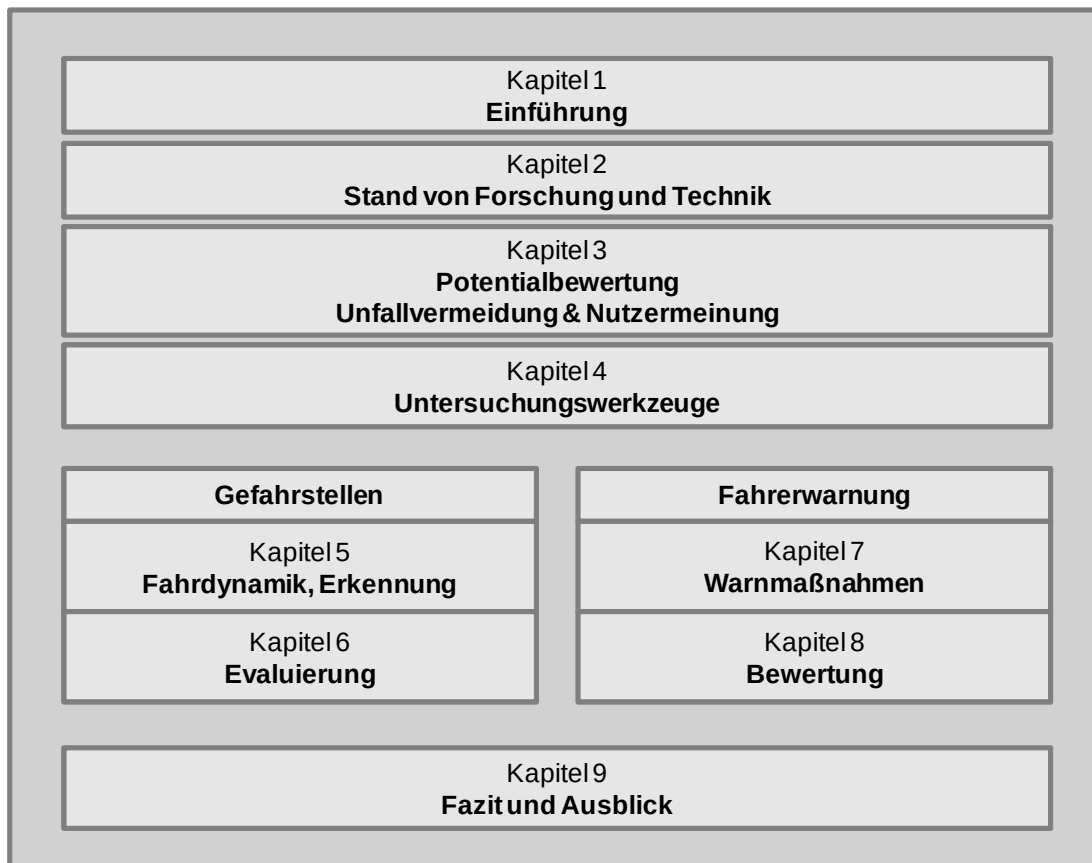


Abbildung 1.4: Methodik des Vorgehens und dazugehörige Kapitel für die vorliegende Arbeit

Abbildung 1.4 zeigt die zugrundeliegende Methodik zur Erreichung der im vorherigen Abschnitt definierten Ziele. **Kapitel 1** führt in die Thematik der Arbeit ein. Die Ergebnisse einer Recherche zu Stand von Forschung und Technik von kbWs für Motorräder sind in **Kapitel 2** zusammengefasst. Die daraus abgeleiteten Fragestellungen in den Bereichen Gefahrstellenerkennung und Fahrerwarnung sind Ausgangspunkte für die weiteren Untersuchungen.

Die in **Kapitel 3** beschriebenen Untersuchungen analysieren das Potential eines kbWs. Dies beinhaltet eine Unfalldatenbankanalyse sowie eine Nutzerbefragung („Motorradfahrer-Umfrage“). Ziel dieser Untersuchungen ist die Identifikation von relevanten Gefahrstellen. Dies sind von Motorradfahrern als gefährlich bewertete Gefahrstellen, die zu einer statistisch nicht vernachlässigbaren Anzahl von durch ein kbW vermeidbaren

Unfällen führen. **Kapitel 4** beschreibt Untersuchungswerkzeuge, wie das Versuchsmotorrad, die Messsensorik und die verwendete Rollwinkelschätzung.

Kapitel 5 beschreibt die Analyse der Fahrdynamik in Fahrsituationen, die aufgrund der identifizierten Gefahrstellen entstehen. Dies führt zu einer Ableitung von neuen Kriterien, die basierend auf der Auswertung von Sensordaten einen Rückschluss auf diese Gefahrstellen ermöglichen. Für Gefahrstellen, für die bereits entsprechende Kriterien bekannt sind, wird eine zusammenfassende Beschreibung gegeben. **Kapitel 6** umfasst Beschreibungen und Auswertungen von Fahrversuchen zur Validierung der abgeleiteten Kriterien.

Kapitel 7 behandelt die Thematik der Fahrerwarnung. Ergebnisse der dazu durchgeführten Untersuchungen sind u. a. Gestaltungsbeispiele für Warnmaßnahmen und die Ableitung einer Strategie zur Warnung des Fahrers. **Kapitel 8** beschreibt eine Methode zur Bewertung von Warnmaßnahmen im Motorrad. Diese Methode wird auf die realisierten Gestaltungsbeispiele angewendet. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden dargestellt.

Kapitel 9 gibt ein Fazit zu den erreichten Ergebnissen. Daraus resultiert ein Ausblick zur Anwendung der Ergebnisse und zu weiterem Forschungsbedarf.

2 Stand von Forschung und Technik

Abschnitt 2.1 gibt einen Überblick über derzeitige Anwendungen von Fahrzeugkommunikation in Motorrädern. Viele Anwendungen werden zunächst in anderen Fahrzeugklassen realisiert. Abschnitt 2.2 behandelt daher kommunikationsbasierte Warnsysteme ohne eine Beschränkung auf eine bestimmte Fahrzeugklasse. Dabei wird auch auf die Erkennung von Gefahrstellen in solchen Systemen eingegangen. Neben Möglichkeiten zur Erkennung von Gefahrstellen sind Maßnahmen zur Fahrerwarnung Bestandteil eines kbWs. In Abschnitt 2.3 werden daher motorradspezifische Möglichkeiten zur Warnausgabe über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, auch als *Human Machine Interface* (HMI) bezeichnet, zusammengefasst.

2.1 Kommunikationstechnik für Motorräder

2.1.1 Honda Advanced Safety Vehicle

Innerhalb des Projektes „Advanced Safety Vehicle 2“ (**ASV-2**) erforschte Honda unter anderem Möglichkeiten, das Risiko der Kreuzungsunfälle von Pkw mit Motorrädern zu verringern. Daraus resultierte die Entwicklung und prototypische Realisierung eines Kommunikationssystems¹. Das sowohl im Pkw als auch im Motorrad installierte System ermöglicht den Austausch von Daten (wie Fahrzeugtyp, Position, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung) zwischen Fahrzeugen. Basierend auf diesen Daten erfolgt bei einem drohenden Zusammenstoß an einer Kreuzung eine Warnung. Neben einem Algorithmus zur Abschätzung des Kollisionsrisikos ist ein weiterer zur Positionsbestimmung, basierend auf GPS-Daten sowie Längsgeschwindigkeits- und Gierwinkelmessdaten, implementiert. Gestützt wird die Positionsbestimmung durch ein Modem, das die Bestimmung des relativen Abstandes ermöglicht. Basierend auf den Ergebnissen von ASV-2 erfolgte in den Projekten **ASV-3**- und **ASV-4** eine Weiterentwicklung zu einem System zur Vermeidung von weiteren Kollisionen². Dieses kbW warnt Motorradfahrer nicht nur vor drohenden Kreuzungsunfällen, sondern auch vor Hindernissen auf der Fahrbahn, wenn diese mit einem Warnsender ausgestattet sind.

2.1.2 BMW Connected Ride

Das im Forschungsstadium befindliche Programm **Connected Ride** von BMW Motorrad beinhaltet insgesamt sechs kommunikationsbasierte Funktionen für Motorräder. Diese sind ein Querverkehrsassistent, ein als „Ampelassistent“ bezeichneter Lichtzeichenassistent, eine Schlechtwetterwarnung, eine Hinderniswarnung, eine Einsatzfahrzeugwarnung und das „Elektronische Bremslicht“.

¹Takahashi et al. (2004): ASV-2 Safety Vehicle, S. 95 f.

²Fuchs (2009): V2V-Kommunikation für Motorräder, S. 19 f.

Der Querverkehrsassistent warnt Pkw-Fahrer, die mit einem ähnlichen System ausgestattet sind, vor einer drohenden Kollision an Kreuzungen³. Das System ermittelt Vorfahrtssituation und Kollisionswahrscheinlichkeit. Zur Beurteilung der Vorfahrtssituation wird auf eine digitale Karte zurückgegriffen. Die Bestimmung der Kollisionswahrscheinlichkeit erfolgt anhand einer Trajektorien-Prädiktion für die sich einer Kreuzung nähernden Fahrzeuge (Pkw und Motorrad). Die dafür erforderliche Positionsbestimmung basiert auf fusionierten Daten von GPS und Fahrdynamiksensoren. Die Warnung des Pkw-Fahrers erfolgt in mehreren Stufen, während der Motorradfahrer nicht gewarnt wird.

Beim „Ampelassistenten“ kommuniziert die Lichtzeichenanlage mit dem Fahrzeug⁴. Bei diesem System wird dem Fahrzeug der Status der Lichtzeichenanlage übermittelt. Basierend auf dieser Information und der Trajektorienberechnung des Fahrzeuges wird dem Fahrer eine Geschwindigkeitsempfehlung gegeben, um die Kreuzung während einer Grünphase zu erreichen. Bei drohender Rotlichtmissachtung erfolgt außerdem eine Warnung.

Bei der Schlechtwetterwarnung wird der Motorradfahrer auf Streckenabschnitte mit Wetterbedingungen wie Nebel, Regen, Schnee oder Glatteis hingewiesen⁵. Als Auslöser solcher Warnungen werden beispielsweise die Daten von Regen- oder Temperatursensoren und die Status von Nebelscheinwerfer oder Scheibenwischer vorausfahrender Fahrzeuge genannt. Die Hinderniswarnung signalisiert dem Motorradfahrer eine Gefahr auf der Fahrbahn, z. B. ein verunfalltes Fahrzeug. Nicht näher definierter Auslöser für die Warnung sind die betroffenen Fahrzeuge. Bei der Einsatzfahrzeugwarnung handelt es sich um einen Hinweis, dass sich von hinten ein Einsatzfahrzeug nähert. Die Warnung geht vom Einsatzfahrzeug aus (z. B. durch automatisches Versenden einer Warnnachricht bei eingeschaltetem Blaulicht). Das „Elektronische Bremslicht“ übermittelt Informationen über Verzögerungen bei Bremsmanövern. Um bei Kolonnenfahrt Auffahrunfälle zu vermeiden, werden bei starker Verzögerung nachfolgende Fahrzeuge gewarnt.

2.1.3 Sonstige

In dem Projekt **SmartWeb** wurden Grundlagen des semantischen Webs, einer Erweiterung des heutigen Internets, und darauf basierende mobile Anwendungen erforscht⁶. U. a. wurden Anwendungsmöglichkeiten in Motorrädern untersucht. Schwerpunkt lag dabei auf der Nutzung und Datenverarbeitung eines Netzwerkes, das Informationen von anderen Fahrzeugen, z. B. „Gefahr durch Aquaplaning“, enthält. Nicht untersucht wurde, wie diese Informationen gewonnen werden.

Ziel des Projektes **WATCH-OVER** war die Reduzierung der Unfallzahlen von besonders gefährdeten Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern, Fahrradfahrern und Motorradfahrern⁷. Unter anderem wurde ein kommunikationsbasiertes Fahrerassistenzsystem zur Warnung des Pkw-Fahrers vor den genannten Verkehrsteilnehmern entwickelt. Das System basiert auf einer relativen Positionsbestimmung mithilfe von Kommunikationsmodulen (in Pkw und Motorrad) und auf der Auswertung der Daten einer Videokamera (im Pkw). Ausgelegt wurde das System für Situationen im Stadtverkehr, z. B. Gefahrensituationen an Kreuzungen.

³Pfeifer et al. (2008): Fahrzeugkommunikation im Motorrad

⁴Fuerstenberg et al. (2007): INTERSAFE-Abschlussbericht

⁵BMW (2009): BMW Motorrad ConnectedRide

⁶Reithinger et al. (2007): SmartWeb

⁷Meinken et al. (2007): WATCH-OVER

2.2 Kommunikationsbasierte Warnsysteme

Nachfolgend wird eine Übersicht über kommunikationsbasierte Warnsysteme gegeben, bei denen eine Warnmeldung durch Fahrzeugsensorik oder einen Verkehrsteilnehmer erzeugt wird. Auf Umgebungssensorik basierende Systeme werden nicht berücksichtigt, da bisher keine Anwendungen von Umgebungssensorik, wie Radarsensoren oder Kameras, in Serien-Motorrädern bekannt sind. Die in Abschnitt 1.2 genannte Motivation, also die Nutzung bereits vorhandener Sensoren, ist bei diesen Systemen nicht gegeben.

Ein Ergebnis des von 1987 bis 1994 durchgeführten Forschungsprojektes **PROMETHEUS** (PROgramMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety) ist die erste Studie über das Potential von Fahrzeugkommunikation⁸. Aufgrund der hohen Kosten und der damals geringen Reichweite der Kommunikationstechnik wurde im Rahmen dieses Projektes kein entsprechendes System umgesetzt.

Die erste (prototypische) Realisierung eines kbWs erfolgte im Projekt **IVHW** (Inter-Vehicle Hazard Warning)⁹. Umgesetzt wurde ein System, das vor Gefahrstellen wie Unfällen, auf der Fahrbahn stehenden Fahrzeugen, Baustellen oder Stau warnt. Die Warnungen wurden sowohl von Fahrzeugen als auch von Infrastrukturelementen versendet. Die Generierung von fahrzeugbasierten Warnmeldungen erfolgt durch Eingaben des Fahrers. Infrastrukturbasierte Warnmeldungen werden durch einen Operator in einer Verkehrsleitzentrale ausgelöst und danach über RSUs verteilt. Für diese Warnmeldungen ist daher erforderlich, dass die Gefahrstellen einer Leitstelle bekannt sind.

Ziel des Projektes **CarTALK 2000** war die Entwicklung von kooperativen Fahrerassistenzsystemen sowie eines selbstorganisierenden Ad-Hoc-Netzwerkes¹⁰. Geplant waren Funktionen zur Warnung vor Verkehrsbehinderungen, glatten Fahrbahnoberflächen und verunfallten oder liegengebliebenen Fahrzeugen. Als Sensoren für ein solches System werden zum einen der Fahrer und zum anderen Umgebungssensorik genannt. Veröffentlichungen zu Test und Validierung der beschriebenen Funktionen sind nicht bekannt.

Aus den Entwicklungsarbeiten des **FleetNet**-Projektes resultiert eine Plattform für Fahrzeugkommunikation zur Realisierung von kommunikationsbasierten Fahrerassistenzsystemen, dezentralen Floating-Car-Data-Applikationen sowie Kommunikations- und Informationsdiensten¹¹. Die entwickelte Plattform wurde in Prototypen getestet. Diese ermöglichten eine Warnung vor den Gefahrstellen, die bereits bei der Beschreibung von CarTALK 2000 genannt wurden. Alle Gefahrenmeldungen wurden manuell durch einen Fahrer ausgelöst.

Ziel von **WILLWARN**, einem Teilprojekt von PReVENT, war, u. a. eine Gefahrstellenerkennung basierend auf bereits in modernen Fahrzeugen vorhandenen Sensoren zu realisieren¹². Verwendet wurden Sensoren zum Messen von Raddrehzahl, Außentemperatur, Gierrate, Lichtintensität sowie von Längs- und Querschleunigung. Zusätzlich ausgewertet wurden die Schalterstellung von Licht und Scheibenwischern.

Basierend auf den Daten der genannten Sensoren wurden die nachfolgend beschriebenen

⁸Walker (1992): PROMETHEUS

⁹Becker (2003): IVHW System Concept

¹⁰Reichardt et al. (2002): CarTALK 2000

¹¹Enkelmann (2003): FleetNet

¹²Schulze et al. (2008): PReVENT Final Report, S. 32, S. 63 ff.

Möglichkeiten zur Erkennung von Gefahrstellen realisiert^{13,14} und über drahtlose Kommunikation entsprechende Warnmeldungen versendet. Niedrige Reibwerte werden durch die Auswertung von Längsverzögerung und Aktivität eines Automatischen Blockierverhinders (ABV) erkannt. Ist die Längsverzögerung bei ABV-Aktivität kleiner als 6 m/s^2 , wird eine Warnmeldung vor Niedrigreibwert versendet.

Zur Notbremsmanövererkennung wird der Verlauf der Längsverzögerung beim Bremsen ausgewertet. Überschreitet diese einen bestimmten Wert, so wird daraus eine starke Bremsung abgeleitet. Hindernisse werden durch die charakteristischen¹⁵ Verläufe von Gierrate und Querschleunigung erkannt. Die Erkennung wird z. B. durch starkes Bremsen initialisiert.

Zur Erkennung geringer Sichtweite und deren Ursache werden die Fahrgeschwindigkeit, die Scheibenwischeraktivität, die Außentemperatur, der Lichtsensor sowie eine Überprüfung der Schalterstellungen von Nebelscheinwerfern, Nebelschlussleuchte und Fernlicht verwendet und in einem nicht näher definierten Algorithmus ausgewertet. Zur Stauerkennung wird der Verlauf der Fahrgeschwindigkeit analysiert. Ist die Durchschnittsgeschwindigkeit gering und treten häufig Änderungen auf, so wird daraus abgeleitet, dass sich das Fahrzeug gerade im Stau befindet.

Im Projekt **SAFESPOT** wurden ähnliche Anwendungen wie bei bereits genannten Projekten untersucht¹⁶. Dies beinhaltet u. a. eine Kreuzungsassistent. Weitere Funktionen sind solche zur Vermeidung von Kollisionen außerhalb von Kreuzungen. Diese umfassen Frontalkollisionen, Auffahrunfälle und Kollisionen beim Überholen. Der Schwerpunkt lag bei den Untersuchungen auf Situationen, bei denen eine Erfassung mit Umfeldsensorik nicht möglich ist (z. B. langsamfahrendes Fahrzeug hinter einer Kurve). Die Gefahrstellenerkennung basiert auf der Auswertung der relativen Position beteiligter Fahrzeuge.

Neben nicht kommunikationsbasierten Anwendungen sind eine kooperative Lichtzeichenanlage und ein kommunikationsbasierter Kreuzungsassistent Bestandteil des Projektes **aktiv**¹⁷. Die Funktionen ähneln denen bereits beschriebener Systeme.

Untersuchungen zum automatisierten Fahren sind Gegenstand des Projektes **HAVEit**. U. a. wurden zwei kommunikationsbasierte Funktionen prototypisch realisiert. Ein Automatisierter Stauassistent sammelt über drahtlose Kommunikation Daten wie Geschwindigkeit und Beschleunigung von anderen Fahrzeugen¹⁸. Diese werden mit anderen Sensordaten, z. B. von einer Kamera, fusioniert. Darauf basierend wird die aktuelle Verkehrssituation ermittelt und der Fahrer unterstützt, z. B. durch adaptive Geschwindigkeitsregelung oder -warnung. Im Lichtzeichenassistenten sind Funktionen wie bei bereits beschriebenen Systemen realisiert¹⁹.

Stählin et al. beschreiben ein kommunikationsbasiertes Warnsystem von **Continental**, das basierend auf Straßenzustandsinformationen Warnmeldungen generiert²⁰. Zwei Möglichkeiten werden genannt. Bei der infrastrukturbasierten Straßenzustandsermittlung

¹³Boes et al. (2007): Verkehrswarnsystem, S. 2 ff.

¹⁴Wieker et al. (2008): Projekt WILLWARN, S. 14 f.

¹⁵Die charakteristischen Verläufe wurden in Fahrversuchen ermittelt.

¹⁶Brignolo et al. (2008): SAFESPOT Project - Use cases

¹⁷Aktiv (2010): Ergebnishandbuch S. 21 ff., S. 105 ff.

¹⁸Jakobsson et al. (2010): Automatisierte Stauassistent

¹⁹Sanfridson et al. (2011): Active Green Driving

²⁰Stählin et al. (2011): Straßenzustandsinformationen für Vehicle2X, S. 37 ff.

bestimmen festinstallierte Detektoren²¹ den Straßenzustand und übermitteln diesen über eine RSU. Bei der fahrzeugbasierten Straßenzustandsermittlung wird das Fahrzeug als Detektor verwendet. Dabei nennen die Autoren ohne nähere Beschreibung zum einen die Aktivität von Fahrdynamikregelsystemen und zum anderen die Intensität der Scheibenwischer, die Aktivität der Scheinwerfer sowie die Fahrgeschwindigkeit als Anhaltspunkte zur Ermittlung des Straßenzustandes. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung der gemessenen vertikalen Radbeschleunigung. Zeigt diese die Charakteristika einer Schlaglochdurchfahrt, kann eine Warnung gesendet werden. Weitere Details zur Bestimmung des Straßenzustandes werden nicht aufgeführt.

Ergänzende Funktionen ermöglichen eine Warnung vor Gefahrstellen, wie ausgelaufenem Kraftstoff, einem geplatzten Reifen oder einem Unfall²². Dazu werden Sensoren zum Messen des Kraftstoffstandes und des Reifendruckes sowie der Schaltzustandes des Warnblinkers ausgewertet.

Patentschriften beschreiben bisher nicht genannte Funktionen von kbWs zur Erkennung von Unfällen. Bei Nathan et al. erfolgt die Unfallerkennung durch Aktivierung eines nicht näher spezifizierten Fahrzeugunfallsensors²³. Schüssler nennt die Betätigung eines Schalters durch den Fahrer oder die automatische Auswertung einer internen Sensoreinheit als Auslöser für eine Warnmeldung²⁴.

In Feldversuchen werden viele der bisher genannten Systeme getestet. In Deutschland wird das Projekt **simTD**²⁵ (Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland), in Frankreich das Projekt **SCORE@F**²⁶ (Système COopératif Routier Expérimental Français) und auf europäischer Ebene das Projekt **DRIVE-C2X**²⁷ durchgeführt. Beispiele für kommunikationsbasierte Warnfunktionen im Projekt simTD sind eine Hinderniswarnung, eine Stauendwarnung, eine Straßenwetterwarnung, eine Einsatzfahrzeugwarnung, ein Lichtzeichenassistent, das „Elektronische Bremslicht“ und ein Kreuzungs-/Querverkehrsassistent^{28,29}. Ähnliche Funktionen werden auch in den beiden anderen Projekten getestet.

Das **CAR 2 CAR Communication Consortium**³⁰ ist ein Zusammenschluss von Fahrzeugherstellern, Zulieferern und Forschungseinrichtungen. Ziele sind u. a. die Erarbeitung eines offenen europäischen Industriestandards für Inter-Fahrzeugkommunikationssysteme und die Entwicklung eines offenen Systems für Anwendungen der aktiven Sicherheit. Als mögliche kommunikationsbasierte Warnfunktionen werden Warnungen vor einem Fahrbahnabschnitt mit Niedrigreibwert, einem Motorrad, einem Fahrzeug mit eingeschaltetem Warnblinklicht, einem Einsatzfahrzeug und einer Baustelle genannt. Bei erstgenannter Funktion basiert die Niedrigreibwiterkennung auf den Daten des Fahrdynamikregelmoduls. Vor einem Motorrad wird gewarnt, wenn der Fahrer eines anderen Fahrzeuges Abstand und Geschwindigkeit des Motorrades „falsch“ einschätzt. Weitere Details zur Gefahrstellenerkennung werden nicht genannt.

²¹ ohne genauere Angabe durch die Autoren

²² Swoboda et al. (2008): Warnung vor Gefahrensituationen, S. 4

²³ Nathan et al. (2007): System zum Warnen vor Gefahren S. 6

²⁴ Schüssler (2001): Funkbasierte Gefahrenwarnung S. 6

²⁵ www.simtd.org

²⁶ <http://blog.inria.fr/scoref>

²⁷ www.drive-c2x.eu

²⁸ siehe auch Abschnitt 2.1.2

²⁹ Naab (2009): simTD - Beschreibung der C2X-Funktionen, S. 50 ff.

³⁰ www.car-to-car.org

2.3 Warn- und Informationselemente

Nachfolgend wird ein Überblick über HMI-Elemente gegeben, die eine Ausgabe von Warnungen und Informationen im Motorrad ermöglichen. Berücksichtigt werden nur (Ausgabe-) Elemente, die serienmäßig verfügbar sind oder in Forschungsprojekten bereits realisiert wurden. Für Eingabeelemente wird auf entsprechende Literatur verwiesen. Schell behandelt beispielsweise Bedienelemente im Motorrad³¹.

In Serienmotorrädern gibt es im Vergleich zu Pkws relativ wenige Warn- und Informationselemente. Neben Kontrolleuchten (z. B. für Blinker, Tankfüllstand) verfügen neuere Motorräder teilweise über Displays zur Anzeige von Informationen des Bordcomputers oder eines Navigationssystems. Einige Supersport-Motorräder sind mit einem Schaltblitz ausgestattet, der Schalthinweise gibt. Vor allem in verschiedenen Forschungsprojekten wurden speziell an die Bedürfnisse von Motorradfahrern angepasste Warn- und Informationselemente entworfen. Diese werden nachfolgend zusammenfassend dargestellt.

Das Motorrad-HMI des in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Kommunikationssystems des ASV-2-Projektes besteht aus Lautsprechern im Helm und einem *Head Up Indicator*, der Informationen auf die Windschutzscheibe des Motorrades projiziert³². Im Nachfolgeprojekt ASV-3 wurde das HMI um ein Display im Cockpit erweitert³³. Eine Überarbeitung des Motorrad-HMIs erfolgte im ASV-4-Projekt³⁴. Dieses besteht aus einer visuellen und einer akustischen Komponente. Letztere besteht aus Lautsprechern und befindet sich im Helm. Eine Verbindung zum Motorrad wird drahtlos über Bluetooth ermöglicht. Die visuelle Komponente (blaue Leuchtdioden) ist am oberen Cockpitrand angebracht, um eine möglichst geringe Entfernung zur Sichtline zu erreichen. Eine Warnung erfolgt über ein Aufleuchten der visuellen Komponente sowie ein akustisches Warnsignal. Zusätzlich gibt die visuelle Komponente die Richtung der Gefahrstelle an.

Die Ausgabeelemente des HMIs, die im Rahmen des in Abschnitt 2.1.3 bereits erwähnten Projektes SmartWeb implementiert wurden, sind ein Display im Cockpit und eine Sprachausgabe. Trias Bonet et al. erwähnen als Warnmöglichkeit für Motorradfahrer ein vibrierendes Element³⁵. Nach genannter Quelle ist erforderlich, dieses in der Nähe des Fahrers zu platzieren. Als Beispiel wird der Fahrersitz genannt.

Ein wesentliches Ziel des Projektes „Safety in Motion“ (SIM) war die Vereinigung der Informationsflüsse von Motorrad, Mobiltelefon und Navigationssystem³⁶. Das HMI wurde so gestaltet, dass eine gemeinsame Informationsausgabe und Nutzung der genannten Geräte möglich ist. Die Ausgabe von Informationen erfolgt über ein Display am oberen Rand des Cockpits, über Lautsprecher zur Ausgabe von Sprachhinweisen und über ein Head-Up-Display im Helm.

Von Koelen et al. beschreiben ein HMI für einen Fahrstreifenwechselassistenten für Motorräder³⁷. Dieses besteht aus einer informierenden und einer warnenden Stufe. Die erste Stufe gibt an, dass ein potentiell gefährliches Objekt erkannt wurde. Ein orange hinterlegtes

³¹Schell (2002): MMS-Untersuchungen Motorrad

³²Takahashi et al. (2004): ASV-2 Safety Vehicle, S. 97

³³Honda (2005): ASV-3 Advanced Safety Vehicles

³⁴Honda (2008): ASV 4 Motorcycle

³⁵Trias Bonet et al. (2009): Kommunikationssystem für Motorradfahrer, S. 2

³⁶Pieve (2010): Safety in Motion (SIM), S. 179

³⁷Koelen et al. (2011): Radarbasierter Spurwechselassistent für Motorräder, S. 38 ff.

Icon im Navigationsdisplay und eine orangeleuchtende LED im Spiegel weisen den Fahrer darauf hin. Die zweite Stufe ist aktiv, wenn der Fahrer zusätzlich den Fahrtrichtungsanzeiger betätigt. In diesem Fall ist das Icon blinkend rot hinterlegt und im Spiegel blinkt eine rotleuchtende LED. Zusätzlich wird der Fahrer über einen Signalton („Hybricon“) gewarnt.

Neben den von Koelen et al. (siehe oben) beschriebenen Warnelementen wurden im Projekt SAFERIDER zwei haptische Warnelemente entwickelt³⁸. Ein *Force-Feedback*-Gasgriff ermöglicht eine anpassbare Gegenkraft beim Betätigen des Gasgriffes, z. B. in Abhängigkeit vom Abstand eines vorausfahrenden Fahrzeuges. Ein haptischer Handschuh gibt über vier Vibrationsmotoren Rückmeldung an den Fahrer. Die Motoren befinden sich in Höhe des Handgelenks an einem handelsüblichen Motorradhandschuh. Die Warnelemente werden für eine Geschwindigkeits- und eine Kurvenwarnung eingesetzt. Versuche zeigten, dass die Wahrnehmbarkeit der realisierten Warnelemente nicht den Anforderungen entsprach³⁹.

2.4 Fazit zum Stand von Technik und Forschung

2.4.1 Kommunikationsbasierte Warnsysteme (für Motorräder)

Erste kommunikationsbasierte Fahrerassistenzsysteme unter Berücksichtigung von Motorrädern zeigen, dass eine Verwendung von Kommunikationstechnik in dieser Fahrzeugklasse möglich ist. Anwendungen zur Erhöhung der Sicherheit beim Motorradfahren konzentrierten sich bisher auf die Vermeidung von Kreuzungsunfällen. Weitere realisierte Systeme sind solche zur Warnung vor Rotlichtmissachtung, „schlechtem“ Wetter, Hindernissen und Einsatzfahrzeugen. Alle diese Anwendungen sind auch im Pkw-Bereich zu finden.

Hinsichtlich der Erkennung von Warn- bzw. Gefahrensituationen lassen sich kbWs in folgende Gruppen unterteilen⁴⁰:

- Auswertung der **Relativposition**: Bei diesen Systemen wird die aktuelle Position (von Fahrzeugen) bestimmt und die zukünftige prädiziert. Ausschließlich basierend auf dem Vergleich der Positionen zweier Fahrzeuge wird ermittelt, ob eine kritische Fahrsituation droht. Beispiele sind Systeme, die vor Kollisionen an Kreuzungen oder beim Abbiegen warnen.
- Auswertung von **Relativposition und statischer Zusatzinformation**: Neben der Relativposition werten diese Systeme eine (gleichbleibende) Zusatzinformation aus. Mögliche Zusatzinformationen beinhalten z. B. die Vorfahrtsregelung oder die Art der Gefahrensituation. Beispiele sind erweiterte Kreuzungsassistenten und eine Warnung vor Baustellen.
- Auswertung von **Relativposition und dynamischer Zustandsinformation**: Neben der Relativposition wird eine (nicht gleichbleibende) Zustandsinformation eines Fahrzeuges oder einer Infrastruktureinheit übermittelt. Entweder wird der Zustand direkt übermittelt, z. B. die Phasen einer Lichtzeichenanlage, oder dieser wird aus

³⁸Ganzhorn et al. (2010): MMS-Konzept für motorisierte Krafträder, S. 94 f.

³⁹Ganzhorn et al. (2010): MMS-Konzept für motorisierte Krafträder, S. 96

⁴⁰ohne Einschränkung auf eine Fahrzeugklasse

einer Schalterstellung abgeleitet, z. B. Betätigung der Warnblinkanlage. Beispiele hierfür sind der Lichtzeichenassistent und eine Unfall-/Pannenwarnung bei eingeschaltetem Warnblinklicht.

- **Auswertung von Relativposition und Fahrzeugsensorik:** Bei diesen Systemen werden Gefahrstellen durch eine Auswertung von im Fahrzeug befindlichen Sensoren erkannt. Dabei werden neben Fahrdynamiksensoren, wie zum Messen von Beschleunigungen, Drehraten und Geschwindigkeiten, auch Lichtintensitäts-, Temperatur- und Reifenluftdrucksensoren verwendet. Dies ermöglicht beispielsweise die Erkennung von Stau, Hindernissen, Niedrigreißwert-Fahrbahnabschnitten und Unfall- bzw. Pannen-Fahrzeugen (durch Unfall- oder Reifenluftdruck-Sensorik).

Eine ausschließliche Betrachtung der Fahrzeugklasse Motorrad zeigt, dass Systeme für Motorräder sich mit wenigen Ausnahmen auf die ersten drei Gruppen beschränken. Bekannte Systeme der Gruppe „Relativposition und Fahrzeugsensorik“ sind eine Schlechtwetterwarnung und das „Elektronische Bremslicht“ (siehe Abschnitt 2.1.2). Nur bei letztgenanntem System wird ein Fahrdynamiksensor, der die Längsbeschleunigung des Fahrzeuges ermittelt, verwendet. Abgesehen von dieser Ausnahme ist kein kbW für Motorräder bekannt, das basierend auf der Auswertung von Fahrdynamiksensorik Gefahrstellen erkennt, um Warnmeldungen zu generieren.

2.4.2 Warn- und Informationselemente

Erste Warn- und Informationselemente in kbWs für Motorräder sind bereits realisiert. Bewertungen zu deren Wirksamkeit und Akzeptanz sind jedoch nicht bekannt. Im Vergleich zu anderen Fahrzeugklassen ist die Anzahl der bereits realisierten Warn- und Informationselemente im Motorrad gering.

Folgende Elemente für Motorräder wurden bereits in Serie oder in Forschungsprojekten realisiert:

- **Visueller Kanal:** Kontrollleuchten, Display im Cockpit, Head Up Indicator (Display auf der Windschutzscheibe), Head-Up-Display im Helm, blinkende LED-Leiste am Cockpitrand, LEDs im Spiegel
- **Auditiver Kanal:** Lautsprecher im Helm zur Übermittlung von Warn-/ Signaltönen
- **Haptischer Kanal:** Force-Feedback-Gasgriff, haptischer Handschuh, vibrierender Fahrersitz

2.5 Ermittlung des Forschungsbedarfes

Entsprechend dem Fazit in Abschnitt 2.4.1 ist ein kbW, wie es in Abschnitt 1.3 beschrieben ist, nicht bekannt. Dies führt zu den folgenden Fragestellungen hinsichtlich Unfallvermeidungspotential und Akzeptanz eines solchen Systems:

1. a) Welche Gefahrstellen und kritischen Fahrsituationen führen zu „relevanten“ Unfällen, die durch das erwähnte System verhindert werden?

- b) Wie werden diese Gefahrstellen durch die spätere Nutzergruppe, die Motorradfahrer, bewertet?

Hinsichtlich der Gefahrstellenerkennung basierend auf den Daten von Fahrdynamiksensorik ergeben sich daraus folgende Fragestellungen:

- 2.
 - a) Gibt es Kriterien zur Erkennung der identifizierten Gefahrstellen und kritischen Fahrsituationen, die auf der Auswertung der Daten von Fahrdynamiksensoren im Motorrad basieren?
 - b) Sind die Kriterien für die identifizierten Gefahrstellen und kritischen Fahrsituationen eindeutig?
 - c) Bewähren sich diese Kriterien in realen Fahrsituationen?

Aus dem Fazit in Abschnitt 2.4.2 ergeben sich folgende Fragestellungen bezüglich der Realisierbarkeit von Warnmaßnahmen in einem kbW für Motorräder:

- 3.
 - a) Ist es möglich, den Fahrer in einem kbW so zu warnen, dass die Warnung wirksam ist und gleichzeitig akzeptiert wird?
 - b) Wie sehen Gestaltungsbeispiele für das erwähnte System aus?

Fragestellung 1 wird in Kapitel 3 behandelt. Die Kapitel 5 und 6 untersuchen Fragestellung 2. Eine Analyse von Fragestellung 3 wird in den Kapiteln 7 und 8 durchgeführt.

3 Potentialbewertung

In Abschnitt 3.1 wird das Unfallvermeidungspotential des in Abschnitt 1.3 beschriebenen kbWs bewertet. Dies umfasst einen Überblick über die Ergebnisse von Studien zum Motorrad-Unfallgeschehen (Abschnitt 3.1.1) sowie die Analyse einer Unfalldatenbank (Abschnitt 3.1.2). Bewertungen des Systems durch Motorradfahrer (als potentielle Nutzer) werden in Abschnitt 3.2 dargestellt und untersucht.

3.1 Untersuchung des Unfallgeschehens von Motorrädern

3.1.1 Ursachen von Motorradunfällen

Zur Abschätzung des Unfallvermeidungspotentials wird nachfolgend ein Überblick über Literaturquellen zu Unfallursachen und Anhaltspunkten zur Unfallvermeidung gegeben. Der Überblick beschränkt sich auf Quellen, die sich ausschließlich oder teilweise mit dem Unfallgeschehen in Deutschland beschäftigen.

Betrachtungen der allgemeinen Unfallcharakteristik liefern u. a. Angaben zur Anzahl der Unfallbeteiligten^{1,2,3}. Demnach beträgt der Anteil der Alleinunfälle 15-35%. Innerorts ist dieser Anteil tendenziell geringer, außerorts größer (über 30%). Die restlichen Unfälle, d. h. die mit mindestens zwei Beteiligten, werden zu 30-40% von Motorradfahrern und zu 60-70% von anderen Verkehrsteilnehmern verursacht. Unfallgegner ist in den meisten Fällen ein Pkw (über 80%).

Bei einer Betrachtung der Unfallursache bietet sich eine Aufteilung nach personengebundenen und allgemeinen Ursachen an⁴. Da eine monokausale Bestimmung oft nicht möglich ist, werden teilweise für einen Unfall mehrere Ursachen angegeben.

Demnach liegen allgemeine Ursachen bei ungefähr 10% aller Unfälle und bei über 20% der Alleinunfälle vor. Darunter fallen Unfallursachen wie nasse Fahrbahn, Hindernisse oder Reibwertsprünge. In mehreren Quellen wird auf die besondere Gefahr durch Umwelteinflüsse hingewiesen^{5,6}. Die Auswirkungen dieser Einflüsse, die nicht zwingend primäre Unfallursache sind, auf das Unfallgeschehen sind beim Motorradfahren deutlich größer als beim Pkw-Fahren. Genannt werden u. a. die Gefahren durch Rollsplitt⁷, Stra-

¹u. a. Assing (2002): Unfallgeschehen von Motorradfahrern, S. 24

²u. a. ACEM (2008): MAIDS-Studie V 1.3, S. 23

³u. a. Engels (1986): Analyse des Unfallgeschehens mit motorisierten Zweirädern, S. 97

⁴Assing (2002): Unfallgeschehen von Motorradfahrern, S. 61 f.

⁵Engels (1986): Analyse des Unfallgeschehens mit motorisierten Zweirädern, S. 102

⁶Präckel (1999): Die Motorradbremsung, S. 6

⁷ACEM (2008): MAIDS-Studie V 1.3, S. 73

ßenschäden^{8,9}, unebene Fahrbahn¹⁰, Verunreinigungen¹¹, Reibwertsprünge allgemein^{12,13} und Reibwertsprünge speziell durch Öl^{14,15} sowie Bitumen^{16,17}.

Bei Unfällen mit personengebundenen Ursachen wird aufgrund der unterschiedlichen Verteilung eine weitere Unterteilung nach Anzahl der Beteiligten und Unfallverursacher vorgenommen. Demnach werden Alleinunfälle zum größten Teil durch nicht angepasste Geschwindigkeit verursacht^{18,19,20,21}. Bei Unfällen mit mehreren Beteiligten und dem Motorradfahrer als Verursacher werden ebenfalls nicht angepasste Geschwindigkeit sowie zu geringer Abstand und Fehler beim Überholen als Hauptursachen genannt. Unfälle mit mehreren Beteiligten und einem anderen Verkehrsteilnehmer als Verursacher werden im Wesentlichen durch Vorfahrts-/Vorrangsverletzungen sowie Fehler beim Abbiegen, Ein-/Anfahren und Wenden verursacht^{22,23,24}, da Geschwindigkeiten und/oder Beschleunigungen unterschätzt werden^{25,26}.

Die genannten Unfallursachen spiegeln sich auch in den „größten“ Gefahren aus Sicht der Motorradfahrer. Diese Gefahren sind nach den Ergebnissen einer Umfrage „Übersehen werden“, „Unfall“, „Straßenschäden“ und „Hindernisse“²⁷.

Als häufigstes Merkmal der Unfallstelle wird bei Alleinunfällen „Kurve“, bei Unfällen mit mehreren Beteiligten „Kreuzungen, Ein-/Ausfahrten“ und ebenfalls „Kurve“ genannt^{28,29,30}. Bei Unfällen mit dem Motorradfahrer als Verursacher sind beide Merkmale ähnlich häufig zu finden, bei Unfällen mit anderen Verursachern ist der Anteil des Merkmals „Kurve“ geringer.

Untersuchungen zur Reaktion des Motorradfahrers vor dem Unfall zeigen, dass bei ungefähr der Hälfte der Unfälle vor dem Zusammenstoß keine Reaktion des Fahrers stattfand^{31,32}. In den anderen Fällen wird vor dem Unfall meistens durch ein Bremsen reagiert (ca. 45% aller Unfälle). Bei den restlichen Unfällen wird vorher ausgewichen (und teilweise zusätzlich gebremst).

⁸Albus (1993): Bewertung von Maßnahmen der aktiven Sicherheit

⁹Kühn et al. (2008): Analyse des Motorradunfallgeschehens, S. 59

¹⁰Hegewald (2010): Straßeninfrastruktur und Motorradunfälle, S. 131

¹¹Präckel (1999): Die Motorradbremsung, S. 127

¹²Engels (1986): Analyse des Unfallgeschehens mit motorisierten Zweirädern, S. 101

¹³Seiniger et al. (2009): Erkennung kritischer Fahrsituationen, S. 19

¹⁴Albus (1993): Bewertung von Maßnahmen der aktiven Sicherheit, S. 161

¹⁵Brendicke (1993): Problemstrecken für Motorradfahrer, S. 289

¹⁶ACEM (2008): MAIDS-Studie V 1.3, S. 73

¹⁷Schweers et al. (1993): Einfluss von Bitumen auf das Fahrverhalten, S. 255 ff.

¹⁸Kramlich (2002): Die häufigsten Gefahrensituationen für Motorradfahrer, S. 19

¹⁹Otte et al. (1991): Einsatz von Elektronik im Motorrad, S. 336

²⁰Präckel (1999): Die Motorradbremsung, S. 14

²¹Sporner (2006): Einflussgrößen durch Straßenführug und Umfeld, S. 75

²²Kramlich (2002): Die häufigsten Gefahrensituationen für Motorradfahrer, S. 19

²³Otte et al. (1991): Einsatz von Elektronik im Motorrad, S. 336

²⁴Präckel (1999): Die Motorradbremsung, S. 14

²⁵Gwehenberger et al. (2006): Schwerstunfälle mit Motorrädern, S. 14

²⁶Verband HUK (1981): Ursachen und Folgen von Kraftradunfällen, S. B18

²⁷Kuschevski et al. (2006): Sicherheitsbewusstsein von Motorradfahrern, S. 340

²⁸u. a. Assing (2002): Unfallgeschehen von Motorradfahrern, S. 20 f.

²⁹u. a. Brendicke (1993): Problemstrecken für Motorradfahrer, S. 289

³⁰Kühn et al. (2008): Analyse des Motorradunfallgeschehens, S. 59

³¹u. a. ACEM (2008): MAIDS-Studie V 1.3, S. 63

³²u. a. Sporner (2002): Bremsen mit Motorrädern, S. 161

Untersuchungen zur zeitlichen und örtlichen Verteilung der Unfallzahlen und -schwere führte Assing durch³³. Demnach ist aufgrund der höheren Geschwindigkeiten das Unfallrisiko bei Außerortsunfällen größer als bei Innerortsunfällen. Die meisten Motorradfahrer verunglücken freitags. Die schwersten Unfälle passieren an Samstagen und Sonntagen. Das Unfallgeschehen ist witterungs- und jahreszeitabhängig. Als mögliche Ursache wird die primäre Nutzung in der Freizeit genannt. Spörner³⁴ und Kramlich³⁵ bestätigen die genannten Ergebnisse in ihren Studien.

Studien zum Unfallvermeidungspotential von Motorrad-ABV stellen fest, dass ein großer Teil der Unfälle (>10%) durch ABV verhindert bzw. in der Unfallschwere reduziert werden kann^{36,37,38}. Die Angaben variieren allerdings von 10% bis über 50%, was unter anderem auf unterschiedliche und teilweise schon viele Jahre zurückliegende Untersuchungszeiträume zurückzuführen ist. Eine Studie aus dem Jahr 2010 ermittelt ein Vermeidungspotential von knapp 25%³⁹.

Die dargestellten Ergebnisse der Literaturübersicht zu Kurvenunfällen (aufgrund nicht angepasster Geschwindigkeit), zu Kreuzungs-/Einbiege-/Abbiegeunfällen sowie zu Unfällen aufgrund von Gefahrstellen, wie Reibwertsprüngen oder Straßenschäden, deuten folgende Probleme beim Motorradfahren hinsichtlich des Unfallgeschehens an:

- Geschwindigkeit in Kurven
- Aufeinandertreffen von Pkw und Motorrädern an Straßenknoten
- örtlich begrenzte⁴⁰, umweltbedingte Gefahrstellen

Lösungsmöglichkeiten zu zweitgenanntem Problem sind bereits prototypenhaft realisiert (siehe auch Abschnitt 2.1). Aus diesem Grund werden nachfolgend nur die beiden anderen Probleme näher untersucht. Da die beschriebenen Literaturquellen zur näheren Untersuchung der beiden Probleme nur teilweise ausreichend genaue Informationen liefern, der Zeitraum der untersuchten Unfälle größtenteils länger zurückliegt und die verwendete Datenbasis nicht in allen Fällen repräsentativ ist, wird im nächsten Abschnitt das Unfallgeschehen von Motorrädern anhand einer Unfalldatenbankrecherche näher untersucht.

3.1.2 Unfalldatenbankrecherche

Datenbasis

Zur statistischen Auswertung von Motorradunfällen in Deutschland bieten sich nach Appel neben der Amtlichen Unfallstatistik die Unfalldatenbank der Versicherer (UDB), die der *German In-Depth Accident Study* (GIDAS) oder die von Prüforganisationen als Datenbasis

³³Assing (2002): Unfallgeschehen von Motorradfahrern, S. 12 ff.

³⁴Spörner (2006): Einflussgrößen durch Straßenführung und Umfeld, S. 50

³⁵Kramlich (2002): Die häufigsten Gefahrensituationen für Motorradfahrer, S. 8 f.

³⁶Gwehenberger et al. (2006): Schwerstunfälle mit Motorrädern, S. 17

³⁷Otte et al. (1991): Einsatz von Elektronik im Motorrad, S. 336

³⁸Spörner (2002): Bremsen mit Motorrädern, S. 165

³⁹ADAC (2010): Unfallforschung zu Motorrad-ABS, S. 1 (Bei insgesamt 650 getöteten Motorradfahrern im Jahr 2009 wird von 160 weniger ausgegangen.)

⁴⁰„örtlich begrenzt“ bedeutet in diesem Fall, dass sich die Gefahrstelle nur über eine maximal mehrere Quadratmeter große Fläche der Fahrbahn erstreckt.

an⁴¹. Die GIDAS-Datenbank wird in der genannten Quelle als beispielhaft für In-Depth-Unfalluntersuchungen bewertet. Nach Angaben weiterer Quellen bewährt sich die GIDAS-Datenbank hinsichtlich einer Daten-Repräsentativität für das Erhebungsgebiet^{42,43}. Um dies auf das Unfallgeschehen in Deutschland zu übertragen, ist eine Gewichtung anhand bestimmter Merkmale (wie Ortslage oder Verletzungsschwere) erforderlich. Die nachfolgend beschriebene Unfalldatenbankrecherche basiert daher auf der GIDAS-Datenbank. Für eine Bewertung des bundesweiten Unfallgeschehens werden die Ergebnisse der Recherche zusätzlich gewichtet.

Für alle folgenden Berechnungen wird angenommen, dass die gewichteten Unfalldaten der GIDAS-Datenbank die Amtliche Unfallstatistik und somit das Unfallgeschehen in Deutschland repräsentativ abbilden. Diese Annahme vernachlässigt, dass in der Unfallstatistik polizeilich nicht erfasste Unfälle unberücksichtigt bleiben. Nach einer Untersuchung von Kühn et al. ist allerdings der Anteil der nicht amtlich erfassten Unfälle mit Schwerverletzten und/oder Getöteten vernachlässigbar⁴⁴.

Auswertung

Basis für die weiteren Untersuchungen sind alle in der GIDAS-Datenbank enthaltenen Unfälle der Jahre 1999 bis 2007 mit Beteiligung eines Fahrzeugs der Klasse Motorrad ($n = 1411$). Zur Klasse der Motorräder gehören neben Krafträdern auch Leichtkrafträder und Kraftrroller. Da innerhalb dieser Klasse Unterschiede in Bezug auf Fahrverhalten und Motorisierung bestehen, werden Motorräder mit einem Hubraum größer als 125 ccm gesondert untersucht ($n = 729$ ⁴⁵).

Ausgangspunkt für die Unfalldatenbankrecherche sind die in Abschnitt 3.1.1 getroffenen Schlussfolgerungen. Demnach sind Unfälle in Kurven und solche im Zusammenhang mit örtlich begrenzten, umweltbedingten Gefahrstellen Untersuchungsgegenstand. Letztere führen zu einer Vorauswahl von Unfällen, denen in der Datenbank mindestens eines der folgenden Merkmale oder eine damit zusammenhängende Ursache zugeordnet ist:

- schlechter Straßenzustand (z. B. loser Rollsplitt, Bodenwellen)
- verschmutzte Fahrbahn (z. B. Öl)
- stehendes Hindernis auf der Fahrbahn (z. B. verunfalltes Fahrzeug)

Um Informationen über Kurvenunfälle aufgrund von „unangepasster Geschwindigkeit“⁴⁶ zu erhalten, wird die Vorauswahl um Daten von Unfällen, die die beiden folgenden Merkmale aufweisen, ergänzt:

- Unfallursache: (unangepasste/ nicht angepasste) Geschwindigkeit
- Unfallstelle: Kurve

⁴¹Appel et al. (2002): Unfallforschung, S. 32 ff.

⁴²INVENT (2006): Schlussbericht FAS, S. 75

⁴³Issing (2006): Telematik und Telemedizin, S. 64

⁴⁴Kühn et al. (2008): Analyse des Motorradunfallgeschehens, S. 69

⁴⁵Unfälle ohne Hubraum-Angabe ($n = 272$) werden ebenfalls nicht betrachtet.

⁴⁶nicht näher definierte Angabe zur Unfallursache in der amtlichen Unfallstatistik und der GIDAS-Datenbank

Die Abschätzung des Unfallvermeidungspotentials resultiert aus einer Einzelfallanalyse aller Unfälle, die die genannten Merkmale aufweisen. Dafür wird jeder Unfall auf Vermeidbarkeit durch das in Abschnitt 1.3 beschriebene kbW überprüft. Mit der Annahme, dass basierend auf der Beobachtung einer Gefahrstelle eine Warnung erzeugt wird und nachfolgende Fahrer aufgrund der Warnung die Gefahrensituation richtig einschätzen und ohne Unfall überstehen, wird folgendes **Kriterium** zur Abschätzung des Unfallvermeidungspotentials definiert:

„Ein Unfall ist potentiell vermeidbar, wenn die unfallverursachende Situation durch ein vorausfahrendes Fahrzeug (unabhängig von der technischen Realisierbarkeit) beobachtbar und nicht durch ein dem Stand der Technik entsprechendes Fahrerassistenzsystem vermeidbar ist.“

Dieses Kriterium führt zum Ausschluss von Unfällen mit folgenden Ursachen:

- Radblockade (vermeidbar durch ABV)
- Durchdrehen des Antriebsrades (vermeidbar durch eine Antriebsschlupfregelung)
- unangepasste Kurvengeschwindigkeit bei normalen Fahrbahnbedingungen, d. h. bei trockener Fahrbahn ohne Schäden (vermeidbar durch eine auf einer digitalen Karte basierende Geschwindigkeitswarnung)

Mit den restlichen Daten liefert die Einzelfallanalyse folgende Klassen für Ursachen von Unfällen, die durch ein kbW für Motorräder potentiell vermeidbar sind:

1. unangepasste Geschwindigkeit in Kurven auf nasser oder glatter Fahrbahn
2. umweltbedingte Gefahrstellen
 - a) Reibwertsprünge durch Ölflecken, Rollsplitt, Bitumen
 - b) Fahrbahnschäden wie Bodenwellen, Schlaglöcher, Querrinnen, schlechter Fahrbahnbelag (Unebenheit)
 - c) Hindernisse wie liegengebliebene Fahrzeuge (durch Panne oder Unfall), Steine

Tabelle 3.1 enthält die Ergebnisse der (ungewichteten) Unfalldatenbankrecherche. Aufgeführt ist die Anzahl der in der GIDAS-Datenbank enthaltenen, potentiell vermeidbaren Unfälle entsprechend den definierten Unfallklassen für alle Motorradunfälle und für Unfälle mit Motorrädern, deren Hubraum größer als 125 ccm ist. Demnach wären für ersten Fall 6,7% und für zweiten Fall 6,0% der in der Datenbank enthaltenen Unfälle vermeidbar gewesen.

Gewichtung

Da in die GIDAS-Datenbank ausschließlich Unfälle aus den Großräumen Hannover und Dresden aufgenommen werden, ist eine direkte Übertragbarkeit des relativen Anteils der vermeidbaren Unfälle auf das Unfallgeschehen in Deutschland nicht gegeben. Eine Möglichkeit, sich einer direkten Übertragbarkeit anzunähern, bietet eine Gewichtung der Unfälle nach bestimmten Merkmalen. Hautzinger zeigt, dass die Unterschiede bezüglich

der Merkmale Ortslage und Verletzungsschwere am meisten ausgeprägt sind⁴⁷. Werden die vermeidbaren Unfälle entsprechend diesen Merkmalen mit Faktoren, ermittelt wie im Anhang A.2 beschrieben, gewichtet, so ergeben sich die in Tabelle 3.2 dargestellten Unfallzahlen und deren Anteil am gesamten Unfallgeschehen.

Ein Vergleich mit den ungewichteten Zahlen aus Tabelle 3.1 zeigt, dass Unterschiede nur im Bereich von maximal 0,3 Prozentpunkten je Unfallklasse liegen. Das Gesamt-Unfallvermeidungspotential variiert in Abhängigkeit von Hubraumgröße und Gewichtung zwischen 6,0% und 7,1%. Aufgrund dieser geringen Abweichungen wird davon ausgegangen, dass diese Zahl repräsentativ für alle in Deutschland polizeilich erfassten Unfälle mit Beteiligung von Motorrädern ist.

Tabelle 3.1: Potentiell vermeidbare Unfälle (ungewichtet)

Klasse	alle (<i>n</i> = 1411)		>125 ccm (<i>n</i> = 729)	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
1	23	1,6%	11	1,5%
2 a	38	2,7%	17	2,3%
b	20	1,4%	9	1,2%
c	14	1,0%	7	1,0%
gesamt	95	6,7%	44	6,0%

Tabelle 3.2: Potentiell vermeidbare Unfälle (gewichtet)

Klasse	alle (<i>n</i> = 1411)		>125 ccm (<i>n</i> = 735,5)	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
1	24,3	1,7%	10,6	1,4%
2 a	39,9	2,8%	18,9	2,6%
b	21,1	1,5%	9,0	1,2%
c	15,4	1,1%	8,4	1,1%
gesamt	100,7	7,1%	46,8	6,4%

3.2 Nutzerbefragung

Die in Abschnitt 3.1.2 beschriebene Unfalldatenbankrecherche liefert Gefahrstellen, die zu potentiell vermeidbaren Unfällen führten. (Subjektive) Bewertungen des Systems und dessen Auslegung durch potentielle Nutzer, die Motorradfahrer, lassen sich daraus nicht ableiten. Dies motiviert zur Durchführung einer Nutzerbefragung („Motorradfahrer-Umfrage“), um Einschätzungen zum empfundenen Gefährdungspotential der identifizierten Gefahrstellen und Erkenntnisse zum Gruppenfahrverhalten sowie zur Akzeptanz zu erhalten. Nachfolgend werden Aufbau und Ergebnisse einer zur Bewertung eines kbWs für Motorräder durchgeführten Umfrage dargestellt.

⁴⁷Hautzinger et al. (2006): Hochrechnung von Unfalldaten, S. 45

3.2.1 Datenbasis

Die Ergebnisse der Umfrage basieren auf der Befragung von insgesamt 118 an drei verschiedenen Treffpunkten (Falltorhaus in der Nähe von Schotten im Vogelsberg, Großer Feldberg im Taunus, Marbach-Stausee im Odenwald) befragten Motorradfahrern. Um die Repräsentativität der Umfrage zu bewerten, werden die Merkmale Geschlecht (männlich/weiblich), Alter (18-34 Jahre, 35-49 Jahre, ≥ 50 Jahre) und Hubraumgröße des am häufigsten gefahrenen Motorrades (125-749 ccm, 750-999 ccm, ≥ 1000 ccm) mit den KBA-Bestandsdaten vom 1.1.2008^{48,49} verglichen. Diesen Vergleich zeigt Tabelle A.10 im Anhang A.3.

Die Verteilung des Merkmals Geschlecht entspricht in der Umfrage bis auf wenige Promille der in den KBA-Bestandsdaten (Abweichung ca. 0,5%). Bei den Merkmalen Alter und Hubraum ist dies nicht der Fall. Während die Anteile der mittleren Merkmalsausprägungen (Alter: 35 - 49 Jahre bzw. Hubraum: 750 - 999 ccm) bis auf wenige Prozentpunkte übereinstimmen (Abweichungen ca. 1,1% bzw. 2,7%), ist dies für die beiden anderen Merkmalsausprägungen nicht der Fall (Abweichungen bis zu 20,8%). Im Vergleich zu den KBA-Bestandsdaten sind jüngere Motorradfahrer (Alter: 18 - 34 Jahre) und solche mit großen Motorrädern (Hubraum: ≥ 1000 ccm) überrepräsentiert sowie ältere (Alter: ≥ 50 Jahre) und solche mit kleinen Motorrädern (Hubraum: 125 - 749 ccm) unterrepräsentiert. Werden die Umfragedaten hinsichtlich Hubraum mit den KBA-Neuzulassungen verglichen, so sind die Abweichungen geringer.

3.2.2 Durchführung

Die Durchführung der Umfrage erfolgt anhand des im Anhang A.3.2 befindlichen Fragebogens. Ziel der Umfrage ist, subjektive Bewertungen hinsichtlich folgender Punkte zu erhalten:

- **Gefährdungspotential** der durch die Unfalldatenbankanalyse identifizierten Gefahrstellen: Die Befragten werden gebeten, vorgegebene Gefahrstellen in vier Stufen von *sehr ungefährlich* über *ungefährlich* und *gefährlich* bis *sehr gefährlich* zu bewerten. Dabei wird unterschieden, ob sich die Gefahrenstelle auf einer Geraden oder in einer Kurve befindet.
- **Akzeptanz** eines kbWs: Um die Akzeptanz eines Gefahrenwarnsystems einzuschätzen, werden die Motorradfahrer befragt, ob sie ein System im Motorrad, das vor den vorher genannten Gefahrstellen warnt, sinnvoll fänden. Weiterhin wird gefragt, ob sie ein System, das vor zu hohen Kurvengeschwindigkeiten warnt, als sinnvoll bewerten. Zusätzlich wird nach der Kaufbereitschaft gefragt.
- **Gruppenfahrverhalten** von Motorradfahrern: In Abschnitt 1.2 wird angenommen, dass Motorradfahrer oft in Gruppen unterwegs sind. Um Informationen zum Gruppenfahrverhalten von Motorradfahrern zu erhalten, wird gefragt, wie oft Motorradfahrer in einer Gruppe fahren und wie viele Teilnehmer ihre Gruppe im Durchschnitt hat.

⁴⁸KBA (2010): Fahrzeugzulassungen, S. 19 ff.

⁴⁹IVM (2010): Jahresbericht 2009, S. 34

3.2.3 Ergebnisse

Bewertung von Gefahrstellen

In Tabelle 3.3 sind die Mediane der Gefahrstellenbewertung aufgeführt. Zusätzlich sind die Mittelwerte⁵⁰ angegeben. Weitere Angaben befinden sich im Anhang A.3.3. Demnach bewertet mehr als die Hälfte aller befragten Motorradfahrer alle durch die Unfalldatenbankanalyse identifizierten Gefahrstellen als *gefährlich* (Wert 2) oder als *sehr gefährlich* (Wert 3), wenn sich diese in einer Kurve befinden. Dies gilt nur teilweise für gerade Fahrbahnabschnitte. Hier werden „Ausbesserungen durch Bitumen“, „Querrinnen“, „Bodenwellen“ und „Schlechter Fahrbahnbelag“ mehrheitlich als *ungefährlich* (Wert 1) oder als *sehr ungefährlich* (Wert 0) bewertet.

Tabelle 3.3: Gefahrstellenbewertung durch Motorradfahrer (Wertebereich: 0: sehr ungefährlich, 1: ungefährlich, 2: gefährlich, 3: sehr gefährlich; MW: Mittelwert; MED: Median)

Art der Gefahrenstelle	Fahrbahn	Wert		Fahrbahn	Wert	
		MED	MW		MED	MW
Ölfleck	Kurve	3	2,9	Gerade	2	2,1
Ausbesserung - Rollsplitt	Kurve	3	2,8	Gerade	2	2,1
Großes Hindernis	Kurve	3	2,8	Gerade	2	2,0
Kleines Hindernis	Kurve	3	2,5	Gerade	2	1,8
Schlaglöcher	Kurve	3	2,5	Gerade	2	1,8
Ausbesserung - Bitumen	Kurve	2	2,3	Gerade	1	1,3
Querrinnen	Kurve	2	2,2	Gerade	1	1,4
Bodenwellen	Kurve	2	2,1	Gerade	1	1,1
Schlechter Fahrbahnbelag	Kurve	2	2,0	Gerade	1	1,4

Bewertung von Systemen zur Warnung vor Gefahrstellen und zu hoher Kurvengeschwindigkeit

In Abbildung 3.1 sind die Ergebnisse der Befragung hinsichtlich der Akzeptanzbewertung von Warnsystemen im Motorrad dargestellt. Die Auswertung ergibt, dass 104 der befragten Teilnehmer (ca. 88%) ein Gefahrenwarnsystem für sinnvoll erachten (Wert 2 und 3), 93 Befragte (ca. 79%) finden eine Warnung vor zu hohen Kurvengeschwindigkeiten sinnvoll (Wert 2 und 3). 88 der Teilnehmer (ca. 75%) können sich vorstellen, ein Warnsystem, das vor den genannten Gefahrstellen und zu hohen Geschwindigkeiten warnt, zu kaufen (Wert 2 und 3).

⁵⁰Da eine Ordinalskala vorliegt, ist eine Mittelwertbildung nicht zulässig. Um Tendenzen abzulesen, werden diese trotzdem bestimmt.

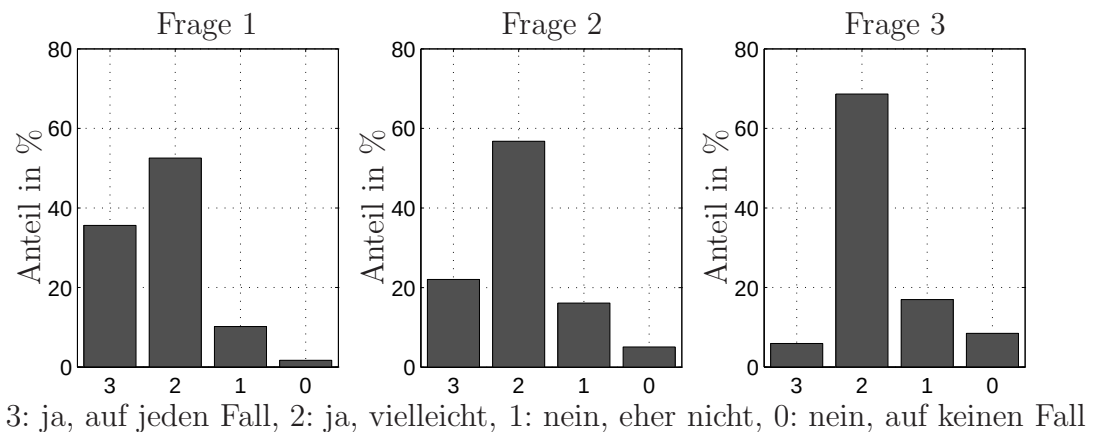


Abbildung 3.1: Akzeptanzbewertung von Warnsystemen: **Frage 1:** Fänden Sie ein System im Motorrad, das vor solchen Gefahrenstellen warnt, sinnvoll? **Frage 2:** Fänden Sie ein System, das vor zu hohen Geschwindigkeiten vor Kurven warnt, sinnvoll? **Frage 3:** Würden Sie ein System kaufen, das vor den oben genannten Gefahrenstellen und zu hohen Geschwindigkeiten warnt?

Analyse des Gruppenfahrverhaltens

In Abbildung 3.1 sind die Ergebnisse der Befragung hinsichtlich des Gruppenfahrverhaltens dargestellt. Demnach unternehmen die befragten Motorradfahrer durchschnittlich ca. 32% der Fahrten in einer Gruppe, die zum Großteil, d. h. bei über 65% der Befragten, aus drei bis sechs Fahrern besteht. Nur ca. 22% der Befragten fahren höchstens 10% der Fahrten in einer Gruppe.

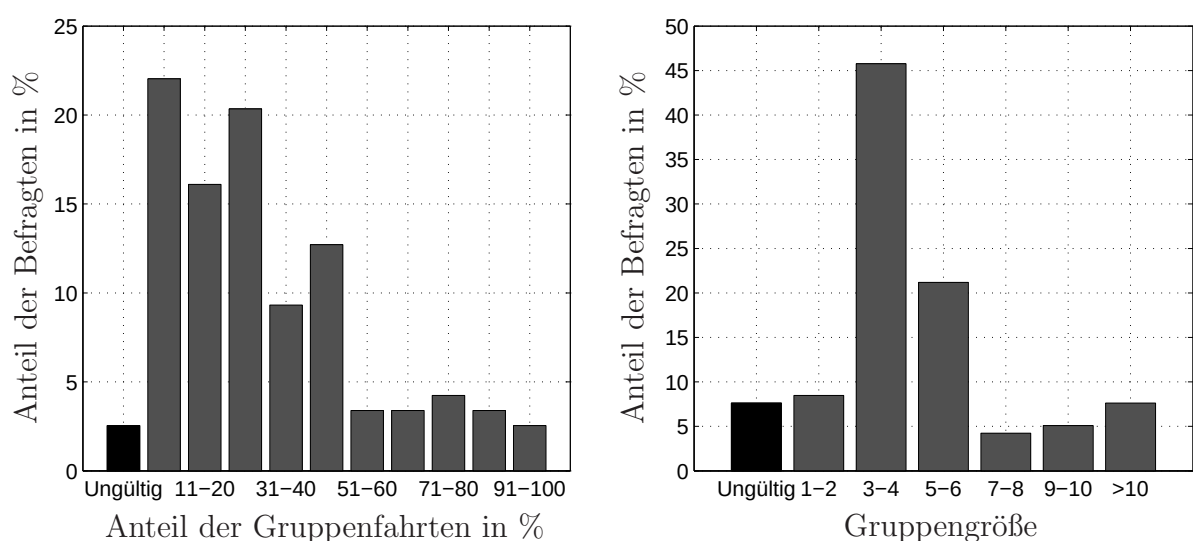


Abbildung 3.2: Angaben zum Gruppenfahrverhalten

3.3 Fazit

Die in Abschnitt 3.1.2 beschriebene Unfalldatenbankrecherche führt zu zwei Klassen von durch ein kbW vermeidbaren Unfällen. Dies sind zum einen Unfälle aufgrund unangepasster Geschwindigkeit in Kurven auf nasser oder glatter Fahrbahn und zum anderen Unfälle aufgrund der Gefahrstellen Reibwertsprung, Fahrbahnschaden und Hindernis. Das Unfallvermeidungspotential für beide Klassen beträgt zusammen ca. 6-7%. Die Relevanz der beiden Unfallklassen wird durch die in Abschnitt 3.2.3 vorgestellten Ergebnisse der Nutzerbefragung zur Gefahrstellenbewertung bestätigt. Insgesamt leiten sich daraus folgende Gefahrstellen ab, die in Kapitel 5 untersucht werden:

- Kurve
- Reibwertsprung
- Fahrbahnschaden (Unebenheit)
- Fahrbahnschaden (Einzelschaden)
- Hindernis

Zusätzlich zeigt die Nutzerbefragung, dass eine Grundakzeptanz gegenüber kbWs vorliegt und Gruppenfahrten bei Motorradfahrern eine relevante Rolle einnehmen.

4 Untersuchungswerkzeuge

4.1 Versuchsmotorrad

Werkzeug zur Versuchsdurchführung und Messdatenaufnahme ist das in Abbildung 4.1 gezeigte Motorrad, eine Honda CBF1000A. Das Motorrad ist mit einem ABV-System sowie dem (Teil-)Kombinationsbremssystem *Single CBS* ausgestattet. Bei Betätigung der Fußbremse werden Vorder- und Hinterrad, bei Betätigung der Handbremse nur das Vorderrad gebremst.

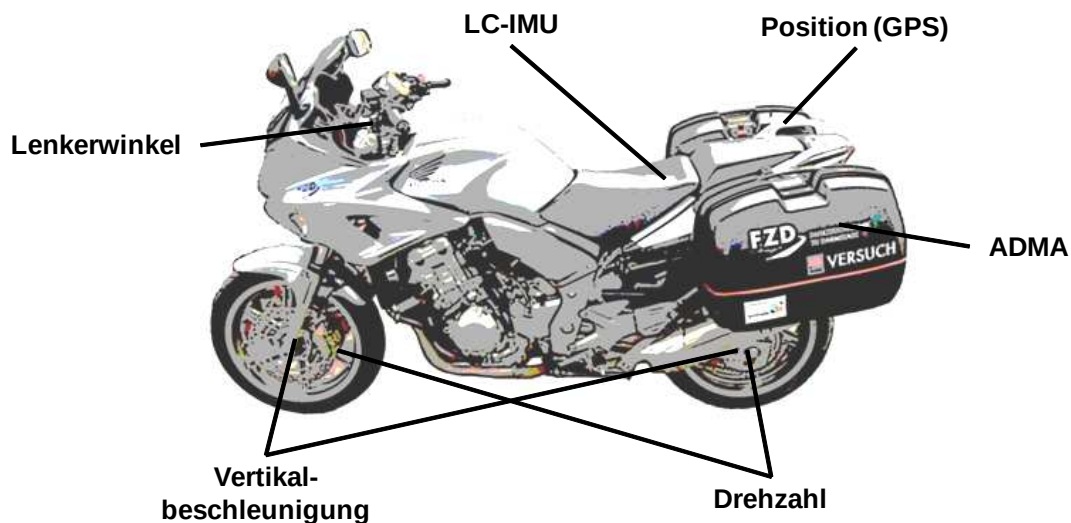


Abbildung 4.1: Versuchsmotorrad und Sensorik (ADMA: Automotive Dynamic Motion Analyzer, LC-IMU: Low-Cost-Inertialmesseinheit), GPS: Global Positioning System

Die für diese Arbeit relevanten Fahrzeugdaten sind nachfolgend aufgelistet:

- Fahrzeugleermasse $m_{\text{leer}} = 250 \text{ kg}$
- Fahrzeugmasse (inkl. Sensorik und Anbauten) $m = 267 \text{ kg}$
- Radstand $l = 1,48 \text{ m}$
- Lenkkopfwinkel $\tau = 26^\circ$
- Nachlauf $r = 0,11 \text{ m}$
- Schwerpunktlage¹: (in die Fahrbahn projizierter) Abstand von Schwerpunkt zu hinterem Radaufstandspunkt $l_h = 0,76 \text{ m}$, Schwerpunkthöhe $h_s = 0,52 \text{ m}$
- Schwerpunktlage (mit 75 kg-Fahrer): $l_h = 0,67 \text{ m}$, $h_s = 0,67 \text{ m}$

¹ermittelt durch Wiegen der Radlasten (ebener/schräger Stand) nach Weidele (2011): Motorräder, S. 19 ff.

Mit Ausnahme des Anbaus von zusätzlicher Sensorik (siehe Abschnitt 4.2) befindet sich das Motorrad im Serienzustand. Nur für die Versuche zur Evaluierung der in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Methode wird eine Sturzschutz-Vorrichtung mit Highsider-Schutz verwendet².

4.2 Sensorik

Abbildung 4.1 zeigt die verwendeten Sensoren. Eine Low-Cost-Inertialmesseinheit (**LC-IMU**) misst körperfest Drehraten und Beschleunigungen in allen drei Raumrichtungen. Die Messeinheit ist lateral mittig unter dem Fahrersitz platziert. Der vertikale Abstand zur Fahrbahn beträgt $h_{\text{IMU}} = 0,71 \text{ m}$ (bei einem Rollwinkel von $\lambda = 0^\circ$). Der in die Fahrbahn projizierte Abstand von der Messeinheit zum hinteren Radaufstandspunkt ist $l_{\text{h,IMU}} = 0,24 \text{ m}$. Ein GPS-Empfänger bestimmt die **Position**. Die Faserkreisel-Inertialmesseinheit *Automotive Dynamic Motion Analyzer* (**ADMA**) liefert Drehraten und Beschleunigungen (körperfest und horizontiert) sowie u. a. den Rollwinkel. Der ADMA dient als Referenzsensorik und ist im linken hinteren Koffer über dem hinteren Radaufstandspunkt ($l_{\text{h,ADMA}} = 0 \text{ m}$) befestigt. Der laterale Versatz zur Fahrzeuglängsachse ist $0,1 \text{ m}$. Der vertikale Abstand zur Fahrbahn beträgt $h_{\text{ADMA}} = 0,68 \text{ m}$ (bei $\lambda = 0^\circ$).

Die Messung der **Drehzahlen** der Räder erfolgt mit den ABV-Sensoren. Diese basieren auf dem Hall-Prinzip. In Kombination mit einem Stanzblech werden bei einer Umdrehung des Vorderrades 60 Ticks und bei einer Umdrehung des Hinterrades 50 Ticks ausgelöst. In der Nähe der Radnaben befestigte unidirektionale Beschleunigungsaufnehmer messen die **Vertikalbeschleunigung** der Räder. Ein in der Lenkkopfschraube befestigter Absolutwinkelsensor gibt den **Lenkerwinkel** aus. In Tabelle 4.1 sind Kenndaten für die verwendeten Sensoren aufgeführt.

Tabelle 4.1: Sensorspezifikationen (Quellen: Datenblätter von GeneSys ADMA-G und Sensor-Dynamics SD 755 Minicube (LC-IMU), Herstellerangaben, eigene Messung; Abtastrate: 100 Hz (ADMA und Vertikalbeschleunigungssensor), sonst 50 Hz)

Sensor	Messbereich	Rauschen	Offsetfehler	Skalenfaktorfehler
LC-IMU (Beschl.)	$\pm 50 \text{ m/s}^2$	$0,04 \text{ m/s}^2$	$0,5 \text{ m/s}^2$	2,7%
LC-IMU (Drehr.)	$\pm 300 \text{ }^\circ/\text{s}$	$0,3 \text{ }^\circ/\text{s}$	$0,5 \text{ }^\circ/\text{s}$	2,2%
Vertikalbeschl.	$\pm 140 \text{ m/s}^2$	$0,03 \text{ m/s}^2$	5 m/s^2	4,0%

Sensor	Messbereich	Genauigkeit
ADMA (Beschl.)	$\pm 50 \text{ m/s}^2$	$0,01 \text{ m/s}^2$
ADMA (Drehr.)	$\pm 320 \text{ }^\circ/\text{s}$ (Rollen) $\pm 98 \text{ }^\circ/\text{s}$ (Nicken, Gieren)	$1 \text{ }^\circ/\text{h}$
ADMA (Winkel)	$\pm 60^\circ$ (Rollen, Nicken) $0^\circ\text{-}360^\circ$ (Gieren)	$0,1^\circ$
Lenkerwinkel	$\pm 40^\circ$	0,3%

²siehe auch: Lattke et al. (2011): Hazard Detection in a Cooperative Assistance System, S. 10

4.3 Koordinatensysteme

4.3.1 Definition verwendeter Koordinatensysteme

DIN 70000 unterscheidet zur Beschreibung von Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten vier Koordinatensysteme³. In Anlehnung daran werden für diese Arbeit die folgenden vier Koordinatensysteme definiert:

- Ortsfestes Koordinatensystem (Index E): Der Ursprung liegt im Raum. Die X_E - und die Y_E -Achse beschreiben die Fahrbahnebene. Die Z_E -Achse steht senkrecht dazu und zeigt nach oben.
- Fahrzeugfestes Koordinatensystem (Index V): Der Ursprung befindet sich im Schwerpunkt des Fahrzeuges. Die X_V - und die Z_V -Achse beschreiben die Fahrzeuglängsmittlebene. Die Y_V -Achse steht senkrecht darauf und zeigt nach links.
- Horizontiertes Koordinatensystem (ohne Index): Der Ursprung befindet sich wie beim fahrzeugfesten Koordinatensystem im Schwerpunkt des Fahrzeuges. Die X - Y -Ebene liegt parallel zur Fahrbahnebene und damit zur X_E - Y_E -Ebene. Die Z -Achse steht senkrecht dazu und zeigt nach oben. Die X -Achse zeigt nach vorne. Bei nickfreier Fahrt entspricht diese somit der X_V -Achse.
- (Horizontiertes) Rad-Koordinatensystem (Index W): Der Ursprung liegt im Aufstandspunkt des Rades, d. h. es gibt zwei Rad-Koordinatensysteme. Die X_W - Y_W -Ebene liegt in der X_E - Y_E -Ebene. Die Z_W -Achse steht senkrecht darauf und zeigt nach oben. Die X_W -Achse ist die Schnittlinie der Radebene mit der X_E - Y_E -Ebene.

Abbildung 4.2 zeigt die verschiedenen Koordinatensysteme für ein von vorne betrachtetes Motorrad. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist nur ein Rad-Koordinatensystem eingezeichnet.

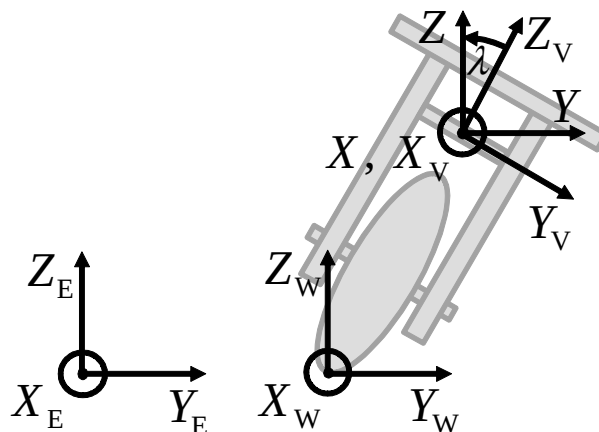


Abbildung 4.2: Koordinatensysteme: ortsfest (Index E), fahrzeugfest (Index V), horizontiert (ohne Index), Rad (Index W). Anmerkung: Die X -Achse entspricht nur bei nickfreier Fahrt der X_V -Achse.

³DIN 70000 (1994): Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten

4.3.2 Ergänzende Definition von Drehbewegungen

Gemäß der Definition des fahrzeugfesten Koordinatensystems in Abschnitt 4.3.1 dreht sich dieses in allen drei Raumachsen mit dem Fahrzeug. Bei dem horizontalen Koordinatensystem dreht sich die Z -Achse mit dem Fahrzeug. In beiden Koordinatensystemen tritt demnach bei realen Fahrsituationen kein Gieren auf, im fahrzeugfesten Koordinatensystem treten zusätzlich auch kein Nicken und kein Rollen auf. Daher werden abweichend von den Definitionen in Abschnitt 4.3.1 die genannten Drehbewegungen (ebenfalls angelehnt an DIN 70000) wie folgt definiert:

- Gierbewegung ($\psi, \dot{\psi}$): Drehung des Fahrzeuges um die Z_E -Achse
- Gierbewegung ($\psi_V, \dot{\psi}_V$): Anteil der Drehung des Fahrzeuges um die Z_E -Achse in Z_V -Richtung
- Nickbewegung ($\nu, \dot{\nu}$): Verdrehung der X -Achsen von horizontaltem und fahrzeugfestem Koordinatensystem (positiv bei positiver Drehung um die Y -Achse)
- Nickbewegung ($\nu_V, \dot{\nu}_V$): Drehung des Fahrzeuges um die Y_V -Achse im horizontalen Koordinatensystem
- Rollbewegung ($\lambda, \dot{\lambda}$): Verdrehung der Y -Achsen von horizontaltem und fahrzeugfestem Koordinatensystem (positiv bei positiver Drehung um die X -Achse)
- Rollbewegung ($\lambda_V, \dot{\lambda}_V$): Drehung des Fahrzeuges um die X_V -Achse im horizontalen Koordinatensystem

Die mit dem Index V gekennzeichneten Drehraten sind demnach die Drehbewegungen, die mit einer fest in Richtung des fahrzeugfesten Koordinatensystems verbauten Inertialmeseinheit gemessen werden. Diese entsprechen bei vernachlässigbaren Roll- und Nickwinkeln näherungsweise den Drehraten ohne Index.

4.3.3 Koordinatentransformation

Bei nickfreier Fahrt und bekanntem Rollwinkel λ erfolgt nach Seiniger et al. eine Umrechnung der fahrzeugfesten Koordinaten (x_V, y_V, z_V) in die horizontalen Koordinaten (x, y, z) wie folgt⁴:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & -\sin \lambda \\ 0 & \sin \lambda & \cos \lambda \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_V \\ y_V \\ z_V \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Eine Umrechnung von Beschleunigungen eines Starrkörpers in einem Punkt S , z. B. einer Inertialmeseinheit, auf einen zweiten Punkt P , z. B. den Schwerpunkt eines Fahrzeuges, ist bei bekanntem Abstand von Punkt S zu Punkt P ($\mathbf{r}_{SP} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$) und bekannten Drehraten ($\dot{\lambda}, \dot{\nu}, \dot{\psi}$) nach Gross et al. wie folgt möglich⁵:

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix}_P = \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix}_S + \begin{pmatrix} \ddot{\lambda} \\ \ddot{\nu} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\nu} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \times \left(\begin{pmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\nu} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \right) \quad (4.2)$$

⁴Seiniger et al. (2009): Erkennung kritischer Fahrsituationen, S. 30

⁵Gross et al. (2010): Technische Mechanik: Kinetik, S. 130

4.4 Rollwinkelschätzung

Der Rollwinkel ist eine für viele Anwendungen im Motorrad erforderliche Größe. Anwendungen sind z. B. Systeme für eine bremslenkmomentoptimierte Motorrad-Kurvenbremsung⁶ oder eine Erkennung kritischer Kurvenfahrsituationen⁷. Bisher sind keine auf dem Motorradmarkt befindlichen Systeme bekannt, die den Rollwinkel direkt bestimmen. Ein System zur indirekten Bestimmung nutzt beispielsweise Messdaten einer Inertialmesseinheit und kombiniert diese über Tief- sowie Hochpassfilter⁸. Eine weitere Möglichkeit besteht in einer videobasierten Rollwinkelschätzung⁹.

Die in dieser Arbeit verwendete Rollwinkelbestimmung basiert auf einem (Erweiterten) Kalman-Filter. Dies bietet die Möglichkeit, mehrere Sensoren zu kombinieren und das Filter um deren Daten zu ergänzen. Grundlagen zur Theorie des Kalman-Filters werden im Anhang A.4.1 beschrieben. Abschnitt 4.4.1 führt in fahrdynamische Zusammenhänge in Bezug auf den Rollwinkel ein. Die daraus abgeleiteten und für ein Kalman-Filter erforderlichen Modelle von System und Messung werden in Abschnitt 4.4.2 erläutert. Die Güte der Rollwinkelschätzung wird in Abschnitt 4.4.3 bewertet.

4.4.1 Rolldynamik

Rollwinkel in Abhängigkeit der Rollrate

Der Gesamtrollwinkel λ wird bei kleinen Nickwinkeln¹⁰ allgemeingültig, d. h. für instationäre und (quasi-)stationäre Situationen, durch das Integral der gemessenen Rollrate $\dot{\lambda}_V$ beschrieben:

$$\lambda = \int \dot{\lambda}_V dt \quad (4.3)$$

Rollwinkel in Abhängigkeit von Gierrate und Fahrzeuglängsgeschwindigkeit

Für stationäre Kreisfahrten entspricht der Tangens des physikalisch wirksamen Rollwinkels λ_{th} dem Verhältnis aus Seitenkraft F_S und Gewichtskraft F_G . Daraus folgt nach Weidele¹¹:

$$\tan \lambda_{th} = \frac{F_S}{F_G} = \frac{m \cdot a_Y}{m \cdot g} = \frac{a_Y}{g} \quad (4.4)$$

Nach Heißing et al. ist die (horizontierte) Querbeschleunigung a_Y wie folgt von (horizontierter) Gierrate $\dot{\psi}$, Schwimmgeschwindigkeit $\dot{\beta}$ und als konstant angenommener Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X abhängig¹²:

$$a_Y = v_X \cdot (\dot{\psi} - \dot{\beta}) \quad (4.5)$$

⁶Schröter et al. (2010): Bremslenkmomentoptimierte Motorrad-Kurvenbremsung, S. 396 ff.

⁷Seiniger (2009): Erkennung von Motorrad-Kurvenunfällen, S. 86 ff.

⁸Seiniger et al. (2006): Rollwinkelsensorik, S. 383

⁹Schlipsing et al. (2011): Videobasierte Rollwinkelschätzung, S. 876 ff.

¹⁰Es wird angenommen: $\nu \approx 0^\circ \rightarrow \lambda \approx \lambda_V$

¹¹Weidele (1994): Motorradbremsung, S. 39 ff.

¹²Heiing et al. (2011): Fahrwerkhandbuch, S. 96

Mit der Annahme einer vernachlässigbaren Schwimmgeschwindigkeit (siehe auch Abschnitt 5.1.1) folgt daraus:

$$a_Y = v_X \cdot \dot{\psi} \quad (4.6)$$

Einsetzen von Gleichung (4.6) in (4.4) und Transformation der (horizontierten) Gierrate $\dot{\psi}$ in die gemessene Gierrate $\dot{\psi}_V$ liefern:

$$\tan \lambda_{th} = \frac{v_X \cdot \dot{\psi}_V}{g \cdot \cos \lambda} \quad (4.7)$$

Der Rollwinkel ist somit vom Produkt der Messgrößen v_X und $\dot{\psi}_V$ abhängig. Wird dieses als „künstliche“ Messgröße $a_{\dot{\psi}_V} = v_X \cdot \dot{\psi}_V$ definiert, so folgt aus Gleichung (4.7):

$$a_{\dot{\psi}_V} = v_X \cdot \dot{\psi}_V = \tan \lambda_{th} \cdot \cos \lambda \cdot g \quad (4.8)$$

4.4.2 Kalman-Filter-Entwurf

Dieser Abschnitt erläutert die für ein Kalman-Filter erforderlichen Modelle von System und Messung. Grundlagen zur Theorie des Kalman-Filters werden im Anhang A.4.1 beschrieben.

Systemmodell

Zur Schätzung des Rollwinkels in einem Kalman-Filter ist ein Systemmodell zur Beschreibung der Rollbewegung erforderlich. Nach Bar-Shalom hat sich das so genannte *White Noise Acceleration Model*, oft als *Constant Velocity Model* bezeichnet und im Folgenden mit CV-Modell abgekürzt, in vielen Anwendungen als Systemmodell eines Kalman-Filters bewährt¹³. Bei der Modellbildung wird dabei angenommen, dass sich ein Objekt, in diesem Fall das Motorrad, mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Um Geschwindigkeitsänderungen abzubilden, wird die Beschleunigung als weißes Rauschen modelliert. In allgemeinerer Form wird jede Bewegungsrichtung durch einen Zustand und dessen erster zeitlicher Ableitung beschrieben. Die zweite Ableitung wird als Rauschen modelliert. Bei Berücksichtigung von Gleichung (4.3) im Systemmodell ergeben sich demnach für die Rollbewegung die Zustände Rollwinkel λ und Rollrate $\dot{\lambda}$ ¹⁴.

Die „künstliche“ Messgröße $a_{\dot{\psi}_V}$ erfordert neben der Messung der Gierrate $\dot{\psi}_V$ die der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X . Da in automobilen Anwendungen außerdem oft die Längsbeschleunigung $a_{X,V}$ gemessen wird, bietet sich eine Erweiterung des Systemmodells um eine Beschreibung der Translation in Längsrichtung an. Damit ist eine genauere Bestimmung der Längsgeschwindigkeit v_X und somit nach Gleichung (4.8) auch der Messgröße $a_{\dot{\psi}_V}$ möglich. Unter Verwendung eines CV-Modells¹⁵ ergibt sich für die beiden

¹³Bar-Shalom et al. (2001): Estimation for Tracking and Navigation, S. 269 ff.

¹⁴Das Systemmodell wird im horizontierten Koordinatensystem beschrieben. Außerdem wird von nickfreier Fahrt ausgegangen, d. h. $\nu = 0^\circ \rightarrow \lambda = \lambda_V, \dot{\lambda} = \dot{\lambda}_V$

¹⁵Auch bei der Modellierung der Translation in Längsrichtung wird nickfreie Fahrt angenommen. Daraus folgt: $a_X = a_{X,V}$

genannten Bewegungen des Motorrades¹⁶ folgender Zustandsvektor $\mathbf{x}$:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} v_X \\ a_X \\ \lambda \\ \dot{\lambda} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Wie im Anhang A.4.1 dargestellt, wird das (diskrete) Systemmodell durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\mathbf{x}(k) = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{w}(k-1) \quad (4.10)$$

Daraus ergibt sich für das CV-Modell nach Bar-Shalom¹⁷ folgende (diskrete) Systemmatrix $\hat{\mathbf{A}}$ (in Abhängigkeit der Abtastzeit T_0):

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} 1 & T_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Die für die Implementierung des Kalman-Filters erforderliche Varianz-Kovarianzmatrix des Systemrauschens $\mathbf{Q}$ (siehe auch Anhang A.4.1) wird basierend auf den Angaben der genannten Quelle bestimmt.

Messmodell

Ausgangspunkt für die Messmodellbildung sind die Messgrößen Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X , Fahrzeuglängsbeschleunigung $a_{X,V}$ und Rollrate $\dot{\lambda}_V$ sowie die aus den Messgrößen Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X und Gierrate $\dot{\psi}_V$ abgeleitete Größe $a_{\dot{\psi}_V}$. Dies liefert folgenden Messvektor $\mathbf{y}$:

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} v_X \\ a_{X,V} \\ \dot{\lambda}_V \\ a_{\dot{\psi}_V} \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Mit Gleichung (4.8), der Annahme nickfreier Fahrt und einem physikalisch wirksamen Rollwinkel¹⁸ von $\lambda_{th} \approx 0,9\lambda$ ergibt sich folgendes (nichtlineares) Messmodell:

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} v_X \\ a_X \\ \dot{\lambda} \\ \tan 0,9\lambda \cdot \cos \lambda \cdot g \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

Eine Linearisierung (und Diskretisierung) von Gleichung (4.13) führt zu einem Messmodell folgender Form (siehe auch Anhang A.4.1):

$$\mathbf{y}(k) = \hat{\mathbf{C}}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (4.14)$$

¹⁶Translation in Längsrichtung und Rotation um die Längsachse

¹⁷Bar-Shalom et al. (2001): Estimation for Tracking and Navigation, S. 269 ff.

¹⁸Da die Reifen nicht unendlich dünn sind, ist der physikalisch wirksame Rollwinkel kleiner als der Gesamtrollwinkel (siehe auch Weidele (1994): Motorradbremsung, S. 42).

Aus Gleichung (4.13) ergibt sich durch Linearisierung folgende diskrete Messmatrix $\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{k}}$ (Jacobi-Matrix):

$$\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{k}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{k}43} & 0 \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{k}43} = \frac{0,9g \cdot \cos \lambda_{\mathbf{k}}}{\cos^2 0,9\lambda_{\mathbf{k}}} - g \cdot \tan 0,9\lambda_{\mathbf{k}} \cdot \sin \lambda_{\mathbf{k}} \quad (4.16)$$

Für die Bestimmung der Varianz-Kovarianzmatrix des Messrauschens $\mathbf{R}$ (siehe auch Anhang A.4.1) wird angenommen, dass alle Kovarianzen vernachlässigbar sind. Die Varianzen werden aus den Sensordatenblättern entnommen. Falls dies nicht möglich ist, werden die Varianzen experimentell bestimmt.

4.4.3 Schätzgenauigkeit

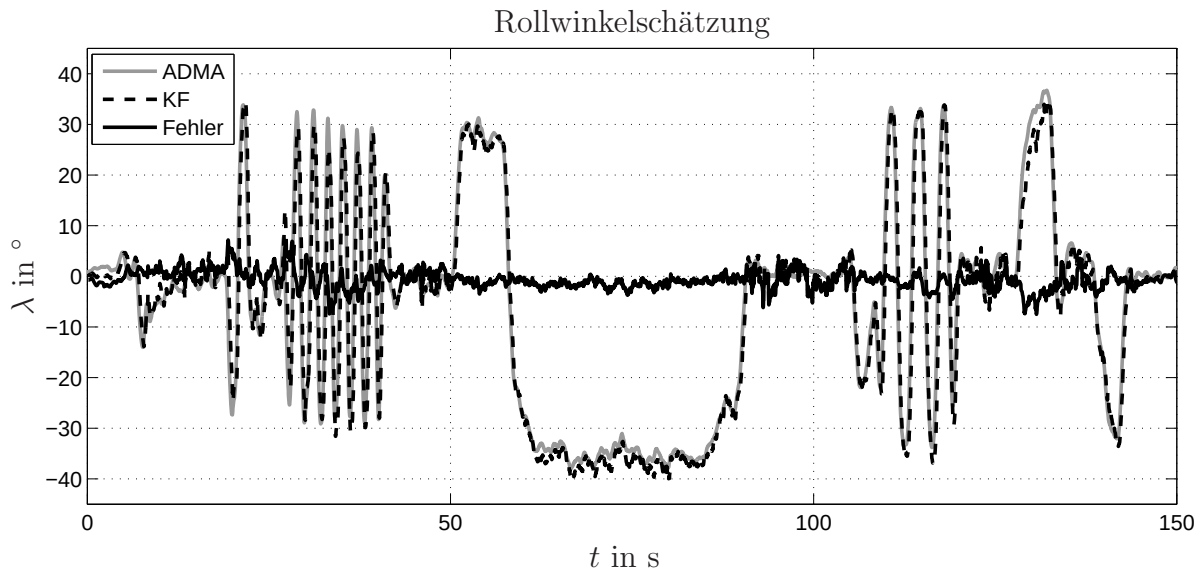


Abbildung 4.3: Verlauf des geschätzten Rollwinkels (KF), bereinigt um die Phasenlaufzeit τ_P , im Vergleich zum Verlauf des Referenzsignals (ADMA) sowie Differenz der beiden Signale (Fehler) für eine Kombination verschiedener Fahrmanöver (Ausweichen, Slalom, Kurvenfahrten, stationäre Kreisfahrt, Vollverzögerung)

Für eine Kombination verschiedener Fahrmanöver¹⁹ (Ausweichen, Slalom, Kurvenfahrten, stationäre Kreisfahrt, Vollverzögerung) zeigt Abbildung 4.3 den Verlauf des geschätzten Rollwinkels (KF) im Vergleich zum Verlauf des Referenzsignals²⁰ (ADMA) sowie die Differenz der beiden Signale, d. h. den Schätzfehler. Dieser und weitere Validierungsversuche ergeben für die Schätzgenauigkeit (*root-mean-square error*):

$$RMSE = 1,93^\circ \quad (4.17)$$

¹⁹Die Manöver wurden mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Versuchsmotorrad gefahren. Die Messdatenaufzeichnung erfolgte mit den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Sensoren.

²⁰Für eine Beschreibung des Referenzsensors siehe Abschnitt 4.2.

Die maximal aufgetretene Abweichung der Schätzung zur Referenz beträgt $\Delta\lambda_{\max} = 7,2^\circ$. Ein Absolutfehler von $\Delta\lambda = 4,0^\circ$ wird für höchstens 1,0 s überschritten. Die ermittelte (durchschnittliche) Phasenlaufzeit ist $\tau_P = 130$ ms.

5 Fahrdynamik in Gefahrstellen

Als Ergebnis der in Kapitel 3 dargestellten Untersuchungen werden für die Auslegung eines kbWs relevante Gefahrstellen identifiziert. Dieses Kapitel behandelt Untersuchungen zur Fahrdynamik in den daraus resultierenden Fahrsituationen. Ziel ist das Ableiten von Methoden und/oder Kriterien, die einen Rückschluss auf die in Abschnitt 3.3 genannten Gefahrstellen ermöglichen. Die Untersuchungen beinhalten daher die folgenden Fahrsituationen:

Gefahrstelle	Untersuchte Fahrsituationen
Kurve	Kritische Kurvenfahrsituationen (siehe Abschnitt 5.1.1)
Reibwertsprung	Kritische Kurvenfahrsituationen (siehe Abschnitt 5.1.1)
Reibwertsprung	Reibwertsprünge bei Geradeausfahrt (siehe Abschnitt 5.1.2)
Fahrbahnschaden	Fahrten auf unebener Fahrbahn (siehe Abschnitt 5.2)
Fahrbahnschaden	Fahrten über einzelne Fahrbahnschäden (siehe Abschnitt 5.3)
Hindernis	Ausweichmanöver (siehe Abschnitt 5.4)

5.1 Gefahrstellenerkennung - Stand der Technik

5.1.1 Kritische Kurvenfahrsituationen

Ursachen kritischer Kurvenfahrsituationen

Nach Seiniger hat sich die Schwimmwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}$ als Kriterium zur Erkennung kritischer Fahrsituationen, die bei ungebremsen Kurvenunfällen auftreten, bewährt¹. Diese lassen sich hinsichtlich ihrer Ursache wie folgt aufteilen:

- **Reibwertsprung:** Während einer Kurvenfahrt kommt es zu einer Reibwertänderung von hoch zu niedrig. Der maximale Querreibwert reicht „plötzlich“ nicht mehr aus, um die erforderlichen Seitenkräfte zu übertragen. Ursache sind hier veränderte Umgebungsbedingungen.
- **Überschreiten der maximal übertragbaren Querbeschleunigung** („überhöhte“ Kurvengeschwindigkeit): Durch Erhöhen des Rollwinkels und/oder Verringerung des Kurvenradius wird die Querbeschleunigung erhöht, bis die Kraftschlussgrenze erreicht ist. Diese kritischen Fahrsituationen gehen ursächlich vom Fahrer aus.

Erkennung kritischer Kurvenfahrsituationen

Da bei Motorrädern Seitenkräfte in der Regel durch Sturz (der Reifen) aufgebracht werden und somit Schräglaufwinkeländerungen vernachlässigbar sind², nimmt Seiniger

¹Seiniger et al. (2009): Erkennung kritischer Fahrsituationen, S. 104 ff.

²Bayer (1986): Pendeln und Flattern von Krafträdern, S. 88

an, dass in unkritischen Fahrsituationen die (Gesamt-) Schwimmwinkelgeschwindigkeit näherungsweise gleich der geometrisch bedingten Schwimmwinkelgeschwindigkeit ist³. Daraus leitet er in Abhängigkeit der geometrischen Größen Nachlauf r , Radstand l und Abstand von Schwerpunkt zu hinterem Radaufstandspunkt l_h sowie der effektiven Lenkrate $\dot{\delta}$ folgende Soll-Schwimmwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}_{\text{soll}}$ ab:

$$\dot{\beta}_{\text{soll}} = -\dot{\delta} \cdot \frac{l_h + r}{l} \quad (5.1)$$

Der in der Radebene wirkende effektive Lenkwinkel δ ist neben dem vom Fahrer eingestellten Lenkerwinkel δ_H vom (Gesamt-) Rollwinkel λ und dem Lenkkopfwinkel τ abhängig. Nach Cossalter gilt⁴:

$$\tan \delta = \frac{\cos \tau}{\cos \lambda} \cdot \tan \delta_H \quad (5.2)$$

$$\delta \approx \frac{\cos \tau}{\cos \lambda} \cdot \delta_H \quad (5.3)$$

Daraus leitet sich folgender Zusammenhang zwischen der effektiven Lenkwinkelrate $\dot{\delta}$ und der Lenkerwinkelrate $\dot{\delta}_H$, d. h. der zeitlichen Ableitung des gemessenen Lenkerwinkels δ_H , ab:

$$\dot{\delta} \approx \frac{\cos \tau}{\cos \lambda} \cdot \dot{\delta}_H \quad (5.4)$$

Einsetzen von Gleichung (5.4) in Gleichung (5.1) liefert folgenden Zusammenhang zur Bestimmung der **Soll-Schwimmwinkelgeschwindigkeit** $\dot{\beta}_{\text{soll}}$ aus Messgrößen:

$$\dot{\beta}_{\text{soll}} = -\frac{\cos \tau}{\cos \lambda} \cdot \frac{l_h + r}{l} \cdot \dot{\delta}_H \quad (5.5)$$

Ist der Einfluss der Reifen auf die Schwimmbewegung durch Schräglaufwinkeländerungen nicht mehr vernachlässigbar, so ist Gleichung (5.5) zur Beschreibung der Schwimmwinkelgeschwindigkeit nicht mehr gültig. In kritischen und unkritischen Situationen ist die (Ist-) Schwimmwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}_{\text{ist}}$ in Abhängigkeit der horizontierten Gierrate $\dot{\psi}$, der horizontierten Querbeseleunigung in der Projektion des Schwerpunktes auf die Rollachse (Punkt P) $a_{Y,P}$ und der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X wie folgt definiert (siehe auch Abschnitt 4.4.1):

$$\dot{\beta}_{\text{ist}} = \dot{\psi} - \frac{a_{Y,P}}{v_X} \quad (5.6)$$

Eine Bestimmung der Schwimmgeschwindigkeit $\dot{\beta}_{\text{ist}}$ nach Gleichung (5.6) setzt eine Kenntnis der (nicht direkt gemessenen) Größen Gierrate $\dot{\psi}$ und $a_{Y,P}$ voraus. Dies erfordert eine Transformation der gemessenen Größen (Index V) in das horizontierte Koordinatensystem. Unter der Annahme vernachlässigbarer Nickwinkel⁵ ergeben sich nach Gleichung (4.1) folgende Zusammenhänge zur Bestimmung der horizontierten Gierrate $\dot{\psi}$ und der horizontierten Querbeseleunigung am Ort des Sensors (Punkt S) $a_{Y,S}$:

$$\dot{\psi} = \dot{\psi}_V \cdot \cos \lambda + \dot{\nu}_V \cdot \sin \lambda \quad (5.7)$$

$$a_{Y,S} = a_{Y,V,S} \cdot \cos \lambda - a_{Z,V,S} \cdot \sin \lambda \quad (5.8)$$

³Seiniger (2009): Erkennung von Motorrad-Kurvenunfällen, S. 96

⁴Cossalter (2006): Motorcycle Dynamics, S. 31

⁵Es werden ungebremste Kurvenfahrten betrachtet.

Die horizontierte Querbeschleunigung $a_{Y,P}$ (im Punkt P) folgt nach Gleichung (4.2) aus der horizontierten Querbeschleunigung am Ort des Sensors (Punkt S) $a_{Y,S}$. Daher gilt:

$$a_{Y,P} = a_{Y,S} + \ddot{\psi} \cdot \Delta x - \ddot{\lambda} \cdot \Delta z + \dot{\nu} \cdot \dot{\psi} \cdot \Delta z - \dot{\psi}^2 \cdot \Delta y - \dot{\lambda}^2 \cdot \Delta y + \dot{\lambda} \cdot \dot{\nu} \cdot \Delta x \quad (5.9)$$

Einsetzen der Gleichungen (5.7) bis (5.9) in Gleichung (5.6) liefert folgenden Zusammenhang zur Bestimmung der **Ist-Schwimmwinkelgeschwindigkeit** $\dot{\beta}_{\text{ist}}$ aus Messgrößen:

$$\dot{\beta}_{\text{ist}} = \dot{\psi}_V \cdot \cos \lambda + \dot{\nu}_V \cdot \sin \lambda - \frac{a_{Y,V,S} \cdot \cos \lambda - a_{Z,V,S} \cdot \sin \lambda}{v_X} + \frac{f(\dot{\lambda}_V, \dot{\nu}_V, \dot{\psi}_V)}{v_X} \quad (5.10)$$

Um Messunsicherheiten zu berücksichtigen, definiert Seiniger einen von diesen abhängigen Schwellwert $\Delta \dot{\beta}_{\text{grenz}}$. Ist die Differenz von Soll-Schwimmwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}_{\text{soll}}$ und Ist-Schwimmwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}_{\text{ist}}$ größer als dieser Schwellwert, so wird die Fahrsituation als kritisch bewertet⁶. Demnach lautet das von Seiniger validierte **Kriterium zur Erkennung kritischer Kurvenfahrsituationen**:

$$\left| \dot{\beta}_{\text{soll}} - \dot{\beta}_{\text{ist}} \right| > \Delta \dot{\beta}_{\text{grenz}} \rightarrow \text{Kritische Fahrsituation} \quad (5.11)$$

Abbildung 5.1 zeigt die Verläufe von Soll-Schwimmwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}_{\text{soll}}$ und Ist-Schwimmwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}_{\text{ist}}$ für eine typische kritische Fahrsituation des Typs „Reibwertsprung“, aufgenommen mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Versuchsmotorrad.

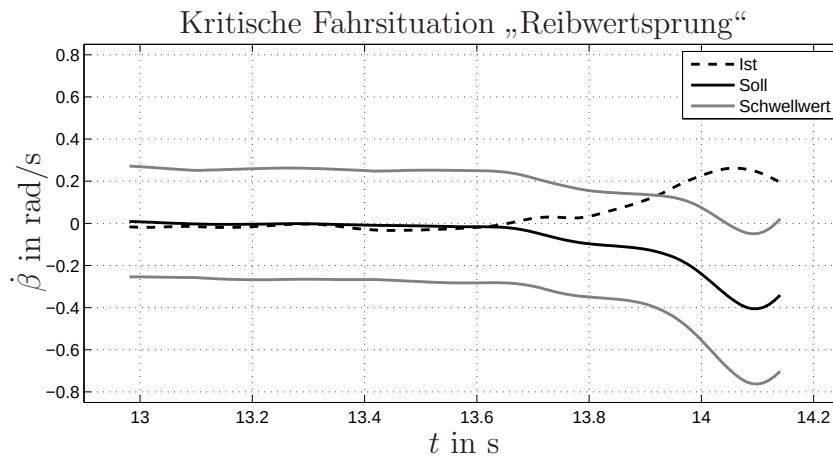


Abbildung 5.1: Verlauf der Schwimmwinkelgeschwindigkeit für eine kritische Fahrsituation des Typs „Reibwertsprung“ (von $\mu_{\text{max}} \approx 1,0$ auf $\mu_{\text{max}} \approx 0,3$, $v_X \approx 8,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, Beginn: $t = 13,68 \text{ s}$, Erkennung: $t = 13,93 \text{ s}$, aufgenommen mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Versuchsmotorrad)

⁶Seiniger (2009): Erkennung von Motorrad-Kurvenunfällen, S. 99 ff.

Reibwertbestimmung in kritischen Kurvenfahrsituationen

Der Seitenkraftbeiwert $\mu_{Y,W}$ ist nach DIN70000⁷ als Verhältnis der auf das Rad wirkenden Seitenkraft $F_{Y,W}$ und der auf das Rad wirkenden Radlast $F_{Z,W}$ definiert. Demnach gilt:

$$\mu_{Y,W} = \frac{F_{Y,W}}{F_{Z,W}} \quad (5.12)$$

Bei den untersuchten kritischen Kurvenfahrsituationen ist der Anteil der Umfangskraft $F_{X,W}$ an der auf das Rad wirkenden resultierenden Kraft gering⁸. Demnach ist auch der Anteil des Umfangskraftbeiwertes $\mu_{X,W}$ am (Gesamt-) Kraftbeiwert μ , nachfolgend als Reibwert bezeichnet, gering. Für die untersuchten Fahrsituationen wird daher näherungsweise angenommen:

$$\mu \approx \mu_{Y,W} = \frac{F_{Y,W}}{F_{Z,W}} = \frac{a_Y}{g} \quad (5.13)$$

Nach Seiniger kann die Querschleunigung a_Y in Abhängigkeit vom Rollwinkel λ , der Rollbeschleunigung $\ddot{\lambda}$, der Fahrzeugmasse m , der Erdbeschleunigung g , der Schwerpunkthöhe h_s (im fahrzeugfesten Koordinatensystem) und dem Rollträgheitsmoment um die Aufstandslinie Θ_A wie folgt über das Rollgleichgewicht (im horizontalisierten Koordinatensystem) bestimmt werden⁹:

$$\Theta_A \cdot \ddot{\lambda} = \sin \lambda \cdot h_s \cdot m \cdot g - \cos \lambda \cdot h_s \cdot m \cdot a_Y \quad (5.14)$$

$$a_Y = \tan \lambda \cdot g - \frac{\Theta_A \cdot \ddot{\lambda}}{\cos \lambda \cdot h_s \cdot m} \quad (5.15)$$

Einsetzen von Gleichung (5.15) in Gleichung (5.13) liefert folgenden Zusammenhang zur Bestimmung des erforderlichen Reibwertes μ :

$$\mu = \tan \lambda - \frac{\Theta_A \cdot \ddot{\lambda}}{\cos \lambda \cdot h_s \cdot m \cdot g} \quad (5.16)$$

Da in den genannten kritischen Fahrsituationen der erforderliche Reibwert μ den maximalen Kraftbeiwert $\mu_{\max}$, nachfolgend als maximaler Reibwert bezeichnet, überschreitet, ermöglicht Gleichung (5.16) eine Abschätzung des maximalen Reibwertes $\mu_{\max}$.

5.1.2 Reibwertsprünge bei Geradeausfahrt

Dieser Abschnitt führt nachfolgend in die Grundlagen des Reibwertes ein, fasst Methoden der Reibwertbestimmung zusammen und gibt ein Beispiel zur Reibwertbestimmung bei Geradeausfahrt.

⁷DIN 70000 (1994): Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten

⁸Es werden ungebremste und unbeschleunigte Kurvenfahrsituationen betrachtet.

⁹Seiniger (2009): Erkennung von Motorrad-Kurvenunfällen, S. 91

Grundlagen

Der Umfangskraftbeiwert $\mu_{X,W}$ ist nach DIN70000 als Verhältnis der auf das Rad wirkenden Umfangskraft $F_{X,W}$ und der auf das Rad wirkenden Radlast $F_{Z,W}$ definiert¹⁰. Demnach gilt:

$$\mu_{X,W} = \frac{F_{X,W}}{F_{Z,W}} \quad (5.17)$$

Wird angenommen, dass bei Geradeausfahrt der Anteil der Seitenkraft $F_{Y,W}$ an der auf das Rad wirkenden resultierenden Kraft gering ist, dann ist auch der Anteil des Seitenkraftbeiwertes $\mu_{Y,W}$ am (Gesamt-) Reibwert μ gering. Für Geradeausfahrten folgt daraus:

$$\mu \approx \mu_{X,W} = \frac{F_{X,W}}{F_{Z,W}} \quad (5.18)$$

Der Reibwert ist nicht konstant und wird von vielen Faktoren (wie z. B. Geschwindigkeit, Reifeneigenschaften, Fahrbahneigenschaften) beeinflusst¹¹. Neben dem (aktuell in der Kontaktzone genutzten) Reibwert μ ist der maximale Reibwert $\mu_{\max}$ von besonderer Bedeutung, da dieser den minimal möglichen Bremsweg bestimmt. Der maximale Reibwert $\mu_{\max}$ ist unter Berücksichtigung der bereits genannten Annahmen für Geradeausfahrt der Maximalbetrag des Verhältnisses von Umfangskraft $F_{X,W}$ zu Radlast $F_{Z,W}$ und wird demnach wie folgt bestimmt:

$$\mu_{\max} = \mu_{X,W,\max} = \left| \frac{F_{X,W}}{F_{Z,W}} \right|_{\max} \quad (5.19)$$

Methoden zur Reibwertbestimmung

Eichhorn¹², Bachmann¹³, Müller¹⁴ und Weber¹⁵ beschreiben Verfahren zur Bestimmung des Reibwertes. Dieser Abschnitt fasst die wesentlichen, für die Realisierung eines kbWs relevanten Punkte zusammen.

Eichhorn unterteilt die im Fahrzeug integrierbaren Methoden zur Bestimmung des Reibwertes in effektbasierte und parameterbasierte Verfahren. **Parameterbasierte Verfahren** ermitteln die Werte der Parameter, die eine Änderung der Reibverhältnisse bewirken. Demnach werden die Prozesseingangsgrößen gemessen. Basierend auf diesen wird anhand von Erfahrungswerten oder unter Verwendung von Reibungsmodellen der Reibwert berechnet. Müller unterteilt die parameterbasierten¹⁶ Verfahren in solche, welche die Fahrbahnrauigkeit bestimmen, und solche, welche die Beschaffenheit des Zwischenmediums (zwischen Reifen und Fahrbahn) ermitteln.

Vorteile der parameterbasierten Verfahren sind hohe erreichbare Genauigkeiten und die Möglichkeit der Bestimmung des maximalen Reibwertes $\mu_{\max}$, auch wenn der (aktuelle) Reibwert μ deutlich niedriger ist. Demgegenüber stehen folgende Nachteile: In der Regel

¹⁰DIN 70000 (1994): Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten

¹¹Eichhorn (1994): Reibwert - Erkennung und Einflussgrößen, S. 14

¹²Eichhorn (1994): Reibwert - Erkennung und Einflussgrößen, S. 16 ff.

¹³Bachmann (1996): Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn, S. 148 ff.

¹⁴Müller et al. (2003): Reibwertschätzung, S. 607 ff.

¹⁵Weber (2005): Verbesserungspotenzial durch Reibwertsensorik, S. 27 ff.

¹⁶in der genannten Quelle als ursachenbasiert bezeichnet

sind zusätzliche, meist optische Sensoren erforderlich. Außerdem ist ein möglichst umfassendes Wissen über die Fahrbahn- und Reifeneigenschaften sowie deren Wechselwirkungen erforderlich.

Effektbasierte Verfahren beruhen auf der Erfassung der Effekte unterschiedlicher Reibungsverhältnisse, d. h. der Erfassung der Prozessausgangsgrößen. Diese Effekte sind beispielsweise übertragene Kräfte und Momente, Spannungen und Dehnungen im Reifen oder auch (akustische) Schwingungen. Verfahren, die letztgenannten Effekt ausnutzen, sind meist sehr komplex und störanfällig. Verfahren mit Sensoren im Reifen, u. a. zum Messen von Dehnungen, erreichen hohe Genauigkeiten, sind aber mit einem hohen Implementierungsaufwand verbunden.

Aufgrund der genannten Nachteile (Aufwand, Kosten, Störanfälligkeit) konzentrieren sich automobiler Anwendungen auf effektbasierte Verfahren, bei denen die übertragenen Kräfte und Momente bzw. die davon abhängigen Größen Schlupf und Beschleunigung bestimmt werden. Müller unterscheidet diese Verfahren nach der Art des für die Bestimmung erforderlichen Manövers. Diese sind Brems-, Beschleunigungs- und Lenkmanöver. Vorteil aller dieser Verfahren ist, dass nur meist schon serienmäßig vorhandene Sensoren (z. B. Raddrehzahl- und Beschleunigungssensoren) erforderlich sind. Demgegenüber stehen Nachteile, wie eine hohe erforderliche Kraftschlussausnutzung und Einschränkungen hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit.

Beispiel zur Reibwertbestimmung

Dieser Abschnitt beschreibt ein Beispiel für ein effektbasiertes Verfahren zur Bestimmung des maximalen Reibwertes $\mu_{\max}$, das zur Erkennung von Reibwertsprüngen oder Niedrigreißwert bei Geradeausfahrt in einem kbW eingesetzt werden kann. Das Verfahren basiert auf folgenden Signalen:

- Signal eines Sensors zur Messung der Fahrzeuglängsbeschleunigung $a_{x,v}$
- Signal, das die Aktivität des ABVs anzeigt (ABV-Signal), abgeleitet aus der Messung der Radrehzahlen $n_{w,v}$, $n_{w,h}$

Die dynamische Radlastverschiebung führt beim Bremsen dazu, dass die Gesamtradlast vorne zu- und hinten abnimmt. Mit der Annahme kleiner Nickwinkel ($a_{x,v} \approx a_x$) und unveränderter Lage des Schwerpunktes ($l_h = \text{konst.}$, $l_v = \text{konst.}$) gelten folgende von der Fahrzeuglängsverzögerung $-a_{x,v}$ abhängige Zusammenhänge zur Bestimmung der Radlast vorne ($F_{Z,w1}$) und hinten ($F_{Z,w2}$)¹⁷:

$$F_{Z,w1} = m \left(g \cdot \frac{l_h}{l} - a_{x,v} \cdot \frac{h_s}{l} \right) \quad (5.20)$$

$$F_{Z,w2} = m \left(g \cdot \frac{l_v}{l} + a_{x,v} \cdot \frac{h_s}{l} \right) \quad (5.21)$$

Neben der Fahrzeuglängsbeschleunigung $a_{x,v}$ sind die Radlasten demnach abhängig von den Konstanten Fahrzeugmasse m , Erdbeschleunigung g , Radstand l , Schwerpunkthöhe h_s und Abstand von Schwerpunkt zu hinterem Radaufstandspunkt l_h .

¹⁷Weidele (1994): Motorradbremsung, S. 37

Für die Summe von vorderer Umfangskraft $F_{X,W1}$ und hinterer Umfangskraft $F_{X,W2}$ folgt aus dem Kräftegleichgewicht in Längsrichtung:

$$m \cdot a_{X,V} = F_{X,W1} + F_{X,W2} \quad (5.22)$$

Zusammenführen der Gleichungen (5.18) und (5.22) liefert folgende Zusammenhänge zur Beschreibung der Reibwerte vorne (μ_1) und hinten (μ_2):

$$\mu_1 = \frac{m \cdot a_{X,V} - F_{X,W2}}{F_{Z,W1}} \quad (5.23)$$

$$\mu_2 = \frac{m \cdot a_{X,V} - F_{X,W1}}{F_{Z,W2}} \quad (5.24)$$

Einsetzen von Gleichung (5.20) in (5.23) bzw. von (5.21) in (5.24) ergibt:

$$\mu_1 = \frac{a_{X,V} - \frac{F_{X,W2}}{m}}{g \cdot \frac{l_h}{l} - a_{X,V} \cdot \frac{h_s}{l}} \quad (5.25)$$

$$\mu_2 = \frac{a_{X,V} - \frac{F_{X,W1}}{m}}{g \cdot \frac{l_v}{l} + a_{X,V} \cdot \frac{h_s}{l}} \quad (5.26)$$

Das Erreichen der Kraftschlussgrenze während eines Bremsvorganges, d. h. die drohende Blockade eines Rades, führt bei entsprechend ausgestatteten Motorrädern zu einer ABV-Regelung. Moderne ABV regeln den Schlupf so, dass der Betrag des Reibwertes $|\mu|$ durchschnittlich 10% vom maximalen Reibwert $\mu_{\max}$ abweicht¹⁸. Vereinfachend wird demnach für die folgenden Betrachtungen bei Vorliegen einer ABV-Regelung angenommen:

$$ABV - \text{Regelung} \rightarrow \mu_{\max} = |\mu| \quad (5.27)$$

Aus den Gleichungen (5.25) und (5.27) ergibt sich folgender Zusammenhang zur Berechnung des maximalen Reibwertes $\mu_{\max}$ im Falle einer **ABV-Bremsung** bei alleiniger Betätigung der **Vorderradbremse** ($F_{X,W2} = 0$):

$$\mu_{\max} = |\mu| = \left| \frac{a_{X,V}}{g \cdot \frac{l_h}{l} - a_{X,V} \cdot \frac{h_s}{l}} \right| \quad (5.28)$$

Zusammenführen der Gleichungen (5.25) bis (5.27) unter der Annahme gleicher Reibwerte an Vorder- und Hinterrad ($\mu_1 = \mu_2$) liefert folgenden Zusammenhang zur Berechnung des maximalen Reibwertes $\mu_{\max}$ im Falle der **Bremsung beider Räder** und gleichzeitiger **ABV-Regelung**:

$$\mu_{\max} = |\mu| = \left| \frac{a_{X,V}}{g} \right| \quad (5.29)$$

Abbildung 5.2 zeigt für zwei Vorderradbremungen¹⁹ den nach Gleichung (5.28) ermittelten Verlauf des Reibwertbetrages $|\mu|$. Nach Gleichung (5.27) entspricht dieser während einer ABV-Regelung (näherungsweise) dem maximalen Reibwert $\mu_{\max}$.

¹⁸Reul (2011): Bremswegverkürzungspotential, S. 63

¹⁹Die beiden Vorderradbremungen wurden mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Versuchsmotorrad durchgeführt.

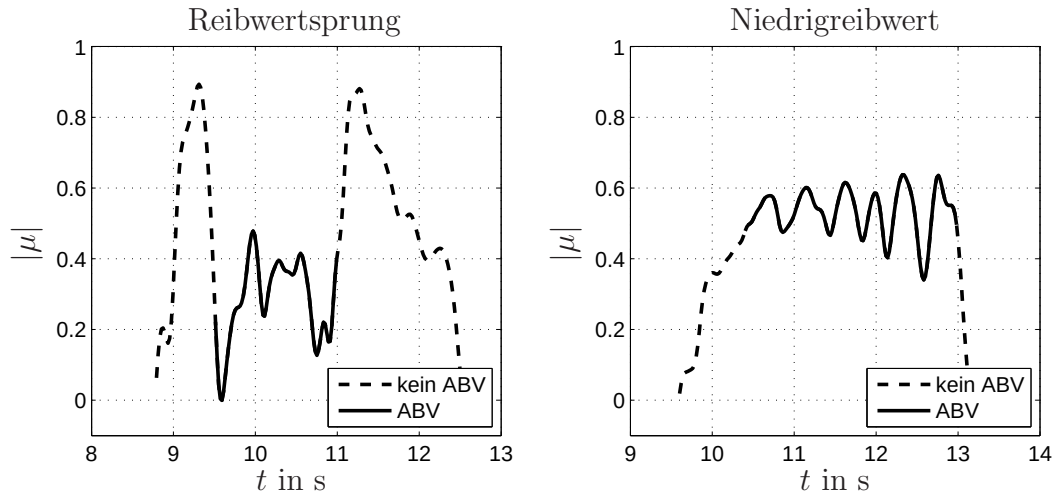


Abbildung 5.2: Nach Gleichung (5.28) ermittelte Reibwertbeträge für eine Vorderradbrem-
 sung auf einem Reibwertsprung hoch-niedrig-hoch ($\mu_{\text{hoch}} \approx 1,2$, $\mu_{\text{niedrig1}} \approx 0,3$) und auf
 Niedrigreibwert ($\mu_{\text{niedrig2}} \approx 0,6$), jeweils aus $v_X = 30 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 8,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Für die Vorderradbremung auf dem genannten Reibwertsprung ergibt sich während der ABV-Regelung ein durchschnittlicher Reibwert von $\mu_{\text{max}} = 0,28$. Für die Vorderradbremung auf Niedrigreibwert wird ein durchschnittlicher Wert von $\mu_{\text{max}} = 0,53$ ermittelt. Beide Werte liegen im Bereich der als Referenz ermittelten Haftreibbeiwerte²⁰ von $\mu_{\text{niedrig1}} \approx 0,3$ bzw. $\mu_{\text{niedrig2}} \approx 0,6$. Die vorgestellte Methode ermöglicht somit bei den beiden dargestellten Bremsungen eine Erkennung eines Fahrbahnabschnittes mit Niedrigreibwert. Dies kann Auslöser für eine Warnmeldung in einem kbW sein.

5.2 Unebene Fahrbahn

Die Ergebnisse aus Abschnitt 3.1.2 zeigen, dass folgende Fahrbahnschäden Einfluss auf das Unfallgeschehen von Motorrädern haben:

- Bodenwellen
- Schlaglöcher
- Querrinnen
- unebener Fahrbahnbelag

Abschnitt 5.3 behandelt daher die drei erstgenannten (Einzel-) Schäden. Im diesem Abschnitt wird die Unebenheit von Fahrbahnen näher untersucht.

²⁰Die Vorrichtung zur Ermittlung der Referenzwerte besteht aus einem wie am Versuchsmotorrad montierten Reifen (inkl. Zusatzgewicht) und einem Zugkraftsensor. Diese Vorrichtung wird über die untersuchten Fahrbahnoberflächen gezogen, indem über den Sensor eine Zugkraft parallel zur Fahrbahnoberfläche auf den Reifen eingeleitet wird. Die eingeleitete Kraft zu dem Zeitpunkt, zu dem sich der Reifen in Bewegung setzt, wird als Haftreibungskraft angenommen. Das Verhältnis dieser zur Normalkraft entspricht dem Haftreibbeiwert.

5.2.1 Bewertung der Fahrbahnlängsunebenheit

Ueckermann unterteilt die Ansätze zur Charakterisierung und Bewertung der Längsunebenheit in rechnerische und gerätespezifische Indizes²¹. Bei den gerätespezifischen Indizes kommen die „Fahrbahn berührende“ Hilfsmittel zur Bewertung der Unebenheit zum Einsatz, z. B. 3-m-Latte oder Planograph. Diese Indizes werden daher hier nicht näher behandelt. Braun et al. liefern dazu weitere Informationen²².

Rechnerische Indizes basieren auf einer berührungslosen Messung des Höhenlängsprofils oder dessen Auswirkungen. Nach erstgenannter Quelle lassen sich diese Indizes wie folgt einteilen:

- **Geometrische Auswertung im Wegbereich:** Bei diesen Indizes wird das Höhenlängsprofil im Wegbereich bewertet. Beispiele hierfür sind die Bestimmung von Standard- oder Maximalabweichungen des Höhenlängsprofils auf definierten Fahrbahnabschnitten (z. B. Abschnitte mit einer Länge von 100 m).
- **Geometrische Auswertung im Frequenzbereich:** Diese Indizes basieren auf der Auswertung der spektralen Leistungsdichte des Höhenlängsprofils. Ein Beispiel dafür ist der Allgemeine Unebenheitsindex (siehe auch Abschnitt 5.2.3). Dieser wird für die Zustandserfassung und -bewertung von Fahrbahnen in Deutschland verwendet.
- **Auswertung der Auswirkungen:** Hier wird die Wirkung der Längsunebenheit auf den Fahrkomfort sowie die Fahrzeug- und Fahrbahnbeanspruchung bewertet. Diese Indizes sind somit nicht nur vom Höhenlängsprofil, sondern auch von der Fahrgeschwindigkeit und den Systemeigenschaften abhängig.

Alle beschriebenen rechnerischen Indizes basieren auf dem Höhenlängsprofil der Fahrbahn. Nachfolgender Abschnitt geht daher näher darauf ein.

5.2.2 Höhenlängsprofile von Fahrbahnen

Beschreibung des Höhenlängsprofils einer Fahrbahn

Abbildung 5.3 zeigt beispielhaft für drei verschiedene Fahrbahnen²³ den (simulierten) Verlauf des Höhenlängsprofils $h(x)$ in Abhängigkeit der Weglänge x . Bei der Beschreibung der Verläufe von Fahrbahnanregungen wird angenommen, dass diese regellos sind²⁴.

Bewertung des Höhenlängsprofils als Maß für die Unebenheit einer Fahrbahn

Aufgrund der Annahme regelloser Anregungen wird das Höhenlängsprofil mit statistischen Größen bewertet. Ueckermann et al. nennen die Standardabweichung und die spektrale Leistungsdichte des Höhenlängsprofils als Maß für die Unebenheit einer Fahrbahn. Die

²¹Ueckermann (2005): Das Bewertete Längsprofil, S. 19

²²Braun et al. (1991): Sammlung und Auswertung von Straßenunebenheitsdaten - Teil 1, S. 25 ff., S. 76 ff.

²³Die Verläufe basieren auf folgenden Annahmen: Neubaustraße: Allgemeiner Unebenheitsindex $AUN \approx 1 \text{ cm}^3$, Landstraße: $AUN \approx 6 \text{ cm}^3$, „schlechte“ Landstraße: $AUN \approx 25 \text{ cm}^3$; für alle Fahrbahnen: Welligkeit $\check{w} = 2$. Für eine Beschreibung von AUN -Wert und Welligkeit $\check{w}$ siehe auch Abschnitt 5.2.3

²⁴z. B. Heißing et al. (2011): Fahrwerkhandbuch, S. 75

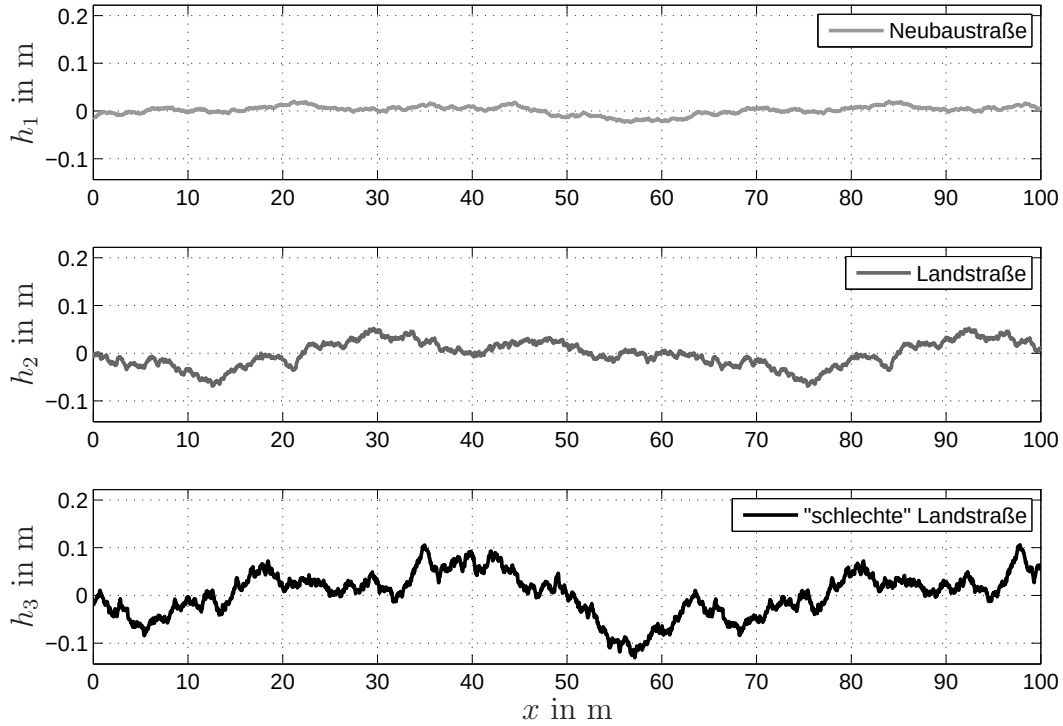


Abbildung 5.3: Höhenlängsprofil von drei Fahrbahnen unterschiedlicher Längsunebenheit

Standardabweichung des Höhenlängsprofils σ_h , die bei einem arithmetischem Mittelwert von $\bar{h} = 0$ dem quadratischem Mittelwert entspricht, wird wie folgt bestimmt:

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i^2} \quad (5.30)$$

Ein weiteres Maß zur Bewertung der Unebenheit ist die spektrale Leistungsdichte des Höhenlängsprofils. Die Standardabweichung σ_h steht in folgendem Zusammenhang zu wegkreisfrequenzabhängiger Leistungsdichte $\check{\Phi}_{P,h}(\Omega)$ bzw. zeitkreisfrequenzabhängiger Leistungsdichte $\Phi_{P,h}(\omega)$:

$$\sigma_h^2 = \int_0^\infty \check{\Phi}_{P,h}(\Omega) d\Omega = \int_0^\infty \Phi_{P,h}(\omega) d\omega \quad (5.31)$$

Zwischen den Größen Wegkreisfrequenz Ω , Wellenlänge L und Zeitkreisfrequenz ω bestehen bei konstanter Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X folgende Abhängigkeiten:

$$\Omega = \frac{2\pi}{L} = \frac{\omega}{v_X} \quad (5.32)$$

Die wegkreisfrequenzabhängigen Leistungsdichten $\check{\Phi}_{P,h}(\Omega)$ der drei Höhenlängsprofile aus Abbildung 5.3 sind in Abbildung 5.4 dargestellt.

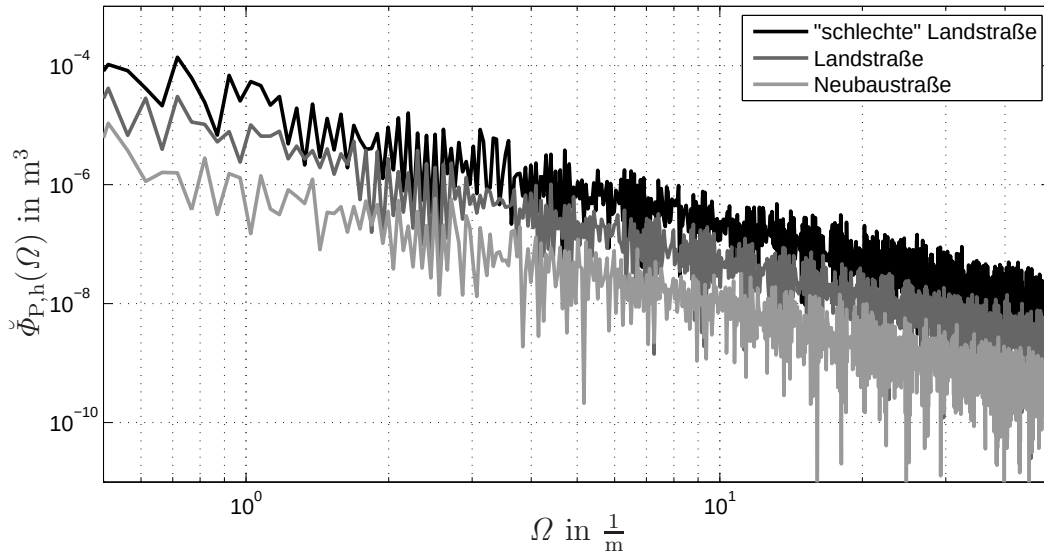


Abbildung 5.4: Spektrale Leistungsdichte der in Abbildung 5.3 dargestellten Höhenlängsprofile

5.2.3 Allgemeiner Unebenheitsindex

Definition

Braun et al. untersuchten den Zusammenhang von spektraler Leistungsdichte des Höhenlängsprofils und den Wegkreisfrequenzen²⁵. Dafür wird dort eine Bezugskreisfrequenz $\Omega_0 = 1/\text{m}$ definiert:

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{L_0}; L_0 = 2\pi \text{ m} \quad (5.33)$$

Nach genannter Quelle bewährt sich im Wellenlängenbereich von $\Omega = 0,2 \frac{1}{\text{m}}$ bis $\Omega = 50 \frac{1}{\text{m}}$ folgende Gleichung, die bei doppelt-logarithmischer Darstellung eine Gerade²⁶ ist, zur Beschreibung des Zusammenhangs von Leistungsdichte $\check{\Phi}_{P,h}(\Omega)$ und Wegkreisfrequenz Ω :

$$\check{\Phi}_{P,h}(\Omega) = \check{\Phi}_{P,h}(\Omega_0) \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-\check{w}} \quad (5.34)$$

Aus Gleichung (5.34) ergeben sich folgende Kenngrößen zur Charakterisierung der Längsunebenheit von Fahrbahnen:

- Unebenheitsmaß $\check{\Phi}_{P,h}(\Omega_0) = AUN$
- Welligkeit $\check{w}$

Das Unebenheitsmaß $\check{\Phi}_{P,h}(\Omega_0)$ wird bei Bestimmung über Streckenabschnitte von jeweils $\Delta s = 100 \text{ m}$ auch als Allgemeiner Unebenheitsindex AUN bezeichnet. Dieser ist demnach der Wert der Leistungsdichte $\check{\Phi}_{P,h}(\Omega)$ des Höhenlängsprofils (über $\Delta s = 100 \text{ m}$) an der Stelle $\Omega = \Omega_0$.

²⁵Braun et al. (1991): Sammlung und Auswertung von Straßenunebenheitsdaten - Teil 1, S. 21 ff.

²⁶Eine Methode zur Bestimmung dieser Geraden aus Messgrößen wird in Abschnitt 6.1.1 beschrieben.

Wertebereich

Braun et al. bestimmen die AUN -Werte sowie die Welligkeiten $\check{w}$ für 301 Strecken verschiedener Straßenkategorien (Autobahn, Bundes-, Land- und Kreisstraße) mit einer Gesamtlänge von 1480 km²⁷. Dabei werden für den AUN Werte von 0,29 cm³ bis 62,2 cm³ und für die Welligkeit $\check{w}$ Werte von 1,5 bis 3,0 ermittelt. Im Mittel beträgt die Welligkeit $\check{w} = 2$. Dieser Wert wird für „Normstraßen“ angesetzt²⁸. Mitschke et al. bewerten Fahrbahnen mit einem $AUN \leq 2$ cm³ als „sehr gut“ und solche mit einem $AUN > 32$ cm³ als „schlecht“²⁹. Abgeleitet aus Knepper et al. ergeben sich hinsichtlich der Fahrbahnerhaltung folgende Grenzwerte zur Bewertung der Unebenheit von Kreis- und Landstraßen³⁰:

- Warnwert: $AUN_W = 9$ cm³
- Schwellwert: $AUN_S = 18$ cm³

Bei Erreichen des Warnwertes ist die Planung baulicher Maßnahmen erforderlich. Das Überschreiten des Schwellwertes erfordert sofort bauliche oder verkehrslenkende Maßnahmen.

5.2.4 Erkennung unebener Fahrbahnen

Ableitung eines Kriteriums

Unter Annahme einer Normstraße ($\check{w} = 2$) und der Verwendung des Allgemeinen Unebenheitsindex ($\check{\Phi}_{P,h}(\Omega_0) = AUN$) vereinfacht sich Gleichung (5.34) wie folgt:

$$\check{\Phi}_{P,h}(\Omega) = AUN \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-2} \quad (5.35)$$

Nach Gleichung (5.31) gilt folgender Zusammenhang:

$$\Phi_{P,h}(\omega) d\omega = \check{\Phi}_{P,h}(\Omega) d\Omega \quad (5.36)$$

Daraus ergibt sich die zeitkreisfrequenzabhängige Leistungsdichte $\Phi_{P,h}(\omega)$ in Abhängigkeit der wegbereichsfrequenzabhängigen Leistungsdichte $\check{\Phi}_{P,h}(\Omega)$:

$$\Phi_{P,h}(\omega) = \check{\Phi}_{P,h}(\Omega) \cdot \frac{d\Omega}{d\omega} \quad (5.37)$$

Mit Gleichung (5.32), d. h. unter der Annahme einer konstanten Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X (für den zu untersuchenden Fahrbahnabschnitt), folgt daraus:

$$\Phi_{P,h}(\omega) = \check{\Phi}_{P,h}(\Omega) \cdot \frac{1}{v_X} \quad (5.38)$$

Einsetzen der Gleichungen (5.32) und (5.35) in Gleichung (5.38) führt zu nachfolgendem Zusammenhang:

$$\Phi_{P,h}(\omega) = \frac{v_X}{\omega^2} \cdot \Omega_0^2 \cdot AUN \quad (5.39)$$

²⁷Braun et al. (1991): Sammlung und Auswertung von Straßenunebenheitsdaten - Teil 1, S. 53 ff.

²⁸z. B. Heißing et al. (2011): Fahrwerkhandbuch, S. 78

²⁹Mitschke et al. (1995): Einfluss von Einzelhindernissen und Periodizitäten, S. 15

³⁰Knepper et al. (1997): systematische Straßenerhaltung, S. 605 ff.

Die spektrale Leistungsdichte des Höhenlängsprofils $\Phi_{P,h}(\omega)$ ist demnach quadratisch abhängig vom Kehrwert der Zeitkreisfrequenz ω . Dies bedeutet, dass bei einer Bestimmung des AUN basierend auf Gleichung (5.39) Messfehler in höheren Frequenzbereichen stärker gewichtet werden als in niedrigen. Bei einer Verwendung der spektralen Leistungsdichte der Höhenlängsprofiländerung $\Phi_{P,h}(\omega)$ ist der Störeinfluss über der Frequenz gleichverteilt³¹. $\Phi_{P,h}(\omega)$ steht in folgendem Zusammenhang zu $\Phi_{P,i}(\omega)$:

$$\Phi_{P,h}(\omega) = \Phi_{P,i}(\omega) \cdot \omega^2 \quad (5.40)$$

Einsetzen von Gleichung (5.39) in (5.40) liefert folgenden Zusammenhang zwischen der spektralen Leistungsdichte der Höhenlängsprofiländerung $\Phi_{P,h}(\omega)$ und dem AUN :

$$\Phi_{P,h}(\omega) = v_X \cdot \Omega_0^2 \cdot AUN \quad (5.41)$$

Aus den Gleichungen (5.31) und (5.41) folgt für die Standardabweichung der Höhenlängsprofiländerung σ_h :

$$\sigma_h^2 = \int_0^\infty \Phi_{P,h}(\omega) d\omega = \int_0^\infty v_X \cdot \Omega_0^2 \cdot AUN d\omega \quad (5.42)$$

$$\sigma_h^2 = [\omega \cdot v_X \cdot \Omega_0^2 \cdot AUN]_0^\infty \quad (5.43)$$

Wird nicht der gesamte Frequenzbereich betrachtet, sondern nur ein Frequenzband von ω_m bis ω_n , so kann die auf dieses Band begrenzte Standardabweichung der Höhenlängsprofiländerung σ_{h,ω_B} wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_{h,\omega_B}^2 = \underbrace{(\omega_n - \omega_m)}_{\omega_B} \cdot v_X \cdot \Omega_0^2 \cdot AUN \quad (5.44)$$

Division durch die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X und die Bandbreite ω_B liefert folgenden Zusammenhang:

$$\frac{\sigma_{h,\omega_B}^2}{v_X \cdot \omega_B} = \Omega_0^2 \cdot AUN \quad (5.45)$$

Der Ausdruck $\frac{\sigma_{h,\omega_B}^2}{v_X \cdot \omega_B}$ ist nur vom Unebenheitsmaß AUN abhängig. Dies motiviert zur Einführung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$, welches nach Gleichung (5.45) proportional zum AUN ist:

$$\mathcal{T}_U = \frac{\sigma_{h,\omega_B}^2}{v_X \cdot \omega_B} \propto AUN \quad (5.46)$$

Das Kriterium $\mathcal{T}_U$ unterscheidet sich demnach vom Unebenheitsmaß AUN nur durch das Quadrat der Bezugswegkreisfrequenz Ω_0 . Da diese als $\Omega_0 = 1/m$ definiert ist³², unterscheiden sich bei Zutreffen aller Annahmen und Vereinfachungen die Werte von Kriterium $\mathcal{T}_U$ und Unebenheitsmaß AUN nicht. Einzig die Einheiten sind verschieden, d. h. $[\mathcal{T}_U] = m$, $[AUN] = m^3$.

³¹siehe auch Zeller (2009): Handbuch Fahrzeugakustik, S. 57

³²siehe auch Gleichung (5.33)

Technische Realisierung

Das Übertragungsverhalten der Reifen ist in niedrigen Frequenzbereichen (in Abhängigkeit der Radeigenfrequenz bis zu Frequenzen von ca. 15 Hz) annähernd neutral^{33,34}, d. h. Anregungen der Fahrbahn werden direkt übertragen. Dies führt zur Annahme, dass die Vertikalauslenkung des Rades in diesem Frequenzband dem Höhenlängsprofil der Fahrbahn folgt. Gleiches gilt für die Vertikalgeschwindigkeit des Rades $v_{z,w}$ und die Höhenlängsprofiländerung $\dot{h}$. Unter der Annahme eines neutralen Übertragungsverhaltens ist demnach eine Messung der Höhenlängsprofiländerung $\dot{h}$ nicht erforderlich. Eine Messung der Vertikalgeschwindigkeit des Rades $v_{z,w}$ reicht zur Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ aus. Aus Gleichung (5.46) folgt demnach für die Bestimmung von $\mathcal{T}_U$:

$$\mathcal{T}_U = \frac{\sigma_{\dot{h}, \omega_B}^2}{v_X \cdot \omega_B} \approx \frac{\sigma_{v_{z,w}, \omega_B}^2}{v_X \cdot \omega_B} \quad (5.47)$$

Gilt für die untere Grenzfrequenz $\omega_m > 0 \text{ s}^{-1}$, so vereinfacht sich Gleichung (5.47) bei Bestimmung eines Momentanwertes $\mathcal{T}_U^*$ wie folgt:

$$\mathcal{T}_U^* = \frac{v_{z,w, \omega_B}^2}{v_X \cdot \omega_B} \quad (5.48)$$

Im Gegensatz zu Beschleunigungssensoren sind Sensoren zur Messung der Schwingungsgeschwindigkeit in automobilen Anwendungen bisher kaum zu finden. Die Schwingungsbeschleunigung ist die zeitliche Ableitung der Schwingungsgeschwindigkeit. Dies spricht für eine Verwendung von Beschleunigungssensoren und eine anschließende Integration.

Beschleunigungssensoren können einen Offsetdrift aufweisen. Da dieser niederfrequent ist, vermindert eine untere Begrenzung des Frequenzbandes auf 2 Hz den Einfluss eines solchen Drifts. Eine obere Begrenzung auf 12 Hz ergibt sich aus der Radeigenfrequenz des verwendeten Motorrades. Für den Frequenzbereich von 2 Hz bis 12 Hz ergeben sich nach Gleichung (5.32) für Fahrzeuglängsgeschwindigkeiten von $v_X = 30 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 8,33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $v_X = 120 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 33,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ folgende für die Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ berücksichtigte Wegkreisfrequenzbänder:

$$\text{für } v_X = 30 \frac{\text{km}}{\text{h}} : \Omega = \frac{\omega}{v_X} = 1,5 \dots 9,1 \frac{1}{\text{m}} \quad (5.49)$$

$$\text{für } v_X = 120 \frac{\text{km}}{\text{h}} : \Omega = \frac{\omega}{v_X} = 0,4 \dots 2,3 \frac{1}{\text{m}} \quad (5.50)$$

Die genannten Wegkreisfrequenzen liegen im Gültigkeitsbereich von Gleichung (5.34). Daher wird angenommen, dass eine Beschreibung der Leistungsdichte $\check{\Phi}_{P,h}(\Omega)$ durch genannte Gleichung zulässig ist und das Kriterium $\mathcal{T}_U$ in dem ausgewählten (Zeit-) Frequenzbereich bestimmt werden kann.

Abbildung 5.5 zeigt die Signalverarbeitungskette zur Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$. Die Integration der gemessenen Vertikalbeschleunigung des Rades³⁵ $a_{z,w}$ liefert die Vertikalgeschwindigkeit $v_{z,w}$. Ein Bandpass zweiter Ordnung schwächt Frequenzen außerhalb des

³³Heißing et al. (2011): Fahrwerkhandbuch, S. 395

³⁴Cossalter (2006): Motorcycle Dynamics, S. 192 ff.

³⁵Gemessen wird die Vertikalbeschleunigung des Rades. Eingangsgröße ist die (horizontierte) Vertikalbeschleunigung $a_{z,w}$ (wie in Abschnitt 4.3.1 definiert). Beide Größen sind bei rollwinkelfreier Fahrt gleich. Ist dies nicht gegeben, so ist eine Transformation erforderlich

Frequenzbandes von 2 Hz bis 12 Hz mit 20 dB/Dekade ab. Integrator und Bandpass sind technisch in einer Einheit zusammengefasst, um einen Drift der ermittelten Radvertikalgeschwindigkeit $v_{z,w}$ zu vermeiden. Quadrierung der Vertikalgeschwindigkeit v_{z,w,ω_B} und Division durch die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X sowie die Bandbreite ω_B liefern den Momentanwert $\mathcal{Y}_U^*$. Mit einem Tiefpassfilter erster Ordnung wird der Verlauf von $\mathcal{Y}_U$ über einen von der Grenzfrequenz f_g abhängigen Zeitraum gemittelt (siehe nachfolgende Ausführungen). Daraus resultiert der Mittelwert $\mathcal{Y}_{U,\Delta s}$.

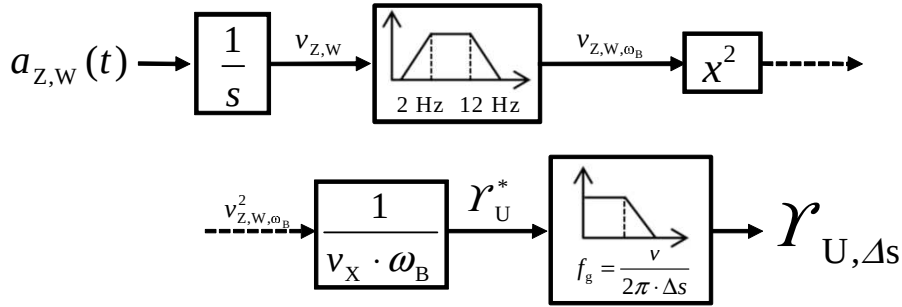


Abbildung 5.5: Signalverarbeitungskette zur Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{Y}_U$ (Integrator und Bandpass sind technisch in einer Einheit zusammengefasst, um einen Drift der ermittelten Radvertikalgeschwindigkeit $v_{z,w}$ zu vermeiden. Die getrennte Darstellung erfolgt aus Übersichtsgründen.)

Bestimmung der Grenzfrequenz: Die Gruppenlaufzeit eines Tiefpasses erster Ordnung ist wie folgt abhängig von der Grenzfrequenz f_g des Filters³⁶:

$$\tau_{Gr} = \frac{1}{2\pi \cdot f_g} \quad (5.51)$$

Für den während der Gruppenlaufzeit τ_{Gr} zurückgelegten Streckenabschnitt Δs gilt in Abhängigkeit der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X :

$$\Delta s = \tau_{Gr} \cdot v_X \quad (5.52)$$

Die Gleichungen (5.51) und (5.52) liefern folgenden Zusammenhang zur Anpassung der Grenzfrequenz f_g in Abhängigkeit der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X (bei konstantem Streckenabschnitt Δs):

$$f_g = \frac{v_X}{2\pi \cdot \Delta s} \quad (5.53)$$

Die Variation der Grenzfrequenz f_g in Abhängigkeit der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X ermöglicht somit eine Mittelung des Wertes von $\mathcal{Y}_U$ über einen konstanten Streckenabschnitt Δs (z. B. 100 m).

5.2.5 Hypothesenbildung

Um Warnmeldungen basierend auf dem Kriterium $\mathcal{Y}_{U,\Delta s}$ zu generieren, ist es erforderlich, dass unebene Fahrbahnabschnitte zuverlässig erkannt werden. Gleichzeitig wird aus Akzeptanzgründen gefordert, möglichst wenige Falschwarnungen zu erzeugen. Dies motiviert

³⁶Frey et al. (2008): Signal- und Systemtheorie, S. 216

zur Bestimmung eines Grenzwertes $\mathcal{T}_{U,\Delta s,\text{grenz}}$, der auf Fahrbahnen mit einem Unebenheitsmaß $AUN \geq 18 \text{ m}^3$ (Schwellwert³⁷) immer überschritten wird und auf allen anderen Fahrbahnen nur zu „akzeptierten“ Falschwarnungen führt. Unter Annahme der Akzeptanz von Falschwarnungen bei Fahrbahnen mit $AUN \geq 9 \text{ m}^3$ (Warnwert³⁸) und der Forderung nach einer zuverlässigen Erkennung von unebenen Fahrbahnen liefert dies folgende Hypothese:

Hypothese 1: Ein Grenzwert $\mathcal{T}_{U,\Delta s,\text{grenz}}$ wird auf allen Fahrbahnen mit einem $AUN \geq AUN_S = 18 \text{ cm}^3$ überschritten. Gleichzeitig führen Fahrbahnen mit einem Unebenheitsmaß AUN , das kleiner als ein Grenzwert $AUN_{\text{grenz}} \geq AUN_W = 9 \text{ cm}^3$ ist, immer zu Werten des Kriteriums $\mathcal{T}_{U,\Delta s}$, die unterhalb des Grenzwertes $\mathcal{T}_{U,\Delta s,\text{grenz}}$ liegen.

5.3 Einzelne Fahrbahnschäden

5.3.1 Beschreibung von Einzelschäden

Erhabene Einzelschäden

Nach der österreichischen Straßenverkehrsordnung werden Unebenheiten der Fahrbahn, die quer zu dieser verlaufen, als Querrinne oder Aufwölbung bezeichnet³⁹. Demnach fallen auch Bodenwellen unter diese Bezeichnung. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden diese als „sanft ansteigende und abfallende Erhebungen in Anlehnung an die Form einer Wasserwelle“ beschrieben⁴⁰.

Die Schweizer Norm SN640925 bezeichnet die Tiefe/Höhe von Querrinnen in Abhängigkeit des Straßentyps ab Werten von 12 mm bis 24 mm als „schlecht“⁴¹. Angaben zu Breite und Form der Querrinne werden nicht gemacht. Mitschke et al. untersuchen anhand von Simulationen u. a. den Einfluss von Einzelhindernissen mit herausragenden Unebenheitsanteilen auf die Fahrsicherheit⁴². Beispielhaft wird dort die Überfahrt über einen nahezu vertikalen Versatz (Brückenübergang, Kanaldeckel) und einen sinusförmig ansteigenden Versatz (Sinuswelle) modelliert. Demnach sind z. B. bei einer für Landstraßen typischen Unebenheit von $AUN = 6 \text{ cm}^3$ für kurze Einzelschäden ($L \leq 1 \text{ m}$) bauliche Maßnahmen bei Höhen von 12 mm bis 16 mm erforderlich. Bei längeren Einzelschäden ($L = 1 \dots 2,5 \text{ m}$) erfordern Höhen von 25 mm bis 50 mm weitere Maßnahmen. Eine weitere Quelle bezeichnet Aufwölbungen von 15 mm als „leicht“ und von 30 mm als „schwer“⁴³.

Die beschriebenen Quellen unterscheiden erhabene Einzelschäden von Fahrbahnen somit nach Länge, Höhe und Form. Daraus werden folgende Merkmale für erhabene Einzelschäden abgeleitet:

³⁷Dieser Wert entspricht dem in Abschnitt 5.2.3 eingeführten Schwellwert. Bei Versuchen mit fünf Probanden wünschten diese mehrheitlich eine Warnung vor solchen Fahrbahnen.

³⁸Dieser Wert entspricht dem in Abschnitt 5.2.3 eingeführten Warnwert. Bei den erwähnten Versuchen wurden Falschwarnungen mehrheitlich akzeptiert.

³⁹BGBI. (A): StVO (Stand 05/2011), §50

⁴⁰siehe Definition „Bodenwelle“ unter www.wikipedia.de

⁴¹SNV (2003): Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen, S. 11

⁴²Mitschke et al. (1995): Einfluss von Einzelhindernissen und Periodizitäten, S. 117 ff.

⁴³Roadconsult (2011): Straßenzustand - Schadenbilder

- Länge L : wenige cm bis wenige m
- Höhe h : ca. 12 mm bis über 50 mm
- Form: kantig, rund

Tiefe Einzelschäden

In einer Übersicht über verschiedene Fahrbahnschäden werden Schlaglöcher als „Folge von Kornausbrüchen, Ablösungen, Frost-, Netz- und wilden Rissen in der Asphaltdecke beschrieben“⁴⁴. Demnach reichen Schlaglöcher bis zu mehreren Zentimetern tief in die Tragschicht der Fahrbahn hinein. In der bereits erwähnten Schweizer Norm SN640925 werden Schlaglöcher mit einem Durchmesser bis zu 0,1 m und einer Tiefe bis zu 10 mm als „leicht“, solche mit Durchmessern über 0,3 m und Tiefen von über 40 mm als „schwer“ bezeichnet. Dies führt zur Annahme, dass Schlaglöcher wie folgt beschrieben werden:

- Durchmesser bzw. Länge L : 0,1 m bis über 0,3 m
- Tiefe h : 10 mm bis über 40 mm

5.3.2 Erkennung von Einzelschäden

Die vorherigen Beschreibungen zeigen, dass die genannten Merkmale von Einzelschäden in weiten Bereichen variieren. Daher wird ein Kriterium zur Erkennung von Einzelschäden angestrebt, das ohne Kenntnis dieser Merkmale bestimmt wird. Um eine Erkennung in einem möglichst großen Anwendungsbereich zu realisieren, ist eine Unabhängigkeit von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit beim Überfahren des Einzelschadens erforderlich.

Daraus leiten sich folgende Anforderungen an ein Kriterium zur Erkennung bzw. Bewertung von Einzelschäden ab:

- Das Kriterium ist ein Maß für die (noch zu definierende) „Gefährlichkeit“ eines Einzelschadens.
- Der Wert des Kriteriums ist unabhängig von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit beim Überfahren des Einzelschadens.
- Das Kriterium wird ohne Kenntnis von Länge, Höhe (bzw. Tiefe) sowie Form eines Einzelschadens ermittelt.

Nachfolgender Abschnitt beschreibt die Herleitung eines Kriteriums zur Erkennung bzw. Bewertung von Einzelschäden basierend auf diesen Anforderungen.

⁴⁴Roadconsult (2011): Straßenzustand - Schadenbilder

Herleitung eines Kriteriums $\mathcal{I}_S$ zur Erkennung von Einzelschäden

Im Gegensatz zur Anregung durch Unebenheiten, wie in Abschnitt 5.2 untersucht, ist die Energie bei einer Anregung durch einen Einzelschaden endlich⁴⁵. In der Signaltheorie wird zur Bewertung solcher Signale die Signalenergie E_S verwendet. Aufgrund der Analogie zur Berechnung der elektrischen Energie wird folgender Ausdruck als Signalenergie E_S des Signales $s(t)$ bezeichnet (siehe auch Ohm⁴⁶):

$$E_S = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt \quad (5.54)$$

Nach dem Parseval'schen Theorem ist die Signalenergie im Zeitbereich gleich der im Frequenzbereich. Daraus folgt in Abhängigkeit des Fourier-Integrals⁴⁷ $S(\omega)$ folgender Zusammenhang zur Bestimmung der Signalenergie E_S im Frequenzbereich:

$$E_S = \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{|S(\omega)|^2}_{\Phi_E(\omega)} d\omega \quad (5.55)$$

Der Ausdruck $|S(\omega)|^2$ wird als (spektrale) Energiedichte $\Phi_E(\omega)$ bezeichnet, da dieser die Dimension *Signalenergie pro Frequenz* bzw. *Signalenergie mal Zeit* aufweist. Demnach beschreibt die Energiedichte die Verteilung der Signalenergie in Abhängigkeit der (Zeitkreis-) Frequenz.

Mitschke et al. bewerten das menschlichen Empfinden von transienten Schwingungen, die durch einen Einzelschaden ausgelöst werden, anhand der Ergebnisse von Cucuz⁴⁸. Demnach korreliert das menschliche Schwingungsempfinden, d. h. die ausgelöste Wahrnehmung, mit der Schwingungsgeschwindigkeit⁴⁹. Daher wird diese als Grundlage für die weiteren Untersuchungen herangezogen.

Die Verwendung von Radbewegungen zur Bewertung von Fahrbahnanregungen bietet aufgrund des neutralen Übertragungsverhaltens Vorteile gegenüber der Verwendung von Aufbaubewegungen (siehe auch Abschnitt 5.2.4). Für die Bewertung der Schwingungsgeschwindigkeit wird daher die vertikale Radgeschwindigkeit $v_{Z,W}$ verwendet. Für die (fouriertransformierte) Radvertikalgeschwindigkeit $\hat{v}_{Z,W}(\omega)$ berechnet sich nach Gleichung (5.55) die Energiedichte $\Phi_{E,v_{Z,W}}(\omega)$ wie folgt:

$$\Phi_{E,v_{Z,W}}(\omega) = |\hat{v}_{Z,W}(\omega)|^2, [\hat{v}_{Z,W}] = \text{m} \quad (5.56)$$

Abschnitt 5.3.1 zeigt, dass Einzelschäden (Wellen-) Längen bis zu $L_{\max} = 2,5$ m aufweisen. Dies führt zur Annahme, dass Einzelschäden vorwiegend Vertikalschwingungen mit

⁴⁵Die Energie ist auch bei endlich langer Fahrt auf Unebenheiten endlich. Da die Anregungen durch Unebenheiten im Vergleich zu der durch einen Einzelschaden lang sind, wird erstere als unendlich angenommen.

⁴⁶Ohm et al. (2010): Signalübertragung, S. 203 ff.

⁴⁷Folgende Definition des Fourier-Integrals liegt zugrunde: $S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$

⁴⁸Mitschke et al. (1995): Einfluss von Einzelhindernissen und Periodizitäten, S. 62

⁴⁹Cucuz (1992): Schwingungsempfinden

Wellenlängen (in Längsrichtung) von $L \leq 2,5$ m anregen. Aufgrund des endlichen Reifenradius wird außerdem angenommen, dass es eine untere Grenze $L_{\min}$ gibt⁵⁰. Nach diesen Annahmen regen Einzelschäden nur Schwingungen in einem begrenzten Frequenzband von $\omega_m = \frac{2\pi \cdot v_x}{L_{\max}}$ bis $\omega_n = \frac{2\pi \cdot v_x}{L_{\min}}$ an.

Bei Vernachlässigung sonstiger Anregungen ist somit das Integral der Energiedichte über dieses Frequenzband gleich der Signalenergie, die dem System durch die Überfahrt über einen Einzelschaden zugeführt wird. Wird die Signalenergie $E_{v_{z,w}}$ durch das Produkt aus Frequenzauflösung $\Delta\omega$ und Summe der einzelnen Beträge der Energiedichte $\Phi_{E,v_{z,w}}(\omega)$ in dem genannten Frequenzband ($\omega_m \dots \omega_n$) genähert, so gilt:

$$E_{v_{z,w}} \approx \Delta\omega \cdot \sum_{i=m}^n \Phi_{E,v_{z,w}}(\omega_i) = \Delta\omega \cdot \sum_{i=m}^n |\hat{v}_{z,w}(\omega_i)|^2 \quad (5.57)$$

Die Berechnung der Signalenergie $E_{v_{z,w}}$ nach Gleichung (5.57) ist abhängig von der Bandbreite $\omega_B = \omega_n - \omega_m$. Eine Normierung auf die Bandbreite ω_B ermöglicht eine Vergleichbarkeit von Signalen unterschiedlicher Bandbreiten. Eine Erweiterung von Gleichung (5.57) um diese Normierung⁵¹ sowie ein Radizieren (zur Angleichung der Einheiten an das Eingangssignal $\hat{v}_{z,w}$) führen zu folgender Gleichung zur Bestimmung des Kriteriums γ_S :

$$\gamma_S = \sqrt{\frac{\Delta\omega}{\omega_B} \sum_{i=m}^n |\hat{v}_{z,w}(\omega_i)|^2} \quad (5.58)$$

Technische Realisierung

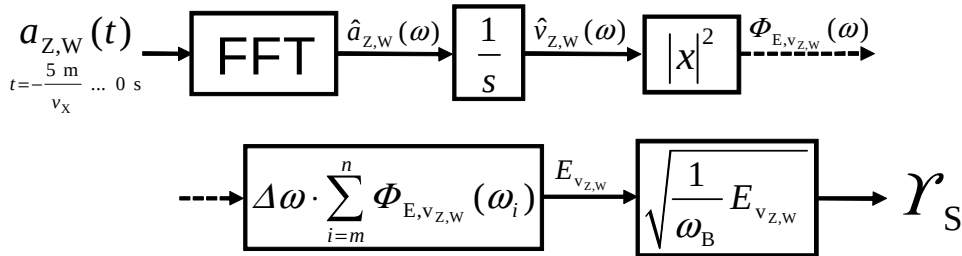


Abbildung 5.6: Signalverarbeitungskette zur Bestimmung des Kriteriums γ_S

Aus den gleichen Gründen wie bei der Bestimmung des Kriteriums γ_U (siehe auch Abschnitt 5.2.4) resultiert eine Messung der vertikalen Radbeschleunigung anstatt der vertikalen Radgeschwindigkeit (vorhandene Sensoren, neutrales Übertragungsverhalten). Um den Einfluss von Messrauschen und allgemeiner Unebenheit zu reduzieren, wird der untersuchte

⁵⁰Beim Abrollen über eine Kante beschreibt der unterste Punkt des Reifens näherungsweise den Weg eines Kreises, dessen Radius dem des Reifens entspricht. Demnach folgt der unterste Punkt des Reifens bei „kleinen“ Wellenlängen nicht der Kontur des Einzelschadens, sondern der des genannten Kreises.

⁵¹Die Bandbreite ω_B ist wie die Frequenzauflösung $\Delta\omega$ abhängig von der Messdauer und somit der Anzahl der Messwerte. ω_B ist reziprok zur Anzahl der Messwerte (siehe auch Gleichungen (5.63) und (5.64)). $\Delta\omega$ ist reziprok zur nächsten 2er-Potenz der Anzahl der Messwerte (Voraussetzung zur Bestimmung der FFT). Der Faktor $\frac{\Delta\omega}{\omega_B}$ kann somit auch als Korrekturfaktor interpretiert werden.

Zeitbereich auf die Zeit, in der eine Strecke von 5 m zurückgelegt wird, begrenzt. Die gesamte Signalverarbeitungskette zur Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ nach Gleichung (5.58) ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Folgende Verarbeitungsschritte werden ausgeführt:

0. Messung der Radvertikalbeschleunigung⁵² $a_{Z,W}(t)$ und Auswahl eines Zeitbereiches von $t = -5 \text{ m}/v_X \dots 0 \text{ s}$
1. Transformation in den Frequenzbereich zu $\hat{a}_{Z,W}(\omega)$ durch eine *Fast Fourier Transformation*⁵³ (FFT)
2. Bestimmung der Radvertikalgeschwindigkeit $\hat{v}_{Z,W}(\omega)$ durch Multiplikation mit $1/s$ entsprechend einer Integration der Radvertikalbeschleunigung $\hat{a}_{Z,W}(\omega)$
3. Bestimmung der Energiedichte $\Phi_{E,vz,w}(\omega)$ durch Quadrieren des Betrages der Radvertikalgeschwindigkeit $|\hat{v}_{Z,W}(\omega)|$
4. Bestimmung der Energie $E_{vz,w}$ durch Integration der Energiedichte $\Phi_{E,vz,w}(\omega)$ (näherungsweise durch Multiplikation von Frequenzauflösung $\Delta\omega$ und Summe der einzelnen Beträge der Energiedichte $\Phi_{E,vz,w}(\omega)$ in dem Frequenzband $\omega_m \dots \omega_n$)
5. Normierung auf die Bandbreite ω_B des ausgewählten Frequenzbereiches sowie Radizieren

Die Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ nach Gleichung (5.58) erfordert, wie in Abbildung 5.6 dargestellt, eine Transformation in den Frequenzbereich. Um dabei Leck-Effekte zu vermindern, wird die gemessene Radvertikalbeschleunigung $a_{Z,W}(t)$ mit einem von-Hann-Fenster gewichtet. Ein Tiefpassfilter vor der Abtastung und mit einer Eckfrequenz von 30 Hz reduziert bei einer Abtastfrequenz von 100 Hz Aliasing-Effekte. Beide Signalverarbeitungsschritte sind aus Übersichtsgründen nicht dargestellt.

Vergleich zur Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$

Aufgrund der FFT (Schritt 1 bei $\mathcal{T}_S$ -Bestimmung) ist bei der Bestimmung der Energie $E_{vz,w}$ (Schritt 4) eine direkte Auswahl der zu berücksichtigenden Amplituden(-dichten) möglich. Dies erspart ein Bandpass-Filter mit variablen Durchlassbereich. Vorversuche zeigen, dass dieses Vorgehen für die Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ bessere Ergebnisse liefert als eine Anwendung der ersten drei Schritte der Signalverarbeitungskette zur Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ (siehe auch Abschnitt 5.2.4⁵⁴).

Zusätzlich liefert die FFT (ohne Normierung) bereits ein Energiesignal. Daher ist keine Umrechnung eines Leistungssignales erforderlich, welches bei der Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ ermittelt wird.

⁵²Gemessen wird die Vertikalbeschleunigung des Rades. Eingangsgröße ist die (horizontierte) Vertikalbeschleunigung $a_{Z,W}$ (wie in Abschnitt 4.3.1 definiert). Beide Größen sind bei rollwinkelfreier Fahrt gleich. Ist dies nicht gegeben, so ist eine Transformation erforderlich

⁵³Da für die weiteren Schritte das wie im vorherigen Abschnitt definierte Fourier-Integral erforderlich ist, erfolgt eine FFT ohne Normierung auf die Länge des Messvektors.

⁵⁴Bei Schritt 2 gibt es Unterschiede. Die Bestimmung von $\mathcal{T}_S$ erfordert einen Bandpass mit variablem Durchlassbereich, die von $\mathcal{T}_U$ nicht.

Parameterbestimmung

Die beiden Parameter ω_m und ω_n sind nach obiger Definition die Grenzen des Frequenzbandes, das durch einen Einzelschaden angeregt wird. Die obere Grenze $L_{\max}$ ergibt sich aus der maximalen Länge eines typischen wie in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Einzelschadens. Die obere Grenze $L_{\max}$ wird daher wie folgt definiert:

$$L_{\max} = 2,5 \text{ m} \quad (5.59)$$

Die untere Grenze $L_{\min}$ ergibt sich aus Vorversuchen. Diese zeigen, dass z. B. bei Fahrzeuglängsgeschwindigkeiten von $v_X = 7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Vertikalschwingungen mit Wellenlängen (in Längsrichtung) von $L \geq 0,5 \text{ m}$ auftreten. Daher wird folgende untere Grenze $L_{\min}$ festgelegt:

$$L_{\min} = 0,5 \text{ m} \quad (5.60)$$

Aus den beiden Wellenlängen $L_{\max}$ und $L_{\min}$ leiten sich nach Gleichung (5.32) wie folgt die Wegkreisfrequenzen ab:

$$\Omega_m = \frac{2\pi}{L_{\max}} \quad (5.61)$$

$$\Omega_n = \frac{2\pi}{L_{\min}} \quad (5.62)$$

Bei Kenntnis der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X lassen sich die beiden Parameter ω_m und ω_n wie folgt bestimmen:

$$\omega_m = v_X \cdot \Omega_m = v_X \cdot \frac{2\pi}{L_{\max}} \approx 2,5 \frac{1}{\text{m}} v_X \quad (5.63)$$

$$\omega_n = v_X \cdot \Omega_n = v_X \cdot \frac{2\pi}{L_{\min}} \approx 12,6 \frac{1}{\text{m}} v_X \quad (5.64)$$

5.3.3 Hypothesenbildung

Um als Maß für die „Gefährlichkeit“ eines Einzelschadens zu bewähren, ist erforderlich, dass jedem Wert des Kriteriums $\mathcal{Y}_S$ ein Wert für die „Gefährlichkeit“ zugeordnet werden kann. Neukum et al. und Wesp zeigen, dass von Probanden mehrheitlich als gefährlich eingestufte Fahrsituationen objektiv nicht gefährlich sind^{55,56}. Demnach werden durch diese Bewertung ausreichend große Sicherheitsreserven eingehalten. Daher wird die subjektive Bewertung durch Probanden als (Referenz-) Maß für die Gefährlichkeit eines Einzelschadens ausgewählt.

Zusätzlich wird angenommen, dass sich die subjektive Bewertung in einer Warngeschwindigkeit v_{warn} ausdrückt. Als solche wird die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X definiert, bei der der Motorradfahrer vor einer Überfahrt über einen Einzelschaden gewarnt werden wollen. Daraus leitet sich folgende Hypothese ab:

Hypothese 2: Der Zusammenhang zwischen dem nach Gleichung (5.58) bestimmten Kriterium $\mathcal{Y}_S$ und der (subjektiv empfundenen) Gefährlichkeit eines Einzelschadens, ausgedrückt durch eine von Motorradfahrern gewünschte Warngeschwindigkeit v_{warn} , ist stets eindeutig.

⁵⁵Neukum et al. (2007): Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Störfall, S. 111

⁵⁶Wesp (2011): Bewertung eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 87 ff.

5.4 Ausweichmanöver

Die nachfolgenden Untersuchungen basieren auf der Annahme, dass plötzlich sichtbare Hindernisse auf der Fahrbahn zu charakteristischen Fahrmanövern, wie einem Ausweich- oder Bremsmanöver, führen. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, sind Systeme zur kommunikationsbasierten Warnung vor Bremsmanövern von vorausfahrenden Motorrädern bereits bekannt. Die nachfolgenden Abschnitte konzentrieren sich daher auf die Erkennung von Motorrad-Ausweichmanövern.

5.4.1 Motorrad-Ausweichmanöver in der Literatur

Ein Vergleich verschiedener Studien zu Ausweichmanövern durch Burg et al. zeigt, dass bei Seitenversätzen von $B = 1 \dots 4$ m die Ausweichzeit t_{Ausweich} ungefähr 2-3 s beträgt⁵⁷. Rauscher unterteilt den Ausweichvorgang in folgende drei Phasen⁵⁸: Einleiten des Ausweichvorgangs, Vorbeifahrt am Hindernis und Stabilisierung des Motorrads. Zur Bestimmung der Ausweichzeit t_{Ausweich} wird in Abhängigkeit der horizontalen Querbeschleunigung des Motorrads a_Y und des Seitenversatzes B folgender experimentell ermittelter Zusammenhang angegeben:

$$t_{\text{Ausweich}} = t_0 + \sqrt{\frac{B}{a_Y}} + t_2 \quad (5.65)$$

$$t_0 = 0,7 \dots 0,9 \text{ s}, \quad t_2 = 0,9 \dots 1,2 \text{ s} \quad (5.66)$$

Eine Querbeschleunigung von $a_Y = 10,0 \text{ m/s}^2$ führt demnach bei einem Seitenversatz von $B = 1$ m mindestens zu einer Ausweichzeit von $t_{\text{Ausweich}} \approx 1,9$ s. Bei einer Querbeschleunigung von $a_Y = 3,0 \text{ m/s}^2$ und einem Seitenversatz in Höhe einer Fahrstreifenbreite plus Sicherheitsabstand ($B = 5$ m) beträgt die Ausweichzeit demnach maximal $t_{\text{Ausweich}} \approx 3,4$ s. Cossalter unterscheidet zwei Typen von Motorrad-Ausweichmanövern⁵⁹. Bei Typ II erfolgt nach dem Ausweichen eine Rückkehr zur ursprünglich geplanten Fahrspur, bei Typ I geschieht dies nicht. Die bereits genannten Untersuchungen analysieren Typ I.

Messverläufe von Ausweichmanövern weisen einen charakteristischen Verlauf der Rollrate $\dot{\lambda}$ auf^{60,61}. Dieser lässt sich durch anderthalb Sinusschwingungen mit „gedämpfter“ erster und dritter Amplitude beschreiben. Die maximalen Rollraten beim Ausweichen liegen nach genannten Quellen im Bereich von $\dot{\lambda} = 40 \dots 100$ °/s, vereinzelt auch bis 140 °/s.

Spiegel schreibt, dass ein Rollwinkel $\lambda = 20^\circ$ von „einigermaßen geübten“ Fahrern im „normalen Fahrbetrieb“ nicht überschritten wird⁶². Dies entspricht unter Annahme ideal schmaler Reifen einer Querbeschleunigung von $a_Y = g \cdot \tan \lambda \approx 3,6 \text{ m/s}^2$. Hohm geht davon aus, dass bei Pkw-Überholmanövern Querbeschleunigungen von $a_Y = 2,2 \text{ m/s}^2$ nicht überschritten werden⁶³. Dies entspricht bei einem Motorrad einem theoretischem Rollwinkel von $\lambda = \arctan \frac{a_Y}{g} = 12,6^\circ$.

⁵⁷Burg et al. (2007): Unfälle mit Zweirädern, S. 397 f.

⁵⁸Rauscher (2007): Ausweichen von einspurigen Fahrzeugen, S. 59

⁵⁹Cossalter (2006): Motorcycle Dynamics, S. 324 ff.

⁶⁰Cossalter (2006): Motorcycle Dynamics, S. 326

⁶¹Giovannini et al. (2011): Development of PTW Active Braking, S. 7

⁶²Spiegel (2006): Die obere Hälfte des Motorrads, S. 45

⁶³Hohm (2010): Überholassistenzenzsystem, S. 88

5.4.2 Erkennung von Ausweichmanövern

Definition eines Mustermanövers

Basierend auf den Literaturangaben aus Abschnitt 5.4.1 werden folgende Merkmale eines „typischen“ Motorrad-Ausweichmanövers definiert:

- Der Verlauf der Rollrate eines Ausweichmanövers lässt sich durch anderthalb Sinusschwingungen beschreiben, wobei erste und dritte Amplitude betragsmäßig kleiner sind als die zweite.
- Ein Ausweichmanöver dauert 1,9 s bis 3,4 s⁶⁴.
- Die horizontierte Querbeschleunigung beträgt mindestens 3,0 m/s².
- Der Betrag der Rollratenamplitude liegt im Bereich von $\dot{\lambda}_0 \geq 40^\circ/\text{s}$.
- Der Seitenversatz bei Ausweichmanövern im Straßenverkehr beträgt bis zu $B = 5$ m.

Demnach ist der Verlauf der Rollrate bei allen Ausweichmanövern ähnlich. Unterschiede im Verlauf bestehen hauptsächlich bei der Dauer des Manövers und der Höhe der Amplitude. Dies motiviert zur Definition von Mustermanövern, d. h. von „typischen“ Ausweichmanövern, die sich nur in Amplitude und Dauer unterscheiden. Die erwähnten Sinusschwingungen lassen sich wie folgt in Abhängigkeit von Amplitude $\dot{\lambda}_0$ und Periodendauer T beschreiben:

$$\dot{\lambda}(t) = \dot{\lambda}_0 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (5.67)$$

Um den Betrag der beiden äußeren Amplituden zu reduzieren, bietet sich eine Fensterung an. Bei der Auswahl des Fensters ist zu beachten, dass am Ende des Mustermanövers, d. h. bei $t = 1,5 T$, der Rollwinkel Null ist. Dies führt zu folgender Anforderung:

$$\lambda_{\text{Muster}}(t = 1,5 T) = 0^\circ \quad (5.68)$$

Ein Tukey-Fenster mit $p = 2/3$ erfüllt die Anforderung⁶⁵ und wird durch folgende Gleichung in Abhängigkeit der Länge des Tukey-Fensters T_{Ty} (hier: $T_{\text{Ty}} = 1,5 \cdot T$) beschrieben:

$$w_{\text{Ty}}(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } \left| t - \frac{T_{\text{Ty}}}{2} \right| \leq p \cdot \frac{T_{\text{Ty}}}{2}, \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left[\pi \frac{t - (1+p) \frac{T_{\text{Ty}}}{2}}{(1-p) \frac{T_{\text{Ty}}}{2}} \right] \right) & \text{für } p \cdot \frac{T_{\text{Ty}}}{2} \leq \left| t - \frac{T_{\text{Ty}}}{2} \right| \leq \frac{T_{\text{Ty}}}{2}, \\ 0 & \text{sonstige} \end{cases} \quad (5.69)$$

Die durch die Gleichungen (5.67) und (5.69) beschriebenen Teilfunktionen des Mustermanövers („Sinus“, „Fenster“) sind in Abbildung 5.7 (links) dargestellt. Multiplikation beider Gleichungen ergibt den Verlauf der Rollrate eines Mustermanövers $\dot{\lambda}_{\text{Muster}}$. Dieses hängt ab von den Parametern Amplitude $\dot{\lambda}_0$ sowie Periodendauer T und wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\dot{\lambda}_{\text{Muster}}(t) = w_{\text{Ty}}(t) \cdot \dot{\lambda}_0 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (5.70)$$

⁶⁴Eine Rückkehr zur ursprünglich geplanten Fahrspur ist in angegebener Zeit nicht berücksichtigt.

⁶⁵Ein von-Hann-Fenster, wie in einer früheren Untersuchung verwendet, erfüllt diese Anforderung nicht (siehe auch Lattke et al. (2011): Hazard Detection in a Cooperative Assistance System).

Die Annahme, dass die Rollrate vor und nach einem Ausweichen nur begrenzte Zeit Null ist, führt zu einer Begrenzung der durch Gleichung (5.70) beschriebenen Bereiche mit $\dot{\lambda}_{\text{Muster}} = 0 \text{ }^\circ/\text{s}$ jeweils auf die Dauer $t = T/2$ vor und nach den Bereichen mit $\dot{\lambda}_{\text{Muster}} \neq 0 \text{ }^\circ/\text{s}$. Abbildung 5.7 (rechts) zeigt den Verlauf der durch Gleichung (5.70) beschriebenen Rollrate $\dot{\lambda}_{\text{Muster}}$ (mit genannter Begrenzung). Zusätzlich ist das Integral der Musterfunktion, d. h. der Rollwinkel λ_{Muster} , dargestellt. Dies zeigt, dass die in Gleichung (5.68) definierte Bedingung erfüllt ist.

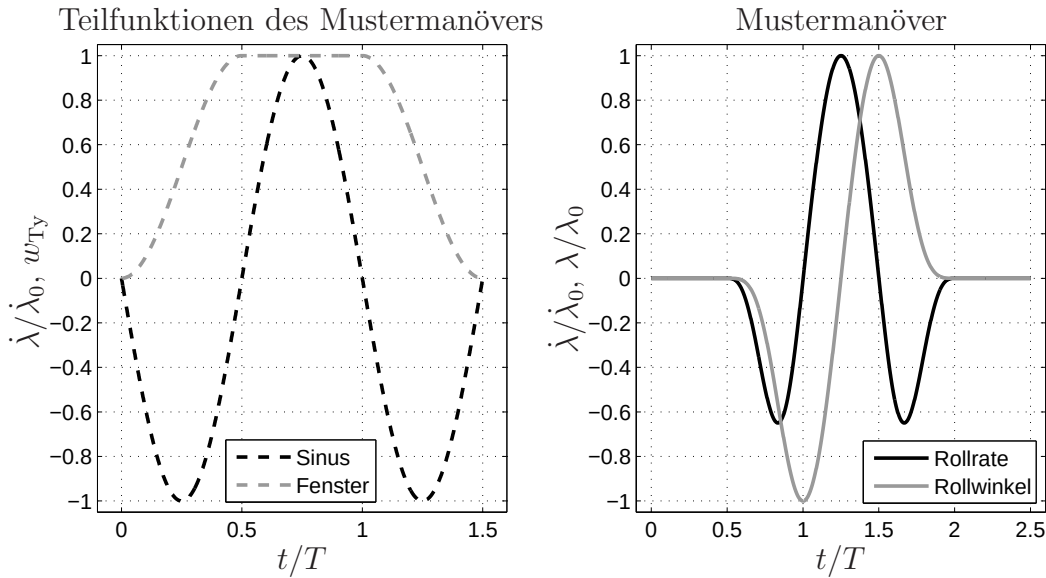


Abbildung 5.7: links: Teilfunktionen des Mustermanövers („Sinus“, „Fenster“), rechts: Musterfunktion (Rollrate) und Integral der Musterfunktion (Rollwinkel), jeweils amplitudennormiert

Bestimmung eines Korrelationskoeffizienten

Der Korrelationskoeffizient ist nach Ohm ein Maß für Ähnlichkeit zweier Signalverläufe⁶⁶. Dieser ist für die Signale Rollrate des Mustermanövers $\dot{\lambda}_{\text{Muster}}$ und Rollrate einer Messung $\dot{\lambda}_{\text{Mess}}$ wie folgt in Abhängigkeit der Signalverschiebung τ definiert:

$$c^* = \frac{(\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}}\dot{\lambda}_{\text{Mess}}}(\tau))^2}{\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}}\dot{\lambda}_{\text{Muster}}}(\tau) \cdot \Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Mess}}\dot{\lambda}_{\text{Mess}}}(\tau)} \quad (5.71)$$

$\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}}\dot{\lambda}_{\text{Mess}}}$ steht für die Kreuzkorrelationsfunktion der Signale Rollrate des Mustermanövers $\dot{\lambda}_{\text{Muster}}$ und Rollrate einer Messung $\dot{\lambda}_{\text{Mess}}$. Demnach gilt:

$$\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}}\dot{\lambda}_{\text{Mess}}}(\tau) = \lim_{t_F \rightarrow \infty} \frac{1}{t_F} \int_0^{t_F} \dot{\lambda}_{\text{Muster}}(t) \cdot \dot{\lambda}_{\text{Mess}}(t + \tau) dt \quad (5.72)$$

⁶⁶Ohm et al. (2010): Signalübertragung, S. 206

Die Autokorrelationsfunktion $\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}} \dot{\lambda}_{\text{Muster}}}$ des Signals Rollrate des Mustermanövers $\dot{\lambda}_{\text{Muster}}$ wird wie folgt bestimmt:

$$\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}} \dot{\lambda}_{\text{Muster}}}(\tau) = \lim_{t_F \rightarrow \infty} \frac{1}{t_F} \int_0^{t_F} \dot{\lambda}_{\text{Muster}}(t) \cdot \dot{\lambda}_{\text{Muster}}(t + \tau) dt \quad (5.73)$$

Analog dazu erfolgt die Bestimmung der Autokorrelationsfunktion des gemessenen Rollrate $\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Mess}} \dot{\lambda}_{\text{Mess}}}$.

Herleitung eines Kriteriums zur Erkennung von Ausweichmanövern

Der Korrelationskoeffizient nach Gleichung (5.71) ist ein Maß für die Ähnlichkeit der Signale Rollrate des Mustermanövers $\dot{\lambda}_{\text{Muster}}$ und Rollrate einer Messung $\dot{\lambda}_{\text{Mess}}$. Dieser gibt somit den Grad der Ähnlichkeit von tatsächlichem Manöver und Muster (bezüglich der beiden genannten Signale) an. Nach Gleichung (5.71) ist die „Ähnlichkeit“ abhängig von Verlauf und Betrag der Signale. Demnach ist es möglich, dass Manöver mit einem „ähnlichen“ Rollratenverlauf, aber „kleinen“ Amplituden, zu „relativ großen“ Korrelationskoeffizienten führen. Um dies zu berücksichtigen, wird der Korrelationsfaktor c_{RR} eingeführt:

$$c_{\text{RR}} = \frac{(\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}} \dot{\lambda}_{\text{Mess}}})^2}{\max(\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}} \dot{\lambda}_{\text{Muster}}}, \Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Mess}} \dot{\lambda}_{\text{Mess}}}) \cdot \Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}} \dot{\lambda}_{\text{Muster}}}} \quad (5.74)$$

Im Unterschied zu Gleichung (5.71) erfolgt mindestens eine Division durch den Korrelationswert $\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}} \dot{\lambda}_{\text{Muster}}}$ des Mustermanövers. Dadurch werden „große“ Werte bei „ähnlichen“ Manövern mit „kleinen“ Amplituden vermieden.

Analog zu Gleichung (5.74) lässt sich durch einen Vergleich des basierend auf Messdaten geschätztem Rollwinkels λ_{Mess} (siehe auch Abschnitt 4.4) und des integrierten Verlaufes der Musterfunktion (Musterrollwinkel λ_{Muster}) folgender zweiter Korrelationsfaktor c_{RW} bestimmen:

$$c_{\text{RW}} = \frac{(\Psi_{\lambda_{\text{Muster}} \lambda_{\text{Mess}}})^2}{\max(\Psi_{\lambda_{\text{Muster}} \lambda_{\text{Muster}}}, \Psi_{\lambda_{\text{Mess}} \lambda_{\text{Mess}}}) \cdot \Psi_{\lambda_{\text{Muster}} \lambda_{\text{Muster}}}} \quad (5.75)$$

Für eine Verwendung der beiden Korrelationsfaktoren als Erkennungskriterium für Ausweichmanöver ist erforderlich, dass sich die bei realen Ausweichmanövern ermittelten Maximalwerte der Faktoren⁶⁷ von den bei anderen Manövern ermittelten Werten unterscheiden. Vorversuche ergaben, dass die Verwendung eines einzelnen Faktors diese Anforderung nicht immer erfüllt. Daher wird unter Verwendung der Grenzwerte $c_{\text{RR,grenz}}$ und $c_{\text{RW,grenz}}$ folgende Bedingung als Kriterium zur Erkennung von Ausweichmanövern definiert:

$$(c_{\text{RR}} \geq c_{\text{RR,grenz}}) \cap (c_{\text{RW}} \geq c_{\text{RW,grenz}}) \rightarrow \text{Ausweichen} \quad (5.76)$$

⁶⁷Da die Korrelationsfaktoren kontinuierlich bestimmt werden, ist der Maximalwert entscheidend.

5.4.3 Hypothesenbildung

Nach Gleichung (5.76) wird ein Manöver, bei dem die beiden Korrelationsfaktoren c_{RR} und c_{RW} für mindestens ein Muster⁶⁸ die Grenzwerte $c_{RR,grenz}$ und $c_{RW,grenz}$ überschreiten, als Ausweichmanöver interpretiert. Dies liefert folgende universelle Hypothese:

Hypothese 3: Die Grenzwerte $c_{RR,grenz}$ und $c_{RW,grenz}$ der durch Gleichung (5.76) beschriebenen Bedingung sind so groß, dass diese für alle Ausweichmanöver bei mindestens einem Muster erfüllt und gleichzeitig für jedes andere Manöver bei jedem verwendeten Muster nicht erfüllt wird.

5.4.4 Beispiele für Mustermanöver

Abbildung 5.8 zeigt zwei Beispiele für Mustermanöver nach Gleichung (5.70), deren Parameter im Bereich eines „typischen“ Ausweichmanövers (Definition siehe Abschnitt 5.4.2) liegen. Für die Parameter Amplitude $\dot{\lambda}_0$ und Periodendauer T gilt⁶⁹:

- Muster 1: $\dot{\lambda}_0 = 67,5^\circ/\text{s}$, $T = 1,65 \text{ s}$
- Muster 2: $\dot{\lambda}_0 = 45,0^\circ/\text{s}$, $T = 2,90 \text{ s}$

Neben ganzen sind auch halbe Mustermanöver möglich. Werden diese mit den gemessenen Verläufen von Rollrate sowie Rollwinkel verglichen und zur Bestimmung der beiden Korrelationsfaktoren c_{RR} und c_{RW} verwendet, so halbiert dies die Erkennungszeit. Daher sind die halben Mustermanöver ebenfalls in Abbildung 5.8 dargestellt.

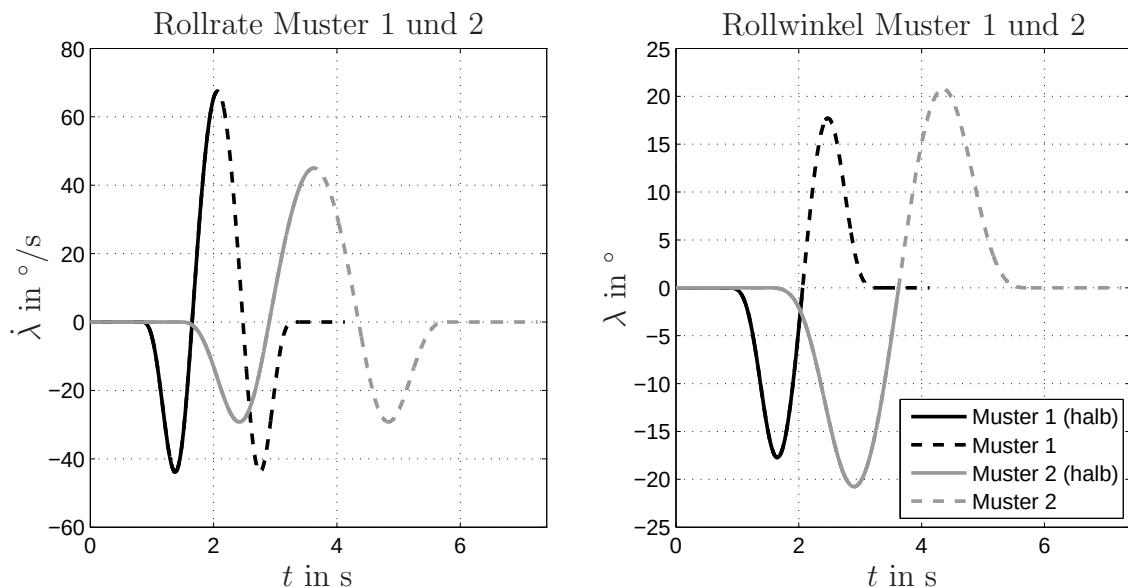


Abbildung 5.8: Beispiele für zwei ganze und zwei halbe Mustermanöver

⁶⁸Die Verwendung eines einzigen Musters ist nicht zwingend erforderlich.

⁶⁹Bei der Auswahl der Parameter ist eine Rückkehr zur ursprünglich geplanten Fahrspur berücksichtigt.

6 Evaluierung der Erkennungsmethoden

Kapitel 5 beschreibt Möglichkeiten zur Erkennung der in Kapitel 3 identifizierten Gefahrstellen. Dies beinhaltet etablierte Verfahren zur Erkennung von Niedrigreibwert, Reibwertsprüngen und kritischen Kurvenfahrsituationen (Abschnitt 5.1) sowie neue Verfahren zur Erkennung von Fahrbahnunebenheiten (Abschnitt 5.2), Fahrbahnschäden (Abschnitt 5.3) und Ausweichmanövern (Abschnitt 5.4). Dieses Kapitel behandelt die Evaluierung letztgenannter Verfahren zur Erkennung folgender Gefahren:

- Unebene Fahrbahn (siehe Abschnitt 6.1)
- Einzelne Fahrbahnschäden (siehe Abschnitt 6.2)
- Ausweichmanöver (siehe Abschnitt 6.3)

6.1 Unebene Fahrbahn

6.1.1 Validierungsversuche

Für eine Bewährung der in Abschnitt 5.2.5 definierten Hypothese 1 ist erforderlich, dass ein Grenzwert $\gamma_{U,\Delta s,\text{grenz}}$ auf Fahrbahnen mit $AUN \geq 18 \text{ cm}^3$ immer und auf solchen mit $AUN < 9 \text{ cm}^3$ nicht überschritten wird. Daher werden zur Überprüfung der Hypothese zum einen Fahrbahnabschnitte mit AUN -Werten unterhalb des Warnwertes ($AUN_W = 9 \text{ cm}^3$) und zum anderen solche oberhalb des Schwellwertes ($AUN_S = 18 \text{ cm}^3$) untersucht. Die Strecken werden anhand von Straßenzustandskarten ausgewählt¹. Um die Ergebnisse der γ_U -Bestimmung zu bewerten, wird für die untersuchten Strecken der AUN -Wert mit einer Referenzsensorik ermittelt.

Bestimmung der AUN -Werte der Strecken (Referenzgröße)

Die Referenzgrößen werden basierend auf dem Verlauf der Vertikalbeschleunigung $a_{Z,ADMA}$ bestimmt, die mit der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Faserkreisel-Inertialmesseinheit ADMA gemessen wird. Der ADMA ist dafür auf einem von einem Pkw gezogenen Anhänger befestigt, dessen Radstand $l = 0,15 \text{ m}$ beträgt. Damit Anregungen von der Fahrbahn möglichst direkt übertragen werden, sind die Achsen starr am Aufbau befestigt und die Reifen in Vollgummi ausgeführt.

Für die Bestimmung des AUN -Wertes wird kontinuierlich basierend auf dem Verlauf der Vertikalbeschleunigung $a_{Z,ADMA}$ über eine Strecke von $\Delta s = 100 \text{ m}$ die spektrale Leistungsdichte im Zeitkreisfrequenz-Bereich $\Phi_{P,ADMA}(\omega)$ berechnet. Nach Gleichung (5.38) folgt daraus durch Multiplikation mit der (konstanten) Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X

¹Diese enthalten u. a. den AUN -Wert. Die Aktualisierung erfolgt alle vier Jahre.

die spektrale Leistungsdichte im Wegkreisfrequenz-Bereich $\check{\Phi}_{\text{P,ADMA}}(\Omega)$. Diese wird, wie in DIN 13036-5 beschrieben, geglättet².

Um Zufallsfehler zu verringern, wird dabei zuerst ein Drei-Punkt-Glättungsverfahren auf die gesamte Leistungsdichte $\check{\Phi}_{\text{P,ADMA}}(\Omega)$ angewendet. Eine Mittelwertbildung dieser dreipunkt-geglätteten Leistungsdichte in vorgegebenen Frequenzbändern, deren Bandbreiten mit der Frequenz zunehmen, ergibt die geglättete spektrale Leistungsdichte $\check{\Phi}_{\text{P,ADMA,glatt}}(\Omega)$. Eine Approximation dieser nach der Methode der kleinsten Quadrate liefert in Anlehnung an Gleichung (5.34) folgende Geradengleichung³:

$$\check{\Phi}_{\text{P,ADMA,glatt}}(\Omega) = \check{\Phi}_{\text{P,ADMA,glatt}}(\Omega_0) \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-\check{w}_{\text{ADMA}}} \quad (6.1)$$

Da Gleichung (6.1) die spektrale Leistungsdichte der Vertikalbeschleunigung und nicht der Vertikalauslenkung beschreibt, ergeben sich die Kenngrößen AUN -Wert und Welligkeit $\check{w}$ der Fahrbahn wie folgt:

$$AUN = \check{\Phi}_{\text{P,ADMA,glatt}}(\Omega_0) \quad (6.2)$$

$$\check{w} = \check{w}_{\text{ADMA}} - 4 \quad (6.3)$$

Die Messdatenaufzeichnung erfolgt mit konstanter Fahrzeuglängsgeschwindigkeit von $v_x = 2,5 \text{ m/s} = 12 \text{ km/h}$ bei einer Abtastfrequenz von $f_0 = 100 \text{ Hz}$. In Abhängigkeit des Streckenabschnittes Δs , über den gemittelt wird, und des Radstandes l ergeben sich folgende erfasste Wegkreisfrequenzbereiche:

$$\Omega_{\min} = \frac{2\pi}{L_{\max}} = \frac{2\pi}{\Delta s} \quad (6.4)$$

$$\Omega_{\max} = \frac{2\pi}{L_{\min}} = \frac{2\pi}{2 \cdot l} = 20,9 \frac{1}{\text{m}} \quad (6.5)$$

Bestimmung einer Referenzgröße AUN_{20}

Abweichend von der Definition des AUN -Wertes ist auch eine Bestimmung der Leistungsdichte $\check{\Phi}_{\text{P,ADMA,glatt}}(\Omega)$ über kürzere Streckenabschnitte als $\Delta s = 100 \text{ m}$ möglich. In dieser Arbeit erfolgt daher zusätzlich eine Bestimmung über Streckenabschnitte von $\Delta s = 20 \text{ m}$ (bei ansonsten gleicher Vorgehensweise). Das daraus resultierende Unebenheitsmaß wird als AUN_{20} bezeichnet. Dies ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit mit dem Kriterium $\mathcal{R}_U$, wenn dieses auch nur über $\Delta s = 20 \text{ m}$ bestimmt wird und somit eine schnellere Auslösung einer Warnnachricht ermöglicht.

Versuchsstrecken

Für die untersuchten Strecken zeigt Abbildung 6.1 die Verläufe der Unebenheitsmaße AUN und AUN_{20} . Strecke 1 ist hinsichtlich der Unebenheit die schlechteste der untersuchten Strecken ($\overline{AUN}_1 = 32,9 \text{ cm}^3$). Die Werte dieser Strecke sind typisch für schlechte Landstraßen mit Fahrbahnschäden⁴.

²DIN EN 13036-5 (2006): Oberflächeneigenschaften - Bestimmung der Längsunebenheit, S. 28 ff.

³bei doppellogarithmischer Darstellung

⁴Braun et al. (1991): Sammlung und Auswertung von Straßenunebenheitsdaten - Teil 1, S. 63

Strecke 3 ist diesbezüglich die beste Versuchsstrecke. Sie besitzt eine durchgängig sehr ebene Fahrbahn ($\overline{AUN}_3 = 1,1 \text{ cm}^3$, $\sigma_{AUN,rel,3} = 10\%$). Diese Werte liegen im Bereich der Werte einer guten Bundesstraße⁵. Strecke 2 ist schlechter als Strecke 3 ($\overline{AUN}_2 = 4,7 \text{ cm}^3$). Die Änderungen der Unebenheit sind im Vergleich zu Strecke 4 geringer ($\sigma_{AUN,2} = 27\%$, $\sigma_{AUN,4} = 67\%$). Diese weist gute und schlechte Fahrbahnabschnitte auf ($AUN_{min,4} = 1,3 \text{ cm}^3$, $AUN_{max,4} = 26,8 \text{ cm}^3$).

Tabelle 6.1 enthält diese und weitere Merkmale der untersuchten Strecken. Die entsprechenden Werte bei einer Verwendung des Unebenheitsmaßes AUN_{20} befinden sich in Tabelle A.11 im Anhang A.5.

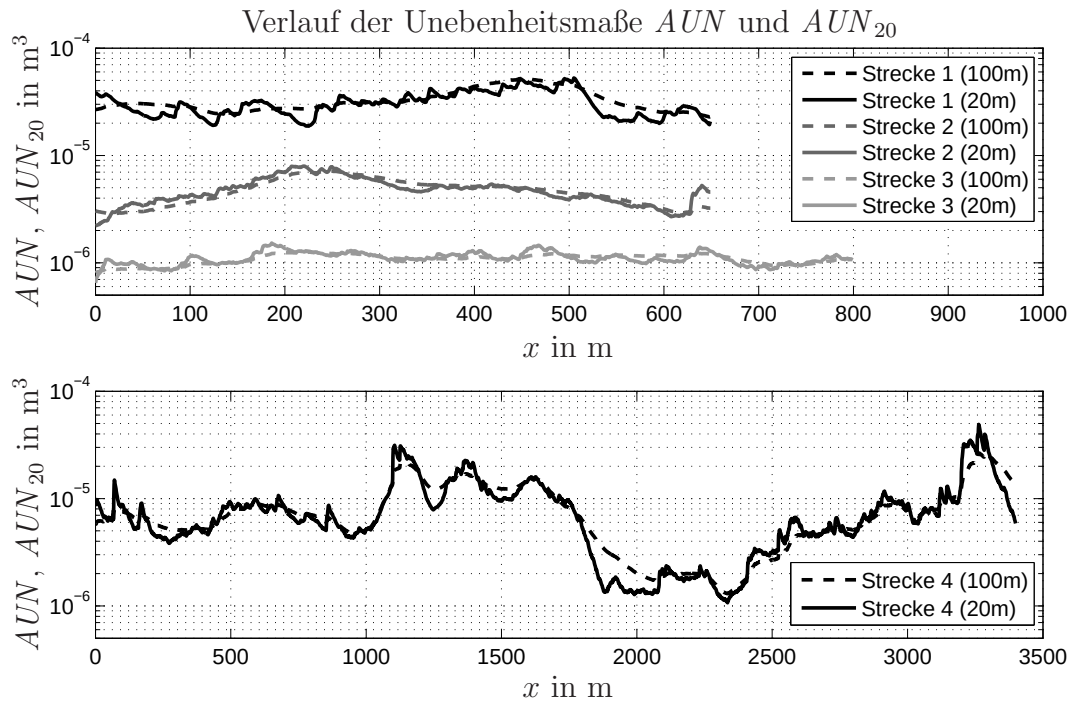


Abbildung 6.1: Verlauf der Unebenheitsmaße AUN und AUN_{20} für die vier untersuchten Strecken

Tabelle 6.1: Merkmale der untersuchten Strecken für $\Delta s = 100 \text{ m}$: Länge L , durchschnittliches Unebenheitsmaß $\overline{AUN}$, minimales Unebenheitsmaß AUN_{min} , maximales Unebenheitsmaß AUN_{max} , Standardabweichung des Unebenheitsmaßes σ_{AUN} (relativ zu $\overline{AUN}$)

Strecke	L in m	$\overline{AUN}$ in cm^3	AUN_{min} in cm^3	AUN_{max} in cm^3	$\sigma_{AUN,rel}$
S1	650	32,9	22,9	52,1	0,24
S2	650	4,7	2,8	7,2	0,27
S3	800	1,1	0,8	1,3	0,10
S4	3400	8,0	1,3	26,8	0,67

⁵Braun et al. (1991): Sammlung und Auswertung von Straßenunebenheitsdaten - Teil 1, S. 63

Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgt auf den beschriebenen vier Strecken. Die Vorgaben zur Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X bei Durchführung der Versuche betragen bei den Strecken S2, S3 und S4 jeweils 30 km/h, 50 km/h und 70 km/h⁶, bei Strecke S1 aus Sicherheitsgründen 30 km/h und 50 km/h. Der Versuchsfahrer ist angewiesen, die Geschwindigkeit möglichst konstant sowie ca. 1 m Abstand zur rechten Fahrbahnmarkierung zu halten. Bei einmaliger Wiederholung jeder Fahrt ergibt dies insgesamt 22 Versuchsfahrten. Tabelle 6.2 fasst die genannten Punkte zusammen und gibt die dazugehörigen Versuchsnummern an.

Tabelle 6.2: Vorgaben zur Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X bei Durchführung der Versuche zur Bewertung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ sowie dazugehörige Versuchsnummern

v_X in km/h	30	50	70
Strecke S1	V1, V2	V3, V4	/
Strecke S2	V5, V6	V7, V8	V9, V10
Strecke S3	V11, V12	V13, V14	V15, V16
Strecke S4	V17, V18	V19, V20	V21, V22

6.1.2 Ergebnisse

Mittelwertbildung über Streckenabschnitte von $\Delta s = 100$ m

Abbildung 6.2 zeigt die Verläufe des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ für alle auf Strecke 4 durchgeführten Versuche, gemittelt über Streckenabschnitte von $\Delta s = 100$ m und daher als $\mathcal{T}_{U,100}$ bezeichnet. Außerdem abgebildet ist die Referenzgröße AUN , die wie in Abschnitt 6.1.1 beschrieben ermittelt wird. Nach Abschnitt 5.2.4 unterscheidet sich diese bei Zutreffen aller Annahmen und Vereinfachungen vom Kriterium $\mathcal{T}_U$ nur in der Einheit, nicht aber im Wert. Die entsprechenden Verläufe für die Strecken S1, S2 und S3 sind im Anhang A.6 abgebildet.

Ein Vergleich der ermittelten Werte von $\mathcal{T}_{U,100}$ mit den Werten des AUN ermöglicht für die durchgeführten Versuche eine Aussage über den Grenzwert $\mathcal{T}_{U,\Delta s,\text{grenz}}$, d. h. den Wert von $\mathcal{T}_{U,100}$, der auf Fahrbahnen mit $AUN \geq 18 \text{ cm}^3$ mindestens erreicht wird. Nachfolgende Übersicht enthält daher für alle überfahrenen Streckenabschnitte mit $AUN \geq 18 \text{ cm}^3$, d. h. für die gesamte Strecke 1 und entsprechende Abschnitte von Strecke 4, die minimal ermittelten Werte $\mathcal{T}_{U,100}$:

Strecke S1				
	V1	V2	V3	V4
$\min(\mathcal{R}_{U,100})$ in m	$13,6 \cdot 10^{-6}$	$17,4 \cdot 10^{-6}$	$14,7 \cdot 10^{-6}$	$15,1 \cdot 10^{-6}$

Strecke S4						
	V17	V18	V19	V20	V21	V22
$\min(\mathcal{R}_{U,100})$ in m	$18,0 \cdot 10^{-6}$	$13,3 \cdot 10^{-6}$	$14,6 \cdot 10^{-6}$	$13,7 \cdot 10^{-6}$	$13,0 \cdot 10^{-6}$	$14,2 \cdot 10^{-6}$

⁶Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass auf Strecken mit $AUN \geq 18 \text{ cm}^3$ nicht schneller gefahren wird. Die Beurteilungen von Versuchsfahrern auf den Strecken S 1 und S 4 bestätigen dies. Eine Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ ist bei höheren Geschwindigkeiten dann nicht mehr erforderlich.

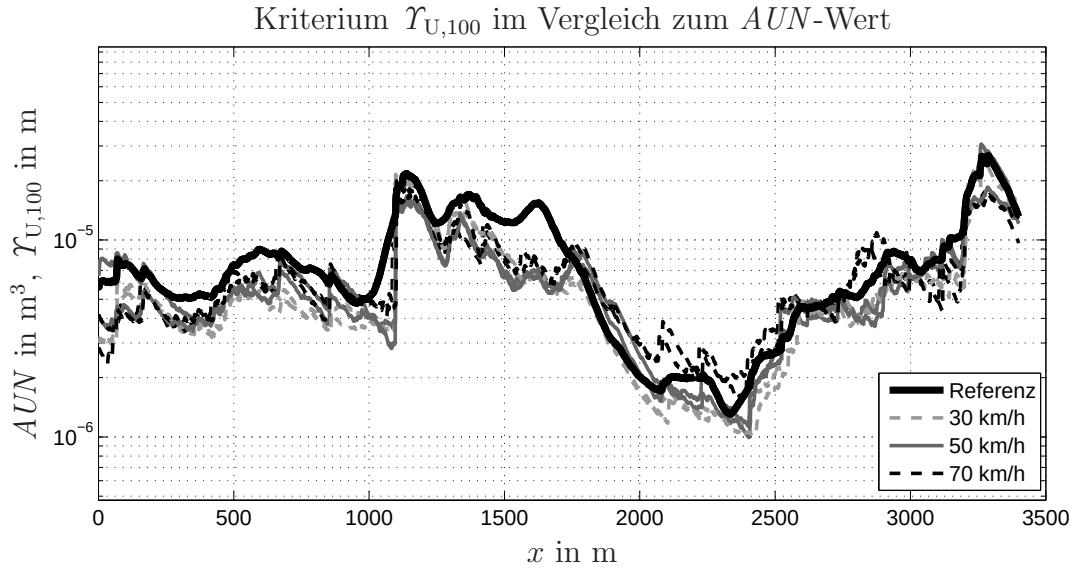


Abbildung 6.2: Kriterium $\mathcal{T}_{U,100}$ im Vergleich zum AUN -Wert (Referenz) für Strecke 4

Demnach gilt für alle untersuchten Streckenabschnitte mit $AUN \geq 18 \text{ cm}^3$:

$$\mathcal{T}_{U,100} \geq 13,0 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (6.6)$$

Für die Strecken S2 und S3, bei denen $AUN < 9 \text{ cm}^3$ ist, sind die maximal ermittelten Werte $\mathcal{T}_{U,100}$ nachfolgend aufgelistet:

Strecke S2						
	V5	V6	V7	V8	V9	V10
$\max(\mathcal{T}_{U,100}) \text{ in m}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$9,2 \cdot 10^{-6}$

Strecke S3						
	V11	V12	V13	V14	V15	V16
$\max(\mathcal{T}_{U,100}) \text{ in m}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$

Der Wert von $\mathcal{T}_{U,100}$ aus Gleichung (6.6) wird auf den „durchgängig guten“ Strecken S2 und S3 nicht überschritten. Dies führt zur Festlegung des folgenden Grenzwertes⁷ $\mathcal{T}_{U,100,\text{grenz}}$:

$$\mathcal{T}_{U,100,\text{grenz}} = 13,0 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (6.7)$$

Strecke S4 besteht aus Abschnitten, die u. a. die AUN -Bereiche der Strecken S1, S2 und S3 abdecken, d. h. es gibt Übergänge zwischen „guten“ und „schlechten“ Bereichen. Daher wird der AUN -Wert auf allen Streckenabschnitten, bei denen der Grenzwert $\mathcal{T}_{U,100,\text{grenz}}$ aus Gleichung (6.7) überschritten wird, analysiert. Nachfolgend sind die dabei mindestens vorliegenden AUN -Werte aufgelistet:

Strecke S4						
	V17	V18	V19	V20	V21	V22
$\min(AUN) \text{ in cm}^3$	12,8	12,9	13,1	13,7	13,1	13,3

⁷Der Grenzwert $\mathcal{T}_{U,100,\text{grenz}}$ entspricht demnach dem Wert von $\mathcal{T}_{U,100}$, der auf Fahrbahnen mit $AUN \geq 18 \text{ cm}^3$ mindestens erreicht wird.

Demnach gilt für alle untersuchten Streckenabschnitte, auf denen der Grenzwert $\mathcal{T}_{U,100,\text{grenz}}$ überschritten wird:

$$AUN \geq 12,8 \text{ cm}^3 \quad (6.8)$$

Dies liefert den Grenzwert AUN_{grenz} , d. h. den AUN -(Referenz-)Wert, der auf den untersuchten Streckenabschnitten mindestens vorliegt, wenn der Grenzwert $\mathcal{T}_{U,100,\text{grenz}}$ überschritten wird:

$$AUN_{\text{grenz}} = 12,8 \text{ cm}^3 \quad (6.9)$$

Dies bedeutet, dass bei Falscherkennungen ($AUN < 18 \text{ cm}^3$ und $\mathcal{T}_{U,100} \geq 13,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$) auf den untersuchten Streckenabschnitten mindestens ein Unebenheitsmaß von $AUN_{\text{grenz}} = 12,8 \text{ cm}^3$ vorliegt.

Mittelwertbildung über Streckenabschnitte von $\Delta s = 20 \text{ m}$

Abbildung 6.3 zeigt die Verläufe des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ für alle auf Strecke 4 durchgeführten Versuche, gemittelt über Streckenabschnitte von $\Delta s = 20 \text{ m}$ und daher als $\mathcal{T}_{U,20}$ bezeichnet. Außerdem abgebildet ist die Referenzgröße AUN_{20} . Die entsprechenden Verläufe für die Strecken S1, S2 und S3 sind im Anhang A.6 dargestellt.

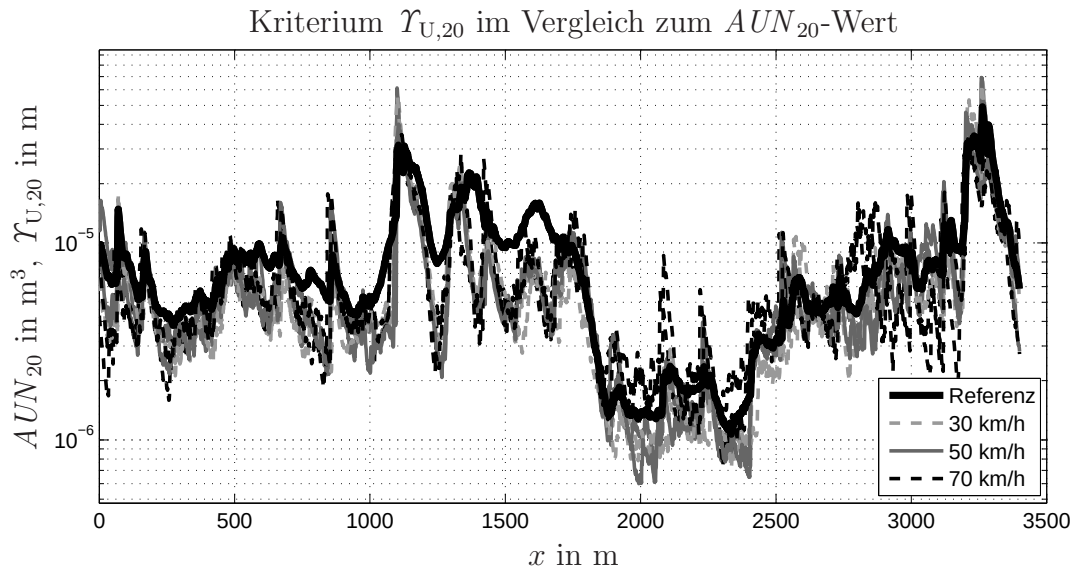


Abbildung 6.3: Kriterium $\mathcal{T}_{U,20}$ im Vergleich zum AUN_{20} -Wert (Referenz) für Strecke 4

Analog zum Vorgehen im vorherigen Abschnitt ergibt sich für $\Delta s = 20 \text{ m}$ aus den genannten Verläufen der folgende Grenzwert⁸ $\mathcal{T}_{U,20,\text{grenz}}$:

$$\mathcal{T}_{U,20,\text{grenz}} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (6.10)$$

Daraus folgt der Grenzwert $AUN_{20,\text{grenz}}$:

$$AUN_{20,\text{grenz}} = 1,3 \text{ cm}^3 \quad (6.11)$$

⁸Der Grenzwert $\mathcal{T}_{U,20,\text{grenz}}$ entspricht demnach dem Wert von $\mathcal{T}_{U,20}$, der auf Fahrbahnen mit $AUN_{20} \geq 18 \text{ cm}^3$ mindestens erreicht wird.

Dies bedeutet, dass bei Falscherkennungen ($AUN_{20} < 18 \text{ cm}^3$ und $\mathcal{T}_{U,20} \geq 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}$) auf den untersuchten Streckenabschnitten mindestens ein Unebenheitsmaß von $AUN_{20,\text{grenz}} = 1,3 \text{ cm}^3$ vorliegt.

Die ausschließliche Berücksichtigung von Strecke 1 zur Festlegung des Grenzwertes $\mathcal{T}_{U,20,\text{grenz}}$ liefert:

$$\mathcal{T}_{U,20,\text{grenz}} = 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (6.12)$$

Hierfür ergibt sich folgender Grenzwert $AUN_{20,\text{grenz}}$:

$$AUN_{20,\text{grenz}} = 3,1 \text{ cm}^3 \quad (6.13)$$

Dies bedeutet, dass bei Falscherkennungen ($AUN_{20} < 18 \text{ cm}^3$ und $\mathcal{T}_{U,20} \geq 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$) auf den untersuchten Streckenabschnitten mindestens ein Unebenheitsmaß von $AUN_{20,\text{grenz}} = 3,1 \text{ cm}^3$ vorliegt.

6.1.3 Fazit

Die Versuche ergeben bei Mittelwertbildung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ über einen Streckenabschnitt von $\Delta s = 100 \text{ m}$ einen Grenzwert von $\mathcal{T}_{U,100,\text{grenz}} = 13,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Bei den durchgeführten Versuchen liegt bei Überschreiten dieses Wertes mindestens ein Grenzwert des Unebenheitsmaßes von $AUN_{\text{grenz}} = 12,8 \text{ cm}^3$ vor. Dieser liegt über dem Warnwert von $AUN_W = 9 \text{ cm}^3$. Demnach hat sich **Hypothese 1** für $\Delta s = 100 \text{ m}$ **bewährt**.

Die Versuche ergeben bei Mittelwertbildung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ über einen Streckenabschnitt von $\Delta s = 20 \text{ m}$ und ausschließlicher Berücksichtigung von Strecke S1 einen Grenzwert von $\mathcal{T}_{U,20,\text{grenz}} = 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Bei den durchgeführten Versuchen liegt bei Überschreiten dieses Wertes mindestens ein Grenzwert des Unebenheitsmaßes von $AUN_{\text{grenz}} = 3,1 \text{ cm}^3$ vor. Dieser liegt deutlich unter dem Warnwert von $AUN_W = 9 \text{ cm}^3$. Demnach hat sich **Hypothese 1** für $\Delta s = 20 \text{ m}$ **nicht bewährt**. Bei zusätzlicher Berücksichtigung von Strecke 4 sind die Grenzwerte nochmals niedriger.

6.1.4 Diskussion

Das vorgestellte Verfahren zur Bewertung der Längsunebenheit einer Fahrbahn hat sich bei einer Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ mit $\Delta s = 100 \text{ m}$ bewährt, jedoch nicht mit $\Delta s = 20 \text{ m}$. Für eine Anwendung in einem kbW bedeutet dies, dass eine Warnung beispielsweise bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h frühestens nach 3,6 s (Fahrzeit für 100 m) möglich ist. Von den beiden in Abschnitt 1.3 vorgestellten Übertragungswegen, direkt oder über eine RSU, ist daher nur letztgenannter realisierbar.

Eine Möglichkeit zur schnelleren Generierung von Warnmeldungen ist die alleinige Auswertung von Grenzwertüberschreitungen. In den durchgeführten Versuchen wird beispielsweise spätestens nach 25 m Fahrt auf einem Streckenabschnitt mit $AUN \geq 18 \text{ cm}^3$ ein Wert von $\mathcal{T}_{U,20,\text{grenz}} = 20,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ überschritten. Dieser Wert wird auf keinem Abschnitt mit $AUN < 9 \text{ cm}^3$ erreicht. Somit besteht die Möglichkeit, den Beginn von „unebenen“ Fahrbahnabschnitten deutlich schneller zu erkennen (bei 100 km/h nach ca. 0,9 s). Mit drei Übergängen von „ebenen“ auf „unebene“ Fahrbahnabschnitte ist deren Anzahl in den durchgeführten Versuchen (alle auf Strecke S4, siehe auch Abbildung 6.3) allerdings zu gering, um eine belastbare Aussage zu treffen.

Die Auswahl der Strecken erfolgte so, dass der gesamte auf Landstraßen übliche Bereich des AUN -Wertes abgedeckt wird. Dies führte zu insgesamt vier Strecken und erlaubt eine Überprüfung von Hypothese 1. Einige Beobachtungen lassen sich damit allerdings nicht erklären. Beispielsweise treten auf Strecke S4 bei $x \approx 1400$ m bis $x \approx 1750$ m deutlich größere Differenzen zur Referenz auf als auf anderen Abschnitten (siehe auch Abbildungen 6.2 und 6.3). Bei den Versuchen auf Strecke S2 mit $v_X = 70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ist die Differenz der ermittelten Werte von $\mathcal{T}_U$ zur Referenz deutlich geringer als bei den Versuchen mit $v_X = 30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und mit $v_X = 50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ (Abweichungen: einstelliger im Vergleich zu mittlerer zweistelliger Prozentbereich).

Eine mögliche Ursache sind Frequenzanteile, die aufgrund der Bandpassfilterung nur geringen Einfluss auf den Wert des Kriteriums $\mathcal{T}_U$, aber gleichzeitig einen nicht vernachlässigbaren Anteil an der gesamten Signalleistung haben. Eine Untersuchung der genannten Beispiele bestätigt dies. Für eine belastbare Aussage sind weitere Versuche erforderlich. Dabei sind die Gültigkeit der Approximation der Leistungsdichte durch eine Gerade⁹ und ggf. die Erweiterung des Frequenzbandes durch Berücksichtigung des Übertragungsverhaltens des Reifens zu untersuchen¹⁰.

Bei den Evaluierungsversuchen wurden alle Strecken mehrmals mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten befahren. Kein Versuchsergebnis widerspricht den in Abschnitt 6.1.3 getroffenen Aussagen. Daher wird von einer Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ausgegangen. Alle Versuche basieren auf Messdaten, die mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Versuchsmotorrad aufgenommen wurden. Ein anderes Motorrad kam nicht zum Einsatz. Damit sind die ermittelten Ergebnisse nur für das erwähnte Motorrad gültig. Grundlegende Annahme zur Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ ist das neutrale Radübertragungsverhalten von Fahrbahnnunebenheiten auf Radvertikalbewegungen. Wie in Abschnitt 5.2.4 beschrieben, ist diese Annahme für die untersuchten Frequenzbereiche gültig. Dies deutet auf eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Motorräder hin. Die Objektivität der Ergebnisse ist durch die Bestimmung des von subjektiven Bewertungen unabhängigen Kriteriums $\mathcal{T}_U$ gegeben.

Abbildung A.4 im Anhang A.5 zeigt die Referenzgrößen AUN und AUN_{20} im Vergleich zu den basierend auf den ADMA-Messungen bestimmten Werten des Kriteriums $\mathcal{T}_{U,ADMA}$ für alle untersuchten Strecken¹¹. Eine lineare Regression ergibt Vergrößerungsfaktoren von 0,62 bzw. 0,75. Demnach entspricht der Wert des Kriteriums $\mathcal{T}_{U,100}$ (bzw. $\mathcal{T}_{U,20}$) nicht dem des AUN -Wertes (bzw. des AUN_{20} -Wertes). Die durchschnittliche Abweichung von der Regressionsgeraden beträgt $1,9 \cdot 10^{-6}$ m bzw. $2,4 \cdot 10^{-6}$ m (*root-mean-square error*). Daher wird angenommen, dass die Werte von $\mathcal{T}_U$ und AUN zwar nicht gleich sind, das Kriterium $\mathcal{T}_U$ aber ein Maß für die Unebenheit einer Fahrbahn ist.

Bestätigt wird dies durch einen Vergleich von Grenzwert AUN_{grenz} und Warnwert AUN_W . Deren Differenz beträgt $3,8 \text{ cm}^3$ (siehe auch Abschnitt 6.1.2). Daher wird davon ausgegangen, dass sich Hypothese 1 für $\Delta s = 100$ m auch bei Versuchen auf Fahrbahnen bewährt,

⁹Liefert eine Geraden-Approximation der Leistungsdichte über den gesamten in Abschnitt 5.2.3 genannten gültigen Frequenzbereich von $\Omega = 0,2 \dots 50 \text{ 1/m}$ nicht „vergleichbare“ Ergebnisse wie eine Approximation über ein anteiliges Frequenzband, so führt dies zu unterschiedlichen AUN -Werten.

¹⁰Eine Erweiterung des Frequenzbereiches bedeutet, dass die Annahme des neutralen Übertragungsverhaltens der Fahrbahnanregung auf die Radvertikalbeschleunigung nicht mehr gerechtfertigt ist.

¹¹Für diesen Vergleich wird das Kriterium $\mathcal{T}_U$ basierend auf $a_{Z,ADMA}$ und nicht $a_{Z,W}$ bestimmt.

deren AUN -Werte näher am Warnwert liegen als hier mit $AUN_{\max} = 7,2 \text{ cm}^3$ (Strecke S2) untersucht. Eine ausreichende Reliabilität für eine Verwendung in einem kbW ist somit bei $\Delta s = 100 \text{ m}$ gegeben. Von einer Bestimmung des AUN -Wertes mit vergleichbarer Genauigkeit wie bei den genauesten in Abschnitt 5.2.1 vorgestellten Verfahren¹² ist allerdings nicht auszugehen.

6.2 Einzelne Fahrbahnschäden

Für eine Bewährung der in Abschnitt 5.3.3 aufgestellten Hypothese 2 ist ein eindeutiger Zusammenhang von Kriterium $\mathcal{T}_S$ und Warngeschwindigkeit v_{warn} erforderlich. Nach den Anforderungen in Abschnitt 5.3.2 bedeutet dies, dass jedem Einzelschaden unabhängig von dessen Länge, Höhe und Form eindeutig, also auch unabhängig von der Überfahrgeschwindigkeit v_X , ein Wert des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ zugeordnet werden kann. Um des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ in Zusammenhang mit der „Gefährlichkeit“ eines Einzelschadens zu bringen, ist nach Abschnitt 5.3.3 die Bestimmung der Warngeschwindigkeit v_{warn} erforderlich. Daraus leiten sich folgende zu untersuchende Punkte hinsichtlich einer Überprüfung von Hypothese 2 ab:

- **Zuordnung von Warngeschwindigkeiten** v_{warn} zu einem möglichst großen Spektrum von Einzelschäden als Referenzmaß für deren Gefährlichkeit
- Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ bei Überfahrt über Einzelschäden mit unterschiedlichen Fahrzeuglängsgeschwindigkeiten zur Überprüfung der **Unabhängigkeit von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit**

6.2.1 Validierungsversuche

Untersuchungsbasis

Ausgangspunkt für die Untersuchungen sind die Beschreibungen von Einzelschäden in Abschnitt 5.3.1. Demnach unterscheiden sich Einzelschäden in folgenden Merkmalen:

- Länge L
- Höhe h
- Form: kantig, rund, hinein-/herausragend

Die Forderung, ein möglichst großes Spektrum von Einzelschäden abzubilden, führt zu den in Abbildung 6.4 dargestellten und in Tabelle 6.3 näher beschriebenen Einzellhindernissen.

¹²Die Fehler bei diesen Verfahren sind teilweise kleiner als 10%.

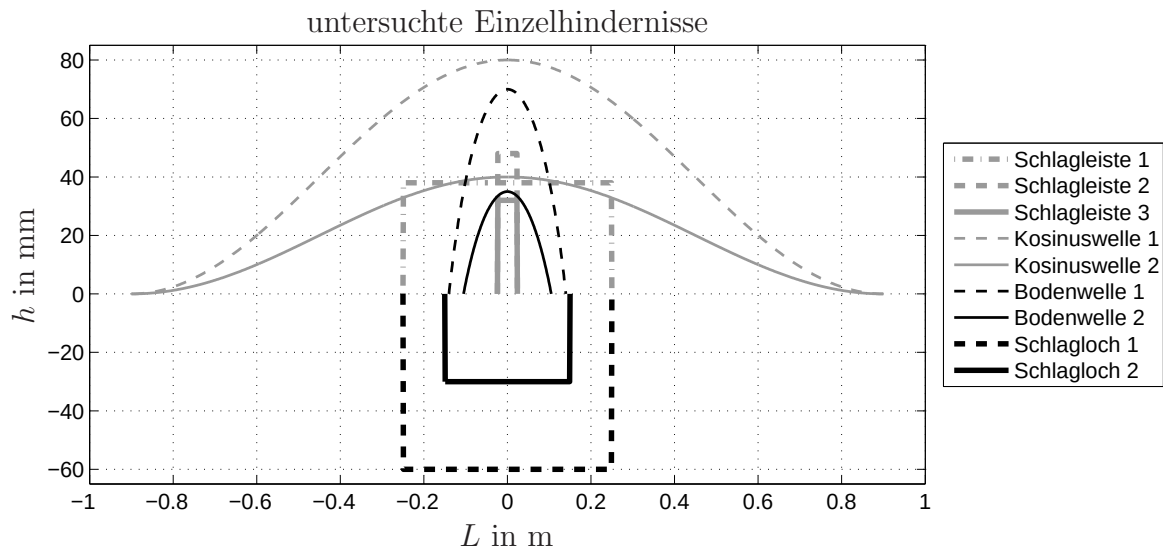


Abbildung 6.4: Einzelhindernisse zur Abbildung von Einzelschäden

Tabelle 6.3: Höhe h und Länge L von Einzelhindernissen zur Abbildung von Einzelschäden sowie Vorgaben zu Überfahrgeschwindigkeiten in einer Probandenstudie

Nr.	Bezeichnung	h in mm	L in m	v_X in km/h
1	Schlagleiste 1	38	0,5	30, 40, 50, 60
2	Schlagleiste 2	48	0,048	20, 30, 40, 50
3	Schlagleiste 3	32	0,048	20, 30, 40, 50
4	Kosinuswelle 1	80	1,8	20, 30, 40, 50
5	Kosinuswelle 2	40	1,8	30, 40, 50, 60, 70
6	Bodenwelle 1	70	0,28	10, 20, 30
7	Bodenwelle 2	35	0,21	20, 30, 40, 50, 60
8	Schlagloch 1	(-)60	0,5	10, 30, 50, 70
9	Schlagloch 2	(-)30	0,3	10, 30, 50, 70

Versuche zur Zuordnung von Warngeschwindigkeiten

Die Zuordnung von Warngeschwindigkeiten zu den Einzelschäden basiert auf der Durchführung einer Probandenstudie. In der Studie fahren 13 Motorradfahrer¹³ mehrfach bei vorgegebener Zunahme der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X über die genannten Einzelschäden. Nach jedem Einzelschaden bewerten die Probanden, bei welcher der gefahrenen Geschwindigkeiten sie bei Zufahrt auf einen solchen Schaden gewarnt werden wollen. Diese Geschwindigkeit wird als Warngeschwindigkeit v_{warn} definiert.

Bei der Auswahl der vorgegebenen Fahrzeuglängsgeschwindigkeiten ergibt sich die untere Grenze aus der Anforderung, dass die Geschwindigkeit höher als Schrittgeschwindigkeit ist (d. h. $v_X \geq 10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$) und dass sich die Amplitude der gemessenen Radvertikalbeschleunigung

¹³Weitere Informationen zur Probandenauswahl sind in Abschnitt 8.1.1 aufgeführt. Aus Sicherheitsgründen beschränkt sich die Studie auf erfahrene Motorradfahrer, d. h. Probanden der Gruppen G3 und G4.

betragsmäßig deutlich von der Fahrbahnanregung unterscheidet (d. h. $|a_{z,w}| \geq 15 \frac{m}{s^2}$). Aus einer Expertenvorbewertung und dem Messbereich des verwendeten Radvertikalbeschleunigungssensors (siehe auch Abschnitt 4.2) resultiert die obere Grenze. Dadurch wird sichergestellt, dass die Überfahrten für Probanden ungefährlich sind und zusätzlich wird die Wahrscheinlichkeit von Messbereichsüberschreitungen (Sensor-Clipping) minimiert. Die hieraus abgeleiteten Geschwindigkeitsvorgaben für die Probandenversuche sind in Tabelle 6.3 aufgeführt.

Versuche zur Analyse der Abhängigkeit von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit

Die Versuche zur Analyse der Abhängigkeit des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X basieren ebenfalls auf den bereits beschriebenen Einzelschäden. Das Versuchskonzept sieht eine dreimalige Überfahrt mit den in Tabelle 6.4 angegebenen Geschwindigkeiten vor. Die Auswahl der Geschwindigkeitsbereiche basiert auf den gleichen Kriterien wie bei den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Probandenversuchen.

Tabelle 6.4: Überfahrtschwindigkeiten von Einzelschäden in Versuchen zur Analyse der Abhängigkeit des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit

Nr.	Bezeichnung	v_X in km/h
1	Schlagleiste 1	30, 40, 50, 60
2	Schlagleiste 2	15, 30, 50
3	Schlagleiste 3	15, 30, 50
4	Kosinuswelle 1	20, 30, 40, 50
5	Kosinuswelle 2	20, 40, 60, 70
6	Bodenwelle 1	10, 20, 30
7	Bodenwelle 2	20, 30, 50, 60

6.2.2 Ergebnisse

Zuordnung von Warngeschwindigkeiten

In Abbildung 6.5 sind die kumulierten relativen Häufigkeiten der von den Probanden gewünschten Warngeschwindigkeiten¹⁴ bei Überfahrt über die in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Einzelschäden dargestellt. Nicht abgebildet sind die Warngeschwindigkeiten für die beiden Einzelschäden *Schlagloch 1* und *Schlagloch 2*. Bei beiden Einzelschäden wünscht die Mehrheit der Probanden (11 von 13 Fahrern) keine Warnung. Zwei Probanden wünschen eine Warnung jeweils bei der niedrigsten gefahrenen Geschwindigkeit ($v_X = 10$ km/h). Tabelle 6.5 enthält zusätzlich die aus der Abbildung abgeleiteten Größen 1. Quartil $v_{\text{warn},25}$, Median $\tilde{v}_{\text{warn}}$ und 3. Quartil $v_{\text{warn},75}$.

Werden ausschließlich die Mediane $\tilde{v}_{\text{warn}}$ berücksichtigt, so sind *Bodenwelle 1* und *Kosinuswelle 2* die Einzelschäden, bei denen die Probanden am frühesten eine Warnung wünschen. Bei diesen ist somit die gewünschte Warngeschwindigkeit v_{warn} im Vergleich zu den anderen Einzelschäden am niedrigsten. Bei der *Schlagleiste 3* wird eine Warnung am spätesten

¹⁴Dargestellt sind die gemessenen Überfahrtschwindigkeiten und nicht die in Tabelle 6.3 angegebenen Geschwindigkeitsvorgaben.

gewünscht. Die 1. Quartile liegen 6,7% bis 28,4% unterhalb der Mediane. Die Abweichungen der 3. Quartile zum Median sind teilweise deutlich größer (bis zu 69,3%), bei drei Einzelschäden aber auch relativ klein (2,1% bis 5,7%).

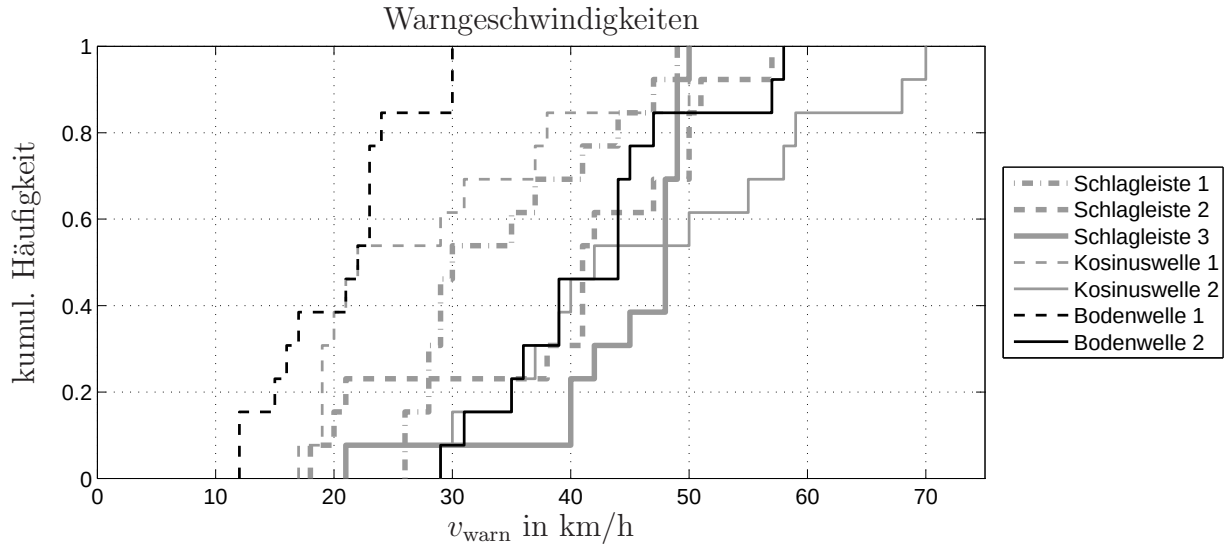


Abbildung 6.5: Kumulierte relative Häufigkeit der von Probanden gewünschten Warngeschwindigkeiten bei Überfahrt über Einzelschäden

Tabelle 6.5: 1. Quartil $v_{\text{warn},25}$, Median $\tilde{v}_{\text{warn}}$ und 3. Quartil $v_{\text{warn},75}$ der von Probanden gewünschten Warngeschwindigkeiten bei Überfahrt über Einzelschäden sowie relative Abweichungen der Quartile vom Median $\Delta v_{\text{warn},25/75,\text{rel}} = v_{\text{warn},25/75} / \tilde{v}_{\text{warn}} - 1$.

*: Die Größen sind nicht ermittelbar, da 11 von 13 Probanden keine Warnung wünschen.

Nr.	Bezeichnung	$\Delta v_{\text{warn},25,\text{rel}}$	v_{warn} in km/h			$\Delta v_{\text{warn},75,\text{rel}}$
			$v_{\text{warn},25}$	$\tilde{v}_{\text{warn}}$	$v_{\text{warn},75}$	
6	Bodenwelle 1	-28,4%	15,8	22,0	23,3	5,7%
4	Kosinuswelle 1	-13,6%	19,0	22,0	37,3	69,3%
1	Schlagleiste 1	-6,7%	28,0	30,0	41,8	39,2%
2	Schlagleiste 2	-17,7%	33,8	41,0	50,0	22,0%
5	Kosinuswelle 2	-13,1%	36,5	42,0	58,3	38,7%
7	Bodenwelle 2	-18,8%	35,8	44,0	45,5	3,4%
3	Schlagleiste 3	-13,5%	41,5	48,0	49,0	2,1%
8	Schlagloch 1	*	*	*	*	*
9	Schlagloch 2	*	*	*	*	*

Abhängigkeit von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit

Abbildung 6.6 zeigt die ermittelten Werte des Kriteriums γ_s bei Überfahrt über die Einzelschäden mit den in Tabelle 6.4 angegebenen Geschwindigkeiten v_x . Dargestellt sind die gemessenen Geschwindigkeiten. Für jeden Einzelschaden zusätzlich abgebildet sind die als

„Ausgleichsgerade“ dargestellten Mittelwerte¹⁵. Diese sowie die darauf bezogenen maximalen Abweichungen und Standardabweichungen sind Tabelle 6.6 zu entnehmen.

Demnach reichen die Mittelwerte des Kriteriums γ_S für die untersuchten Einzelschäden von 2,4 m bis 9,4 m. Die *Kosinuswelle 1* weist den größten Wert, die *Schlagleiste 3* den kleinsten Wert auf. Die Standardabweichungen liegen im Bereich von 7,3% bis 15,2% des Mittelwertes. Die relativen Abweichungen vom Mittelwert betragen maximal 20,1% nach unten und 24,4% nach oben.

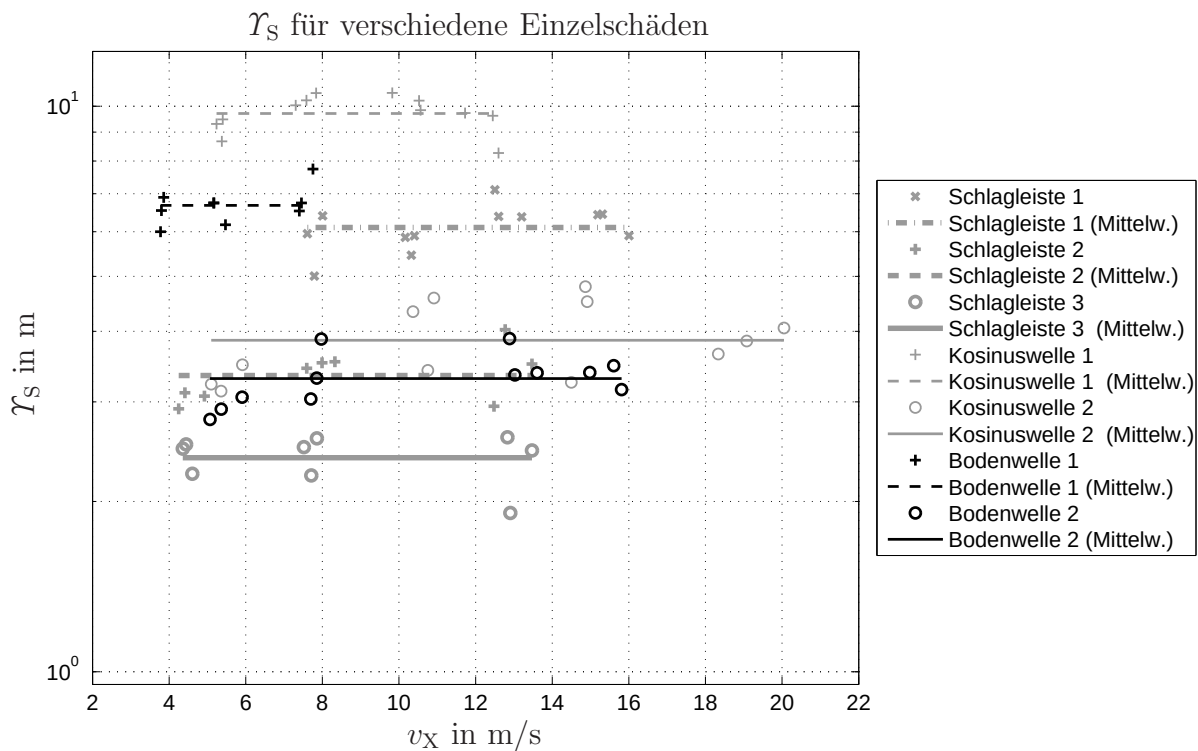


Abbildung 6.6: Ermittelte (Mittel-) Werte des Kriteriums γ_S für verschiedene Überfahrgeschwindigkeiten und Einzelschäden (Bestimmtheitsmaße siehe Tabelle 6.7)

Tabelle 6.6: Werte des Kriteriums γ_S bei der Überfahrt über Einzelschäden: Mittelwert $\bar{\gamma}_S$ sowie maximale Abweichung nach unten $\gamma_{S,\min}$, maximale Abweichung nach oben $\gamma_{S,\max}$ und Standardabweichung $\sigma(\gamma_S)$ bezogen auf den Mittelwert $\bar{\gamma}_S$

Nr.	Bezeichnung	$\bar{\gamma}_S$ in m	$\gamma_{S,\min}/\bar{\gamma}_S$	$\gamma_{S,\max}/\bar{\gamma}_S$	$\sigma(\gamma_S)/\bar{\gamma}_S$
4	Kosinuswelle 1	9,7	-14,8%	8,7%	7,3%
6	Bodenwelle 1	6,7	-10,2%	15,9%	7,4%
1	Schlagleiste 1	6,1	-17,9%	16,6%	8,9%
5	Kosinuswelle 2	3,9	-18,7%	24,4%	15,2%
2	Schlagleiste 2	3,3	-12,7%	20,5%	10,8%
7	Bodenwelle 2	3,3	-15,3%	17,6%	10,3%
3	Schlagleiste 3	2,4	-20,1%	8,6%	9,4%

¹⁵Bestimmtheitsmaße siehe u. a. Tabelle 6.7

Regressionsanalyse Analysen zu linearen und quadratischen Regressionen führen zu den in Tabelle 6.7 aufgeführten Bestimmtheitsmaßen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist der durch die Regressionsgleichung erklärte Varianzanteil bezogen auf die durch alleinige Mittelwertbildung erklärte Varianz. Nach Albers ist R^2 demnach ein Maß für die Güte der Regressionsanalyse, welches angibt, um wieviel sich die Beschreibung der Zusammenhänge im Vergleich zur alleinigen Verwendung des Mittelwertes verbessert¹⁶. Ist das Maß Null, so ist der Mittelwert die beste Schätzung zur Beschreibung der Abhängigkeiten. Das Maß nimmt aber auch mit der Anzahl der unabhängigen Variablen der Regressionsgleichung (Regressionskoeffizienten) zu. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2_{kor} berücksichtigt dies und ermöglicht somit beispielsweise einen Vergleich von linearen und quadratischen Regressionsanalysen¹⁷.

Sind die Regressionskoeffizienten gleich Null, so liegt keine Abhängigkeit vor. Mit einem F-Test wird die Irrtumswahrscheinlichkeit (p-Wert) für die Nullhypothese, dass die betrachteten Regressionskoeffizienten ungleich Null sind, errechnet. Ist der p-Wert kleiner gleich 5%, so wird der Einfluss der Regression auf die Varianz als signifikant bezeichnet. Tabelle 6.7 gibt daher zusätzlich die p-Werte des F-Testes an.

Die für die lineare Regression ermittelten p-Werte unterschreiten bei keinem der untersuchten Einzelschäden ein Signifikanzniveau von 5%. Ein linearer Einfluss der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X auf das Kriterium $\mathcal{T}_S$ wird daher nicht angenommen. Bei der quadratischen Regression unterschreiten die ermittelten p-Werte für die *Kosinuswelle 1* und die *Bodenwelle 2* ein Signifikanzniveau von 5%. Für die restlichen Einzelschäden ist ein signifikanter quadratischer Einfluss nicht nachweisbar. Daher wird angenommen, dass ein quadratischer Einfluss der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X auf das Kriterium $\mathcal{T}_S$ nicht berücksichtigt werden muss.

Tabelle 6.7: Aus den in Abbildung 6.6 dargestellten Versuchsergebnissen abgeleitete Werte für das Bestimmtheitsmaß R^2 , das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2_{kor} sowie die p-Werte eines F-Testes, jeweils für lineare und quadratische Regression

Regression		linear			quadratisch		
Nr.	Hindernis	R^2	R^2_{kor}	p-Wert	R^2	R^2_{kor}	p-Wert
1	Schlagleiste 1	0,21	0,13	13,1%	0,28	0,12	23,3%
2	Schlagleiste 2	0,29	0,18	13,8%	0,40	0,20	21,8%
3	Schlagleiste 3	0,04	-0,10	62,4%	0,04	-0,28	88,2%
4	Kosinuswelle 1	0,00	-0,10	98,5%	0,75	0,69	0,2%
5	Kosinuswelle 2	0,16	0,08	19,8%	0,37	0,23	12,2%
6	Bodenwelle 1	0,25	0,15	16,6%	0,32	0,09	31,5%
7	Bodenwelle 2	0,22	0,14	12,4%	0,57	0,47	2,3%

Zusammenhang von Warngeschwindigkeit v_{warn} und Kriterium $\mathcal{T}_S$

In Abbildung 6.7 sind die in den beiden vorherigen Abschnitten beschriebenen Ergebnisse zusammengefasst dargestellt, d. h. für jeden Einzelschaden sind auf der Ordinate die Quadrate der von den Probanden gewünschten Warngeschwindigkeiten v_{warn}^2 und auf der Abszisse die Kehrwerte des Kriteriums $1/\mathcal{T}_S$ dargestellt.

¹⁶Albers et al. (1998): Regressionsanalyse, S. 208 ff.

¹⁷Albers et al. (1998): Regressionsanalyse, S. 209

Bei letztgenannten Werten beinhalten die Fehlerbalken den gesamten ermittelten Wertebereich des Kriteriums $\mathcal{T}_S$. Bei der Darstellung der Warngeschwindigkeiten erstrecken sich die „Fehlerbalken“ vom ersten bis zum dritten Quartil der ermittelten Werte¹⁸. Am Schnittpunkt der Fehlerbalken gilt für die Warngeschwindigkeit $v_{\text{warn}} = \tilde{v}_{\text{warn}}$ und für das Kriterium $\mathcal{T}_S = \tilde{\mathcal{T}}_S$.

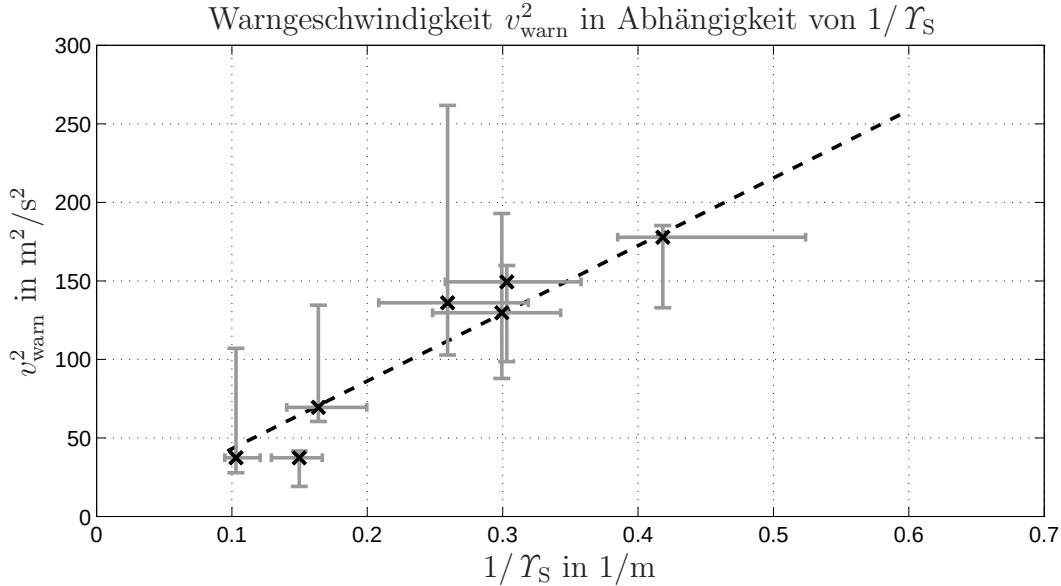


Abbildung 6.7: Quadrat der Warngeschwindigkeit v_{warn}^2 in Abhängigkeit des Kriterium-Kehrwertes $1/\mathcal{T}_S$

Der Verlauf deutet auf eine reziproke Abhängigkeit des Quadrates der Warngeschwindigkeit v_{warn}^2 vom Kriterium $\mathcal{T}_S$ hin. Diese Abhängigkeit lässt sich durch folgende Gleichung einer Ausgleichsgeraden, die ebenfalls in Abbildung 6.7 dargestellt ist, beschreiben:

$$v_{\text{warn}}^2 = 444 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{\mathcal{T}_S} \quad (6.14)$$

Für das basierend auf Gleichung (6.14) ermittelte Bestimmtheitsmaß gilt:

$$R^2(\tilde{v}_{\text{warn}}^2 : \frac{1}{\tilde{\mathcal{T}}_S}) = 0,91 \quad (6.15)$$

Falscherkennungen

Zur Überprüfung des Auftretens von Falscherkennungen wird die von Präckel beschriebene Strecke¹⁹ von zwei Fahrern unterschiedlichen Fahrstils befahren. Die Strecke beinhaltet Streckenabschnitte, welche die im öffentlichen Straßenverkehrsnetz vorkommenden Merkmale wiedergeben. Der maximal ermittelte Wert des Kriteriums an Stellen ohne Einzelschäden beträgt $\mathcal{T}_S = 0,95$ m. Dies entspricht nach Gleichung (6.14) einer Warngeschwindigkeit von $v_{\text{warn}} = 21,6$ m/s = 77,8 km/h.

¹⁸Bei Probandenversuchen hängen die Bewertungen vom persönlichen Empfinden der Teilnehmer ab. Dies führt zu unscharfen Bewertungen bzw. zu großen Streuungen, so dass bei einer späteren Systemauslegung in der Regel eine Berücksichtigung aller Nutzerwünsche nicht möglich ist (siehe auch Bubb (2003): Fahrversuche mit Probanden, S. 26).

¹⁹Präckel (1999): Die Motorradbremsung, S. 56 ff.

6.2.3 Fazit

Mit den durchgeführten Versuchen ist weder eine lineare noch eine quadratische Abhängigkeit des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X nachweisbar. Daher wird angenommen, dass für jeden Einzelschaden der Mittelwert des Kriteriums $\tilde{\mathcal{T}}_S$ die beste Näherung ist. Damit hat sich das Kriterium hinsichtlich der Unabhängigkeit von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X bewährt. Für jeden der untersuchten Einzelschäden ist ein Wert des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ ohne Kenntnis von Länge, Höhe oder Form ermittelbar.

Gleichung (6.14) beschreibt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Kriterium $\mathcal{T}_S$ und der Gefährlichkeit eines erhabenen Einzelschadens, ausgedrückt durch eine von Motorradfahrern gewünschte Warnungsgeschwindigkeit v_{warn} . Damit sind alle in Abschnitt 5.3.2 definierten Anforderungen erfüllt. **Hypothese 2 bewährt sich.**

6.2.4 Diskussion

Die Ergebnisse führen zu einer Bewährung von Hypothese 2 und somit auch zu einer Bewährung des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ als Maß für die empfundene Gefährlichkeit eines erhabenen Einzelschadens, ausgedrückt durch die gewünschte Warnungsgeschwindigkeit v_{warn} . Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Bewertung der empfundenen Gefährlichkeit durch die Probanden unterschiedlich stark variiert. Die Interquartilsabstände bei der Bewertung der gewünschten Warnungsgeschwindigkeit reichen, bezogen auf den Median der gewünschten Warnungsgeschwindigkeiten $\tilde{v}_{\text{warn}}$, von 15,6% (Schlagleiste 3) bis zu 83,0% (Kosinuswelle 1). Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um zu analysieren, wie die nach Gleichung (6.14) ermittelte Warnungsgeschwindigkeit ggf. an den Fahrer angepasst werden kann.

Die Probandenbewertung der Einzelschäden erfolgt anhand der in Abschnitt 6.2.1 abgeleiteten Überfahrgeschwindigkeiten. Demnach sind Aussagen über die Gültigkeit des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ nur für die gefahrenen Überfahrgeschwindigkeiten (siehe auch Tabellen 6.3 und 6.4) möglich. Da alle Probanden bei allen erhabenen Einzelschäden eine Warnung wünschten, wird davon ausgegangen, dass die ausgewählten Geschwindigkeiten den Bereich für gewünschte Warnungen abdecken.

Der niedrigste bei einem erhabenen Einzelschaden ermittelte Wert des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ beträgt 1,9 m²⁰ (Schlagleiste 3). An Stellen ohne Einzelschäden wird maximal ein Wert von $\mathcal{T}_S = 0,95$ m ermittelt. Unter der Annahme eines Wertes von $\mathcal{T}_S = 1,9$ m als untere Erkennungsschwelle für einen Einzelschaden treten bei den durchgeführten Versuchen weder Fehl- noch Falscherkennungen auf.

Der maximal ermittelte Wert des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ beträgt 10,5 m (siehe auch Abbildung 6.6). Aussagen über die Gültigkeit von Gleichung (6.14) oberhalb dieses Wertes sind daher basierend auf den durchgeführten Versuchen nicht möglich. Allerdings liegt für $\mathcal{T}_S = 10,5$ m die nach genannter Gleichung ermittelte Warnungsgeschwindigkeit bei $v_{\text{warn}} = 6,5$ m/s = 23,4 km/h und somit bereits im Sichtbereich. Daher wird angenommen, dass deutlich niedrigere Warnungsgeschwindigkeiten nicht benötigt werden.

Hypothese 2 bewährt sich nur für erhabene Einzelschäden. Bei den beiden untersuchten tiefen Einzelschäden (Schlagloch 1 und 2) wünschten 11 von 13 Probanden keine Warnung. Eine Bestimmung einer Warnungsgeschwindigkeit v_{warn} ist nicht möglich. Die Auswahl der untersuchten Einzelschäden erfolgte so, dass ein auf deutschen Straßen „typischer“ Bereich

²⁰Der Mittelwert $\tilde{\mathcal{T}}_S$ über alle durchgeführten Versuche beträgt 2,4 m.

von Schlaglöchern abgedeckt wird. Dies deutet darauf hin, dass eine Warnung vor diesen Einzelschäden nicht akzeptiert wird oder nicht erforderlich ist.

Eine mögliche Ursache ist das nicht vollständige „Eintauchen“ des Rades in das Schlagloch. Dies führt zu einer mit der Geschwindigkeit abnehmenden effektiv wirkenden Tiefe bzw. Höhe h_{eff} . Tabelle 6.8 gibt diese, berechnet nach Reichel²¹, für Schlagloch 1 und Schlagloch 2 unter Variation der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X beim Überfahren an.

Tabelle 6.8: Überfahrt von Schlagloch 1 und Schlagloch 2: Effektiv wirkende Höhe h_{eff} und Mittelwert des Kriteriums $\tilde{T}_S$ für jeweils drei Überfahrten pro Geschwindigkeit

		Schlagloch 1		Schlagloch 2	
v_X		h_{eff}	$\tilde{T}_S$	h_{eff}	$\tilde{T}_S$
in km/h	in m/s	in cm	in m	in cm	in m
10	2,8	3,0	3,2	6,0	4,1
20	5,6	1,4	1,7	4,0	3,7
30	8,3	0,8	1,2	2,2	1,7
50	13,9	0,4	0,5	1,0	0,9
70	19,4	0,2	0,2	0,6	0,5

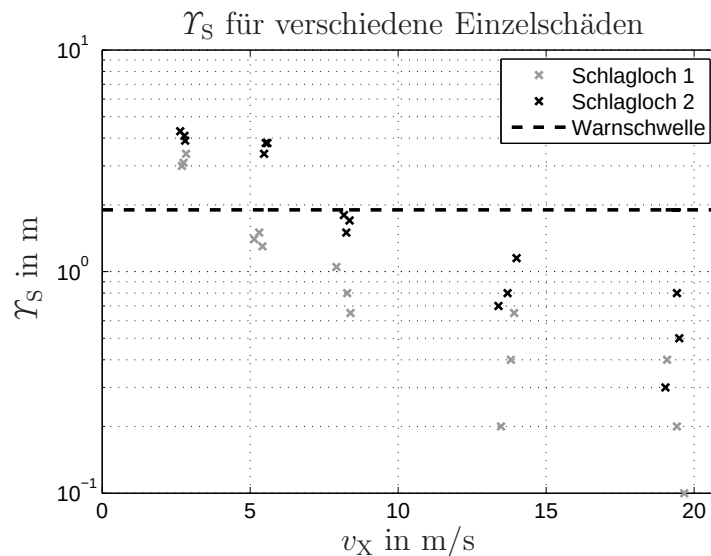


Abbildung 6.8: Ermittelte (Mittel-) Werte des Kriteriums T_S für Schlagloch 1 und Schlagloch 2 in Abhängigkeit verschiedener Fahrzeuglängsgeschwindigkeiten v_X

Abbildung 6.8 zeigt die in Fahrversuchen ermittelten Werte des Kriteriums T_S für die genannten Schlagloch-Überfahrten²². Der daraus für jede Geschwindigkeit abgeleitete und ebenfalls in Tabelle 6.8 aufgeführte Mittelwert $\tilde{T}_S$ zeigt, dass aus der abnehmenden Höhe h_{eff} ein von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X abhängiges Kriterium T_S resultiert. Ab Fahrzeuglängsgeschwindigkeiten von $v_X = 20$ km/h bzw. $v_X = 30$ km/h ist das Kriterium mit $\tilde{T}_S = 1,7$ m allerdings kleiner als alle in anderen Versuchen ermittelten

²¹Reichel (2003): Einfluss von Schwingungsdämpfern, S. 31 ff.

²²In der Abbildung sind die gemessenen Geschwindigkeiten dargestellt. Diese weichen maximal 7,5% von den Geschwindigkeitsvorgaben ab.

Werte des Kriteriums ($\mathcal{T}_S \geq 1,9$ m). Dies ist eine mögliche Erklärung dafür, dass tiefe Einzelschäden ab einer bestimmten Geschwindigkeit nicht mehr gefährlich sind bzw. nicht als solches empfunden werden.

Aufgrund der genannten Ergebnisse wird davon ausgegangen, dass tiefe Einzelschäden, bei denen $\mathcal{T}_S \geq 1,9$ m ermittelt wird, zu einer Falschwarnung führen. Nach den Ergebnissen von Tabelle 6.8 treten solche Falschwarnungen bei niedrigen Überfahrgeschwindigkeiten (bis ca. 20 km/h) auf. Zur Vermeidung von Falschwarnungen ist daher in genannten Geschwindigkeitsbereichen eine Unterscheidung zu erhabenen Einzelschäden erforderlich. Möglichkeiten zur Realisierung einer solchen ist eine Vorzeichenerkennung. Eine Auswertung der durchgeführten Versuche zeigt, dass bei erhabenen Einzelschäden die Radvertikalbeschleunigung zu Beginn positiv, bei tiefen Einzelschäden jedoch negativ ist.

Bei den Evaluierungsversuchen wurden alle Einzelschäden mehrmals mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten befahren. Kein Versuchsergebnis widerspricht den in Abschnitt 6.2.3 getroffenen Aussagen. Daher wird von einer Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ausgegangen.

Alle Versuche basieren auf Messdaten, die mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Versuchsmotorrad aufgenommen wurden. Ein anderes Motorrad kam nicht zum Einsatz. Damit sind die ermittelten Ergebnisse nur für das erwähnte Motorrad gültig. Die Unabhängigkeit der Fahrbahnanregungen vom Fahrzeug und das bei allen Motorrädern ähnliche Übertragungsverhalten²³ auf die Radvertikalbeschleunigung deuten auf eine Übertragbarkeit der Ergebnisse zur Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ auf andere Motorräder hin.

Die Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ ist unabhängig von subjektiven Bewertungen. Daher ist diesbezüglich eine Objektivität gegeben. Eine Beeinflussung der Probanden bei der Ermittlung der Warngeschwindigkeit wurde durch fest vorgeschriebene Fragen auf ein Minimum reduziert.

Zur Überprüfung der Reliabilität wird die Auswirkung eines Fehlers von 25% bei der Bestimmung des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ betrachtet. Dieser Fehler ist größer als alle bei den durchgeführten Versuchen aufgetretenen Abweichungen (siehe auch Tabelle 6.6). Ein um 25% zu niedriger Wert des Kriteriums $\mathcal{T}_S$ bewirkt nach Gleichung (6.14) eine um 15,5% höhere Warngeschwindigkeit v_{warn} . Ein um 25% zu großer Wert führt zu einer um 10,6% niedrigeren Warngeschwindigkeit. Diese Werte liegen im Bereich der Streuung der von Probanden gewünschten Warngeschwindigkeiten (siehe auch Tabelle 6.5). Daher wird angenommen, dass die erreichte Genauigkeit ausreichend ist.

6.3 Ausweichmanöver

6.3.1 Validierungsversuche

Für eine Bewährung der in Abschnitt 5.4.3 definierten Hypothese 3 ist erforderlich, dass das durch Gleichung (5.76) beschriebene Kriterium bei Ausweichmanövern für mindestens ein Muster und bei sonstigen Manövern für kein Muster erfüllt wird. Daher werden sowohl Ausweichmanöver, die ein möglichst großes Spektrum von realen Ausweichmanövern abdecken, als auch sonstige Manöver durchgeführt.

²³siehe auch Abschnitt 5.2.4

Ausweichmanöver

Der Verlauf eines Ausweichmanövers wird nach den Ergebnissen aus Abschnitt 5.4.1²⁴ durch folgende Größen beeinflusst:

- horizontierte Querbeschleunigung des Motorrads a_Y
- seitlicher Versatz B
- Typ des Manövers: *Typ I* oder *Typ II* (siehe auch Abbildung 6.9)

Um ein möglichst großes Spektrum von realen Ausweichmanövern im Fahrversuch abzubilden, werden diese Größen sowie die Längsgeschwindigkeit des Motorrads v_X in den nachfolgend genannten Bereichen variiert:

- $a_Y = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, 8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- $B = 1 \text{ m}, 2 \text{ m}, 3 \text{ m}, 4 \text{ m}, 5 \text{ m}$
- *Typ I* und *Typ II*
- $v_X = 30 \frac{\text{km}}{\text{h}}, 60 \frac{\text{km}}{\text{h}}, 90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

Eine vollständige Permutation ergibt bei zweifacher Durchführung jeder Kombinationsmöglichkeit insgesamt 180 Ausweichversuche (Versuch-Nr. 1 bis Versuch-Nr. 180).

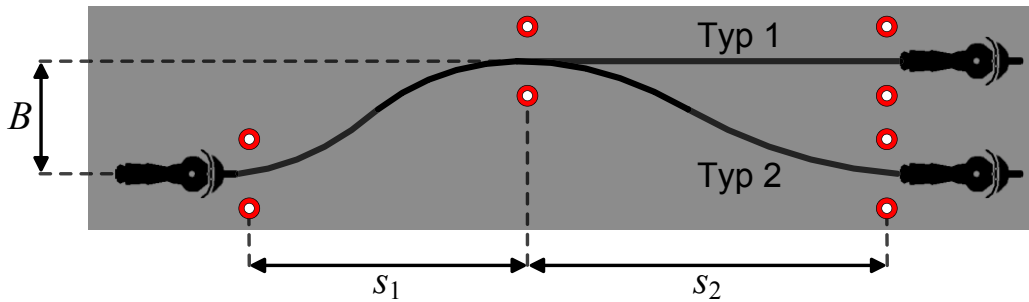


Abbildung 6.9: Versuchsaufbau zur Durchführung von Ausweichmanövern

Für den Versuchsaufbau, der in Abbildung 6.9 dargestellt ist, sind zusätzlich zu den genannten Größen die Abstände s_1 und s_2 erforderlich. Angelehnt an die Ergebnisse von Rauscher²⁵ (siehe auch Gleichung (5.65)) ergeben sich folgende Abstände:

$$s_1 = \sqrt{\frac{B}{a_Y}} \cdot v_X \quad (6.16)$$

$$s_2 = 1,1s \cdot v_X \quad (6.17)$$

²⁴u. a. Gleichung (5.65)

²⁵Rauscher (2007): Ausweichen von einspurigen Fahrzeugen, S. 59

Sonstige Manöver

Ziel der Validierungsversuche ist eine Überprüfung von Hypothese 3. Um einen möglichst hohen Wert der Hypothese bei einer Bewährung zu belegen, sind „scharfe“ Falsifikationsversuche erforderlich. Neben den bereits erwähnten Ausweichmanövern²⁶ führt dies zu „fahrdynamisch ähnlichen“ Manövern²⁷. Als „fahrdynamisch ähnlich“ werden Manöver definiert, die Amplituden und/oder Frequenzen im Verlauf der Rollrate aufweisen, die in der gleichen Größenordnung wie die von Ausweichmanövern liegen. Nachfolgend sind die durchgeführten Manöver aufgelistet²⁸:

- **Befahren einer 90°-Kurve** (Versuch-Nr. 181 bis Versuch-Nr. 208) inklusive Ein-/Ausfahren unter Variation von Kurvenradius ($R_K = 20 \text{ m}$, 40 m), Fahrtrichtung (links/rechts) und Fahrzeuglängsgeschwindigkeit ($v_X = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ²⁹, $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ³⁰, $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ³¹). Demnach werden 28 Versuche durchgeführt ($n = 28$).
- **Überholmanöver nach Folgefahrt** (Versuch-Nr. 209 bis Versuch-Nr. 218): Bei diesem Manöver folgt der Motorradfahrer zunächst einem vorausfahrenden Pkw ($v_X = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$) mit annähernd konstanter Geschwindigkeit und überholt dann nach ca. 10 s Folgefahrt den Pkw ($n = 10$).
- **Überholmanöver nach Folgefahrt mit vorherigem Wedeln** (Versuch-Nr. 219 bis Versuch-Nr. 228): Bei diesem Manöver wedelt der Motorradfahrer während der Folgefahrt und nutzt den letzten Schwung zum Überholen. Der restliche Ablauf ist wie bei vorherigem Manöver ($n = 10$).
- **Freies Überholmanöver** ohne vorherige Folgefahrt (Versuch-Nr. 229 bis Versuch-Nr. 238): Bei diesem Manöver fährt der Motorradfahrer mit einer Geschwindigkeit von $v_X = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ auf einen vorausfahrenden Pkw zu und überholt ohne vorher dem Pkw zu folgen ($n = 10$).
- **Slalom** (Versuch-Nr. 239 bis Versuch-Nr. 254): Die Durchführung erfolgt mit jeweils 5 bis 7 Schwüngen bzw. 2,5 bis 3,5 Doppelschwüngen bei Pylonenabständen von 7 m bis 14 m und Geschwindigkeiten von $v_X = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}} \dots 70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ($n = 16$).
- **Doppelter Fahrstreifenwechsel** (Versuch-Nr. 255 bis Versuch-Nr. 260): Der „VDA-Spurwechseltest“ wird in Anlehnung an ISO 3888-2 mit Geschwindigkeiten von $v_X = 40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ gefahren ($n = 6$).
- **180°-Durchfahrt eines Kreisverkehrs** (Versuch-Nr. 260 bis Versuch-Nr. 264) mit einem Radius von $R_K = 9 \text{ m}$ unter Variation der Geschwindigkeit mit $v_X = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ($n = 4$).

²⁶zur Überprüfung auf Fehlerkennungen

²⁷zur Überprüfung auf Falscherkennungen

²⁸Jede Kombinationsmöglichkeit wird zwei Mal gefahren.

²⁹nur bei $R_K = 20 \text{ m}$

³⁰nur bei $R_K = 40 \text{ m}$

³¹nur bei $R_K = 40 \text{ m}$

6.3.2 Ergebnisse

Vergleich der Muster mit realen Messdaten

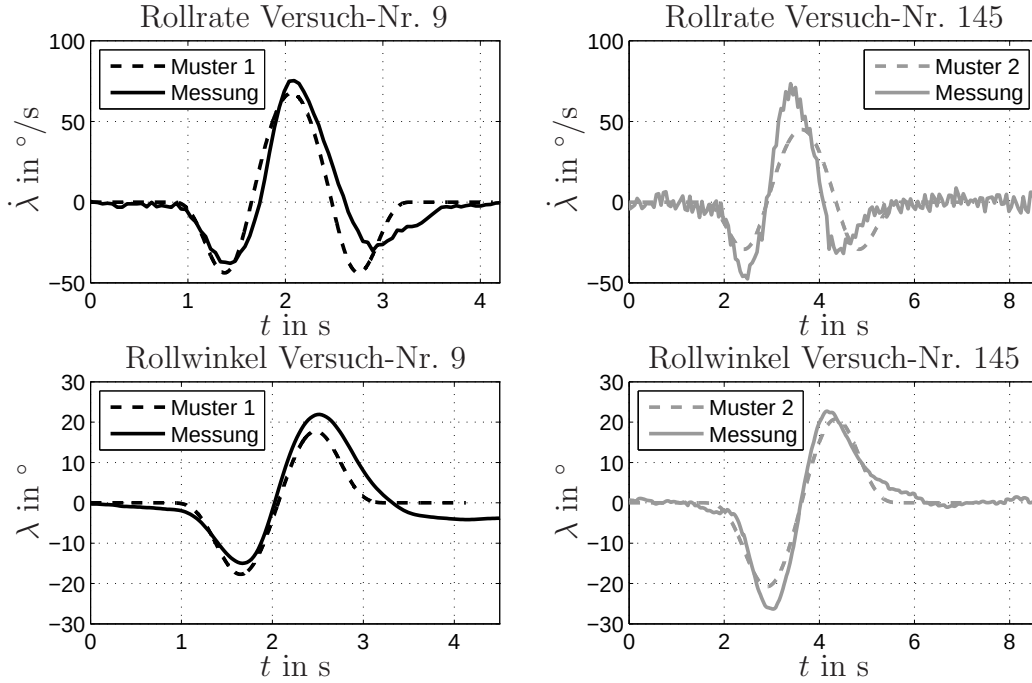


Abbildung 6.10: Muster 1 im Vergleich zu den Messdaten von Versuch-Nr. 9 und Muster 2 im Vergleich zu den Messdaten von Versuch-Nr. 145

Abbildung 6.10 zeigt beispielhaft die Messgrößenverläufe von Versuch-Nr. 9³² und Versuch-Nr. 145³³ im Vergleich zu den in Abschnitt 5.4.4 definierten Musterverläufen (Muster 1 und 2). Die darauf basierend nach den Gleichungen (5.74) und (5.75) bestimmten Maximalwerte³⁴ der Korrelationsfaktoren $c_{RR,max}$ (Rollrate) bzw. $c_{RW,max}$ (Rollwinkel) betragen für Versuch-Nr. 9 bei einer Korrelation mit den (ganzen) Verläufen von Muster 1:

$$c_{RR,1v,max} = 0,92, \quad c_{RW,1v,max} = 0,91 \quad (6.18)$$

Aus einer Korrelation mit den halben Verläufen von Muster 1 resultiert:

$$c_{RR,1h,max} = 0,87, \quad c_{RW,1h,max} = 0,98 \quad (6.19)$$

Gleichermaßen ergeben sich für Versuch-Nr. 145 bei einer Korrelation mit Muster 2 folgende Korrelationsfaktoren: $c_{RR,2v,max} = 0,83$, $c_{RW,2v,max} = 0,96$, $c_{RR,2h,max} = 0,93$, $c_{RW,2h,max} = 0,98$. Aus der Bestimmung der Korrelationsfaktoren für alle durchgeführten Ausweichmanöver resultieren die in Gleichung (5.76) enthaltenen Grenzwerte $c_{RR,grenz}$ und $c_{RW,grenz}$. Deren Ermittlung wird in den nächsten Abschnitten beschrieben.

³² $a_Y = 8 \frac{m}{s^2}$, $B = 2 \text{ m}$, Typ I, $v_X = 30 \frac{km}{h}$

³³ $a_Y = 3 \frac{m}{s^2}$, $B = 5 \text{ m}$, Typ I, $v_X = 30 \frac{km}{h}$

³⁴Da die Korrelationsfaktoren kontinuierlich bestimmt werden, ist der Maximalwert entscheidend.

Grenzwertbestimmung

In Abbildung 6.11 (links) sind für alle Ausweichmanöver mit einem Versatz von $B = 1 \text{ m} \dots 2 \text{ m}$ sowie alle sonstigen durchgeführten Manöver die Maximalwerte der Korrelationsfaktoren $c_{RR,\max}$ und $c_{RW,\max}$ unter Verwendung von Muster 1 dargestellt. Abbildung 6.11 (rechts) zeigt dies für die Ausweichmanöver mit einem Versatz von $B = 4 \text{ m} \dots 5 \text{ m}$ unter Verwendung von Muster 2.

Aus Abbildung 6.11 folgen für die betrachteten Ausweichmanöver die mindestens aufgetretenen Maximalwerte der Korrelationsfaktoren³⁵. Demnach gilt für die auf dem Verlauf der Rollrate basierenden Korrelationsfaktoren $c_{RR,1v}$ (Muster 1) und $c_{RR,2v}$ (Muster 2) aller berücksichtigten Ausweichmanöver:

$$c_{RR,1v,\max} \geq 0,51 \quad (6.20)$$

$$c_{RR,2v,\max} \geq 0,48 \quad (6.21)$$

Entsprechend folgt für die auf dem Verlauf des Rollwinkels basierenden Korrelationsfaktoren $c_{RW,1v}$ (Muster 1) und $c_{RW,2v}$ (Muster 2) aller berücksichtigten Ausweichmanöver:

$$c_{RW,1v,\max} \geq 0,51 \quad (6.22)$$

$$c_{RW,2v,\max} \geq 0,61 \quad (6.23)$$

Das Kriterium zur Erkennung von Ausweichmanövern ist nach Gleichung (5.76) wie folgt definiert:

$$(c_{RR} \geq c_{RR,\text{grenz}}) \cap (c_{RW} \geq c_{RW,\text{grenz}}) \rightarrow \text{Ausweichen} \quad (6.24)$$

Die Grenzwerte $c_{RR,\text{grenz}}$ und $c_{RW,\text{grenz}}$ ergeben sich wie folgt für Muster 1 aus den Ergebnissen der Gleichungen (6.20) und (6.22) sowie für Muster 2 aus den Ergebnissen der Gleichungen (6.21) und (6.23):

Tabelle 6.9: Grenzwerte $c_{RR,\text{grenz}}$ und $c_{RW,\text{grenz}}$ unter Verwendung ganzer Muster

	Muster 1 (ganz)	Muster 2 (ganz)
$c_{RR,\text{grenz}}$	0,51	0,48
$c_{RW,\text{grenz}}$	0,51	0,61

Abbildung 6.12 liefert für die gleichen Manöver wie in Abbildung 6.11 die Maximalwerte der Korrelationsfaktoren $c_{RR,\max}$ und $c_{RW,\max}$ unter Verwendung der halben Muster 1 und 2 (anstatt der ganzen Muster). Daraus ergeben sich für Gleichung (6.24) die folgenden Grenzwerte $c_{RR,\text{grenz}}$ und $c_{RW,\text{grenz}}$ unter Verwendung der halben Muster 1 und 2:

Tabelle 6.10: Grenzwerte $c_{RR,\text{grenz}}$ und $c_{RW,\text{grenz}}$ unter Verwendung halber Muster

	Muster 1 (halb)	Muster 2 (halb)
$c_{RR,\text{grenz}}$	0,77	0,80
$c_{RW,\text{grenz}}$	0,40	0,53

³⁵Um eine ausreichende Differenzierung zu ermöglichen, werden für die Grenzwertbestimmung von Muster 1 nur Ausweichmanöver mit einem Versatz von $B = 1 \text{ m} \dots 2 \text{ m}$ und für Muster 2 nur solche mit einem Versatz von $B = 4 \text{ m} \dots 5 \text{ m}$ betrachtet.

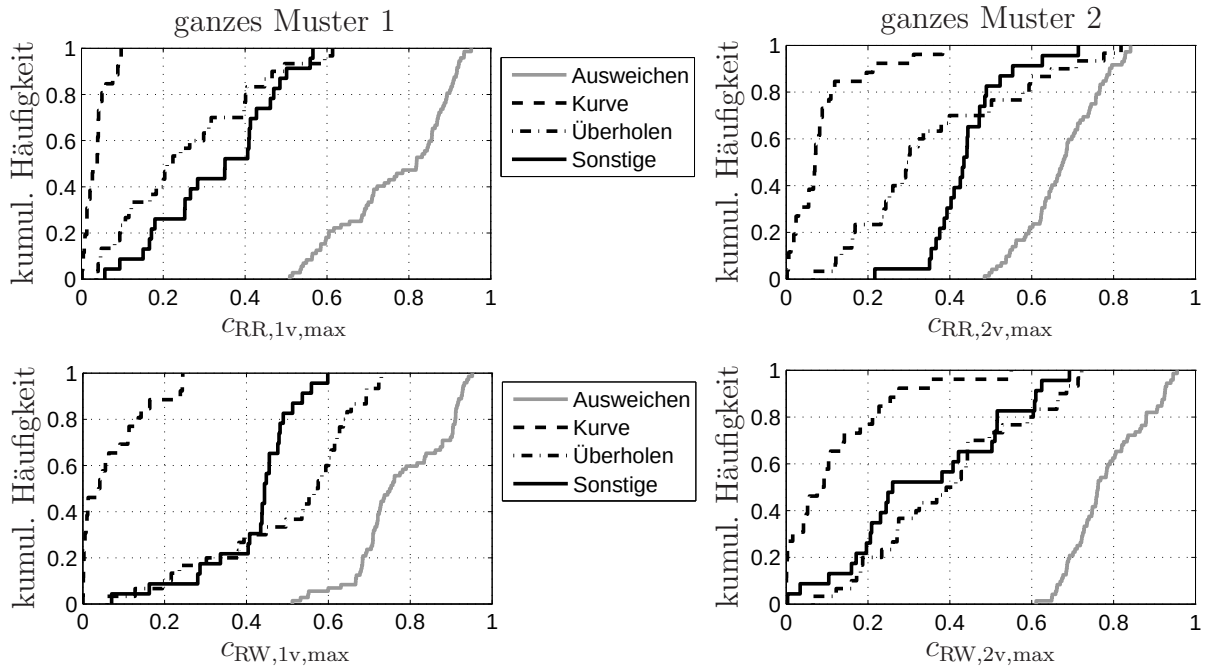


Abbildung 6.11: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Maximalwerte der Korrelationsfaktoren $C_{RR,1v,max}$ (Rollrate, Muster 1), $C_{RR,2v,max}$ (Rollrate, Muster 2), $C_{RW,1v,max}$ (Rollwinkel, Muster 1) und $C_{RW,2v,max}$ (Rollwinkel, Muster 2)

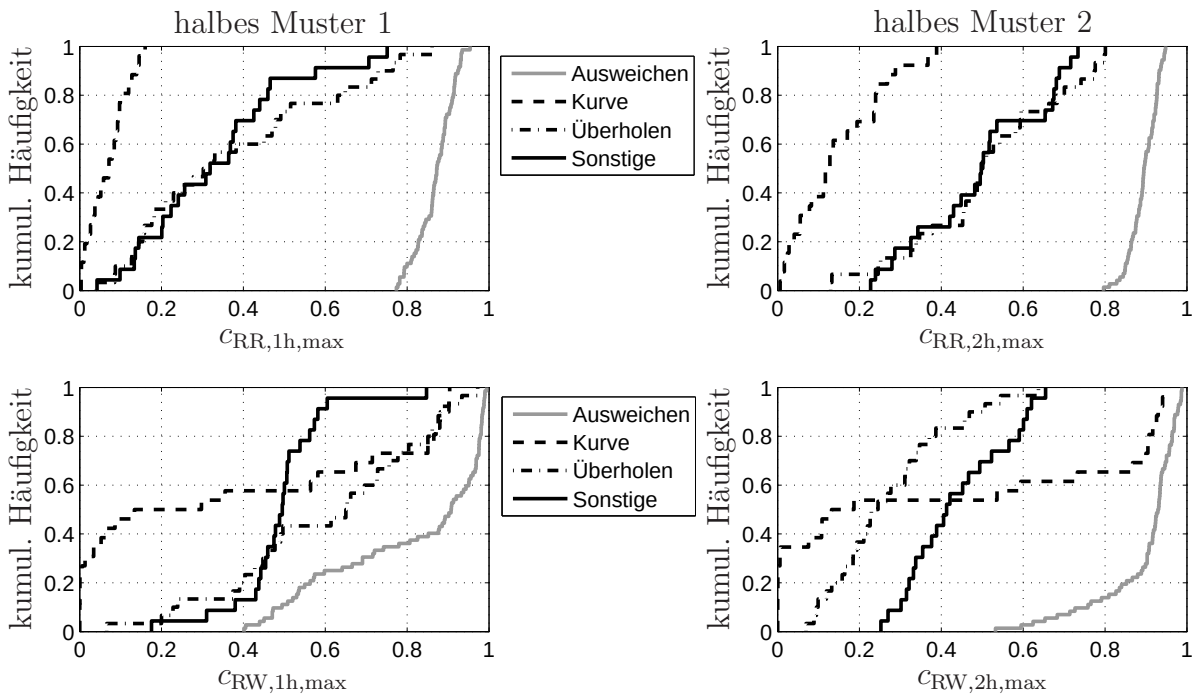


Abbildung 6.12: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Maximalwerte der Korrelationsfaktoren $C_{RR,1h,max}$ (Rollrate, halbes Muster 1), $C_{RR,2h,max}$ (Rollrate, halbes Muster 2), $C_{RW,1h,max}$ (Rollwinkel, halbes Muster 1) und $C_{RW,2h,max}$ (Rollwinkel, halbes Muster 2)

Ergebnisauswertung

Nachfolgende Ergebnisse basieren auf folgenden Definitionen:

- Eine Manövererkennung gilt für die Untersuchung mit ganzen Mustern als *True Positive* (**TP**), wenn bei einem Ausweichmanöver (Versuch-Nr. 1 bis 180) die durch Gleichung (6.24) definierte Bedingung für mindestens ein Muster unter Verwendung der Grenzwerte nach Tabelle 6.9 erfüllt ist. Für die Untersuchung mit halben Mustern gilt Gleiches bei Erfüllung der Bedingung unter Verwendung der Grenzwerte nach Tabelle 6.10.
- Eine Manövererkennung gilt als Falscherkennung bzw. *False Positive* (**FP**), wenn während sonstiger Manöver (Versuch-Nr. 181 bis 264) die Bedingung, wie oben genannt, für mindestens ein Muster erfüllt ist.
- Ist bei der Untersuchung mit ganzen Mustern während eines Ausweichmanövers die Bedingung nach Gleichung (6.24) unter Verwendung der Grenzwerte nach Tabelle 6.9 für kein Muster erfüllt, so wird dies als Fehlerkennung bzw. *False Negative* (**FN**) gewertet. Für die Untersuchung mit halben Mustern gilt Gleiches, unter Verwendung der Grenzwerte nach Tabelle 6.10.
- Ist die Bedingung, wie oben genannt, während eines sonstigen Manövers für kein Muster erfüllt, so ist dies ein *True Negative* (**TN**).

Ergebnisauswertung - Ganze Muster

Eine Auswertung aller ermittelten Korrelationskoeffizienten für ganze Muster führt nach den genannten Definitionen zu folgenden Ergebnissen:

Erkennung	Anzahl
TP	180
FP	5
FN	0
TN	79

Fehlerkennungen bzw. FNs sind nicht zu beobachten³⁶. Falscherkennungen bzw. FPs treten bei den Versuchen Nr. 223 bis Nr. 227 auf, die alle aus der Kategorie „Überholmanöver nach Folgefahrt mit vorherigem Wedeln“ kommen. Die ermittelten Korrelationsfaktoren sind in Tabelle 6.11 aufgeführt.

Demnach werden alle Falscherkennungen durch Grenzwertüberschreitungen bei Muster 2 und bei den Versuchen-Nr. 224 und 226 zusätzlich auch bei Muster 1 hervorgerufen. Für Versuch-Nr. 223 sind im Anhang A.7.1 in Abbildung A.11 beispielhaft die Verläufe der Messgrößen Rollrate und Rollwinkel im Vergleich zu Muster 2 dargestellt.

³⁶Dies ist u. a. bedingt durch die entsprechende Auswahl der Grenzwerte.

Tabelle 6.11: Bei Falscherkennungen ermittelte Korrelationsfaktoren unter Verwendung ganzer Muster (Überschreitungen beider Grenzwerte grau hervorgehoben)

Versuch-Nr.	Korrelationsfaktoren			
	$c_{RR,1v,max}$	$c_{RW,1v,max}$	$c_{RR,2v,max}$	$c_{RW,2v,max}$
223	0,40	0,65	0,59	0,66
224	0,61	0,72	0,78	0,72
225	0,45	0,66	0,82	0,71
226	0,59	0,62	0,60	0,69
227	0,40	0,54	0,58	0,66

Ergebnisauswertung - Halbe Muster

Anwendung der genannten Bedingungen auf die mit halben Mustern ermittelten Korrelationskoeffizienten führen zu folgenden Ergebnissen:

Erkennung	Anzahl
TP	180
FP	2
FN	0
TN	82

Fehlerkennungen bzw. FNs sind nicht zu beobachten. Falscherkennungen bzw. FPs treten bei den Versuchen Nr. 222 und Nr. 226 auf, die (wie bei der Verwendung ganzer Muster) alle aus der Kategorie „Überholmanöver nach Folgefahrt mit vorherigem Wedeln“ kommen. Die ermittelten Korrelationsfaktoren sind in Tabelle 6.12 aufgeführt. Somit werden alle Falscherkennungen durch Grenzwertüberschreitungen bei Muster 1 hervorgerufen. Eine Bestimmung der Korrelationsfaktoren unter Verwendung des (halben) Musters 2 löst keine Falscherkennung aus.

Tabelle 6.12: Bei Falscherkennungen ermittelte Korrelationsfaktoren unter Verwendung halber Muster (Überschreitungen beider Grenzwerte grau hervorgehoben)

Versuch-Nr.	Korrelationsfaktoren			
	$c_{RR,1h,max}$	$c_{RW,1h,max}$	$c_{RR,2h,max}$	$c_{RW,2h,max}$
222	0,78	0,93	0,48	0,34
226	0,86	0,70	0,51	0,39

6.3.3 Fazit

Sowohl bei der Verwendung von ganzen als auch halben Mustern werden alle Ausweichmanöver erkannt. Es gibt keine FNs (Fehlerkennungen). Grenzwerte $c_{RR,grenz}$ und $c_{RW,grenz}$, mit denen alle Ausweichmanöver erkannt werden, werden somit gefunden. Mit den ermittelten Grenzwerten führt eine Ausweichmanövererkennung mit dem durch Gleichung (5.76) beschriebenen Kriterium allerdings zu FPs (Falscherkennungen). Mit insgesamt fünf bzw. zwei FPs ist die Anzahl der Fehler gering.

Alle FPs entstehen bei Fahrversuchen der Kategorie „Überholmanöver nach Folgefahrt mit vorherigem Wedeln“. Werden diese Manöver vernachlässigt³⁷, so **bewährt sich Hypothese 3**.

Ein direkter Vergleich beider Varianten (ganze/halbe Muster) zeigt, dass hinsichtlich der Anzahl der Falscherkennungen eine Verwendung von halben Mustern bei den durchgeführten Versuchen mit zwei FPs im Vergleich zu fünf FPs besser abschneidet. Zusätzlich hat eine Verwendung von halben Mustern aufgrund der kürzeren Erkennungszeit methodenbedingt Vorteile.

6.3.4 Diskussion

Hypothese 3 bewährt sich nur unter Vernachlässigung der Versuche der Kategorie „Überholmanöver nach Folgefahrt mit vorherigem Wedeln“. Treten solche Manöver im realen Verkehr „selten“ auf, dann ist eine Vernachlässigung gerechtfertigt, da daraus nur eine „geringe“ die Akzeptanz nicht beeinflussende Anzahl von FPs resultiert. Weitere Versuche, auch mit Probanden, können Aufschluss über die Zulässigkeit der Annahme und die Akzeptanz von FPs geben.

Ist eine Vernachlässigung nicht zulässig, ist die Verwendung eines Zusatzkriteriums denkbar. Bei den durchgeführten Versuchen zeigte beispielsweise die Fahrzeuglängsbeschleunigung a_x Unterschiede. Diese war bei den durchgeführten Ausweichmanövern, gemittelt über 0,5 s nach Manöverende, stets kleiner als $-0,6 \text{ m/s}^2$. Bei den fälschlicherweise als Ausweichmanöver erkannten Überholvorgängen war diese stets positiv. Ein versuchsbedingter Einfluss kann allerdings nicht ausgeschlossen werden. Zur Überprüfung sind daher weitere Versuche erforderlich.

Die Evaluierungsversuche wurden an insgesamt drei Versuchstagen von drei Fahrern mit unterschiedlicher Fahrpraxis durchgeführt. Bei den ermittelten Ergebnissen wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Dies deutet auf eine Reproduzierbarkeit der Versuche hin.

Alle Versuche basieren auf Messdaten, die mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Versuchsmotorrad aufgenommen wurden. Ein anderes Motorrad kam nicht zum Einsatz. Damit sind die ermittelten Ergebnisse nur für das erwähnte Motorrad gültig. Bei den durchgeführten Versuchen wurden die Parameter Querbewegung, seitlicher Versatz, Typ des Manövers und Fahrzeuglängsgeschwindigkeit variiert. Nach den Ergebnissen aus Abschnitt 5.4.1 sind dies die zur Beschreibung eines Ausweichmanövers relevanten Parameter. Diese und damit auch Amplitude und Frequenz der Querbewegung wurden in bei realen Ausweichmanövern üblichen Bereichen variiert. Daher wird eine Übertragbarkeit der Ergebnisse angenommen.

Die Objektivität der Ergebnisse ist durch die Bestimmung der in Abschnitt 5.4.2 abgeleiteten Korrelationsfaktoren, die unabhängig von subjektiven Bewertungen sind, gegeben. Zur Bewertung der Reliabilität werden die Auswirkungen von um 5% niedrigeren Grenzwerten (als in den Tabellen 6.9 und 6.10 angegeben) betrachtet. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt:

³⁷siehe auch Abschnitt 6.3.4

ganzes Muster	
Erkennung	Anzahl
TP	180
FP	9
FN	0
TN	75

halbes Muster	
Erkennung	Anzahl
TP	180
FP	5
FN	0
TN	79

Bei beiden Varianten steigt die Anzahl der FPs. Bei ganzen Mustern treten vier zusätzliche Falscherkennungen auf. Neben zwei weiteren Versuchen der Kategorie „Überholen nach Folgefahrt und Wedeln“ (Versuch-Nr. 221 und 228) kommt jeweils ein Versuch aus den Kategorien „Überholen nach Folgefahrt“ (Versuch-Nr. 212) und „Slalom“ (Versuch-Nr. 242) hinzu.

Bei halben Mustern treten drei zusätzlichen Falscherkennungen aus der Kategorie „Überholen nach Folgefahrt und Wedeln“ (Versuch-Nr. 224, 225 und 227) auf. Im Gegensatz zur Verwendung von ganzen Mustern werden bei der Verwendung von halben Mustern nur in einer Kategorie andere Manöver fälschlicherweise als Ausweichmanöver erkannt. Dies deutet auf eine höhere Reliabilität hin. Weitere Versuche, wie bereits genannt, können Aufschluss geben, ob die erreichte Reliabilität akzeptabel ist oder ein Zusatzkriterium erforderlich ist.

7 Warnmaßnahmen

Neben einem Modul zur Erkennung von Gefahrstellen, wie in den Kapiteln 5 und 6 untersucht, ist eines zur Warnung des Fahrers Bestandteil eines kbWs. Basierend auf den in Abschnitt 2.5 abgeleiteten Fragestellungen werden in diesem Kapitel daher Möglichkeiten zur Gestaltung einer wirksamen, akzeptierten und aufgabenangemessenen Warnmaßnahme behandelt. Die daraus resultierenden Gestaltungsbeispiele werden in Kapitel 8 bewertet.

7.1 Methodik

Warnmaßnahmen in einem kbW für Motorräder erfordern eine Schnittstelle zwischen Fahrer und Motorrad. Timpe et al. definieren diese Mensch-Maschine-Schnittstelle, auch als *Human Machine Interface* (HMI) bezeichnet, als „ein zielgerichtetes Zusammenwirken von Personen mit technischen Systemen zur Erfüllung eines Auftrages¹“. Bruder et al. unterteilen HMIs in Anzeige- und Bedienelemente². Diese Arbeit behandelt nur die Ausgabe von Warnmeldungen, d. h. die Informationsweitergabe von Maschine zu Mensch. Daher werden nur Anzeigeelemente näher untersucht. Dies schließt nicht die Möglichkeit der Integration von Bedienelementen in ein kbW für Motorräder aus, z. B. durch Verwendung eines Warnschalters.

Basierend auf Gestaltungsrichtlinien, Normen und entsprechender Literatur behandelt Abschnitt 7.2 die Definition von Anforderungen an Warnmaßnahmen im Motorrad. In Abschnitt 7.3 wird eine Warnstrategie für ein kbW abgeleitet. Dies umfasst u. a. eine Bestimmung des Warnzeitraumes und eine Festlegung der Anzahl der Warnstufen. Abschnitt 7.4 stellt eine Methode zur Bewertung von Warnelementen und deren Zuordnung zu Warnstufen vor. Die Methode wird in Abschnitt 7.5 auf eine Auswahl von Warnelementen angewendet. Daraus resultieren mehrere Gestaltungsbeispiele, die anhand einer Überprüfung der Anforderungen in Kapitel 8 bewertet werden.

7.2 Anforderungen

7.2.1 Anforderungen an die HMI-Gestaltung

Bei der HMI-Gestaltung sind die Aspekte Wirksamkeit, Akzeptanz und Aufgabenangemessenheit von Bedeutung^{3,4,5}. Ziel der HMI-Gestaltung ist, das HMI hinsichtlich dieser drei

¹Timpe et al. (2002): Mensch-Maschine-Systematik

²Bruder et al. (2009): Gestaltung von MMS, S. 315 ff.

³Breuer (2009): Bewertungsverfahren von FAS, S. 55

⁴Klanner (2008): Kommunikationsbasierte Querverkehrsassistenz, S. 86

⁵Hoffmann (2008): Test und Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen, S. 69 ff.

Aspekte zu optimieren. Nachfolgend wird deren Bedeutung für die Gestaltung des HMIs unter Berücksichtigung der systemspezifischen Besonderheiten näher erläutert:

- **Wirksamkeit** - Ziel von Fahrerassistenzsystemen ist, den Fahrer bei der Erfüllung der Fahraufgabe zu unterstützen und durch das System eine Verbesserung von Fahrleistung und Fahrkomfort zu erreichen⁶.

Bezogen auf die hier zu entwickelnden Warnmaßnahmen wird dies wie folgt interpretiert: Der Fahrer wird veranlasst, bei mittelfristigen Warnungen⁷ rechtzeitig seine Fahrweise anzupassen⁸ und bei kurzfristigen Warnungen⁹ „besser vorbereitet“ (als ohne System) auf eine Gefahrensituation zu reagieren¹⁰.

- **Akzeptanz** - Hinsichtlich der Ausnutzbarkeit einer hohen technischen Wirksamkeit wird für ein kbW angenommen, dass für dieses eine hohe Akzeptanz durch den Nutzer erforderlich ist.

Dies bedeutet, dass der Nutzen des Systems dem Fahrer deutlich wird. Dieser empfindet das System als wirksam und unterstützend¹¹. Dies erfordert, dass das Systemverhalten konsistent sowie erwartungskonform gestaltet ist¹² und Falschwarnungen nicht als störend bewertet werden, also eine hohe Verzeihlichkeit aufweisen¹³.

- **Aufgabenangemessenheit** - Eine Aufgabe ist angemessen, wenn das System den Fahrer in der Erfüllung seiner Arbeitsaufgabe unterstützt.

Dies bedeutet, dass der Fahrer nur die für die Arbeitsaufgabe¹⁴ relevanten Informationen dargeboten bekommt und nicht durch Inhalte, die darüber hinausgehen, abgelenkt oder verwirrt wird¹⁵.

7.2.2 Anforderungsdefinition

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte ergeben sich folgende Anforderungen an ein HMI für das hier untersuchte kbW:

- **Wirksamkeit:**
 - Die Warnung wird von dem Fahrer wahrgenommen.
 - Die Warnung wird bei mittelfristigen Warnungen vom Fahrer als aufmerksamkeitssteigernd bewertet.
 - Der Fahrer fährt nach mittelfristigen Warnungen mit signifikant geringerer Geschwindigkeit als ohne Warnung auf eine Gefahrstelle zu.

⁶DIN EN ISO 15008 (2003): Visuelle Informationsdarstellung

⁷Definition: mehrere Sekunden vor Erreichen der Gefahrstelle (über 4 s bis zu 1 min)

⁸z. B. durch niedrigere Fahrgeschwindigkeit

⁹Definition: wenige Sekunden vor Erreichen der Gefahrstelle (bis zu 4 s)

¹⁰z. B. durch „stärkere Bremsung“

¹¹Mages (2008): Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten, S. 9 ff.

¹²Breuer (2009): Bewertungsverfahren von FAS, S. 55

¹³Hoffmann (2008): Test und Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen, S. 44, S. 89

¹⁴in diesem Fall das rechtzeitige und richtige Reagieren auf eine Gefahrensituation

¹⁵DIN EN ISO 9241-110 (2008): Mensch-System-Interaktion

- Die Warnung wird bei kurzfristigen Warnungen vom Fahrer als alarmierend bewertet.
- Bei kurzfristigen Warnungen reduziert der Motorradfahrer seine Fahrgeschwindigkeit signifikant.
- **Akzeptanz:**
 - Die Warnung wird vom Fahrer als wirksam bewertet.
 - Der Fahrer beurteilt die Warnung als unterstützend.
 - Der Fahrer erwartet nach der Warnung eine Gefahrstelle.
 - Der Fahrer empfindet eine Warnung bei Falschauslösungen nicht als störend.
- **Aufgabenangemessenheit:**
 - Der Fahrer empfindet die Warnungen als angemessen.
 - Der Fahrer bewertet die Warnungen nicht als verwirrend.

7.3 Warnstrategie

7.3.1 Warnstufen

Bei der Festlegung des Warnzeitraumes ergibt sich das so genannte Warndilemma¹⁶. Für Fahrerassistenzsysteme bedeutet dies in der Regel, dass die Wahrscheinlichkeit einer Falschwarnung umso höher ist, desto früher eine Warnung stattfindet. Um dem Fahrer eine angemessene und rechtzeitige Reaktion auf eine Gefährdung zu ermöglichen, ist andererseits eine möglichst frühe Warnung erforderlich.

DIN 15006 definiert für auditive Warnungen drei Stufen: langfristige, mittelfristige und kurzfristige Informationen¹⁷. Hoffmann unterscheidet zwischen frühen, mittleren und späten Einsatzpunkten¹⁸. Für den untersuchten Anwendungsfall werden langfristige Informationen bzw. frühe Einsatzpunkte ausgeschlossen, da diese mehrere Minuten vor einem Erreichen der Gefährdung erfolgen. Daher wird die Anzahl der Warnstufen auf zwei festgelegt.

Um den Fahrer angemessen zu warnen, wird eine Information mindestens über Art der Gefahrstelle und Entfernung zu dieser angestrebt. Dies erfordert Informationsverarbeitungsprozesse durch den Fahrer, da angenommen wird, dass eine Handlungsplanung erfolgt. Dies widerspricht der Anforderung nach einer möglichst kurzen Reaktionszeit. Um dennoch beide Aspekte zu berücksichtigen, werden diese auf die zwei Warnstufen verteilt. Mittelfristig erfolgt eine informierende Warnung und kurzfristig eine alarmierende Warnung. Die Warnstrategie ist in Abbildung 7.1 dargestellt und nachfolgend näher beschrieben:

- **Informierende Warnstufe:** Diese Warnstufe liefert dem Fahrer Informationen über die bevorstehende Gefahrstelle (mindestens über Art und Entfernung). Um dem Fahrer ausreichend Zeit für die Informationsverarbeitung zu bieten, erfolgt diese Warnung möglichst früh. Ziel der Warnung ist einer Aufmerksamkeitserhöhung, eine sofortige Reaktion des Fahrers ist aber nicht erforderlich.

¹⁶Mages et al. (2009): Kreuzungsassistentz, S. 579

¹⁷DIN EN ISO 15006 (2004): Auditive Informationen, S. 6 f.

¹⁸Hoffmann et al. (2009): Fahrerwarnelemente, S. 349

- **Alarmierende Warnstufe:** Diese Warnstufe wird dem Fahrer kurzfristig, d. h. nahe an der Gefahrstelle, dargeboten, wenn die informierende Warnung keine passende Reaktion des Fahrers bewirkt hat. Informationsverarbeitungsprozesse werden möglichst kurz gehalten, um eine schnelle, deutliche Reaktion zu erreichen, z. B. durch sofortigen Geschwindigkeitsabbau.

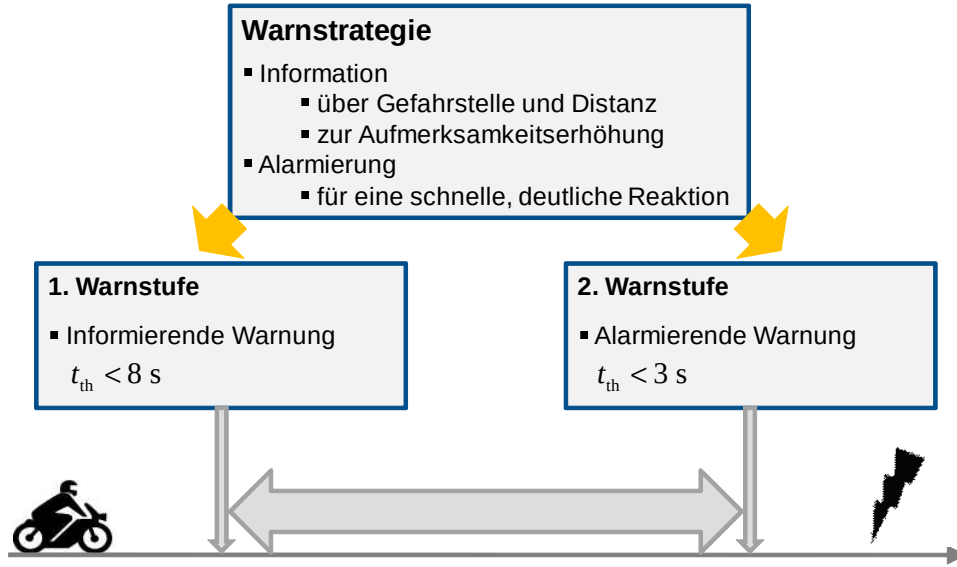


Abbildung 7.1: Warnstrategie mit informierender und alarmierender Warnstufe (Auslöschwellen in Abhängigkeit der Zeitlücke t_{th})

7.3.2 Warnzeitpunkte

Für die Festlegung der Warnzeitpunkte wird in Anlehnung an die von Frontalkollisionswarnsystemen bekannte *Time To Collision* (TTC) eine *Time To Hazard* (TTH) eingeführt. Die TTH wird in Abhängigkeit der Entfernung zur Gefahrstelle s_H und der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X wie folgt als Zeitlücke zur Gefahrstelle t_{th} definiert:

$$t_{th} = \frac{s_H}{v_X} \quad (7.1)$$

Die Entfernung zur Gefahrstelle s_{H,W_i} während der Auslösung der Warnstufe W_i setzt sich wie folgt zusammen:

$$s_{H,W_i} = s_{Br,i} + s_R + s_{GPS} \quad (7.2)$$

s_{Br} ist der Bremsweg bis zum Stillstand, s_R der Reaktionsweg und s_{GPS} die Ungenauigkeit der Positionsbestimmung. Unter Vernachlässigung von Ansprech- und Schwellzeit wird der Bremsweg s_{Br} in Abhängigkeit von Anfangsgeschwindigkeit v_0 und Verzögerung d_B wie folgt abgeschätzt:

$$s_{Br} = \frac{v_0^2}{2 \cdot d_B} \quad (7.3)$$

s_R ist der Weg, der innerhalb der Reaktionszeit t_R zurückgelegt wird, und daher wie folgt von der Anfangsgeschwindigkeit v_0 abhängig:

$$s_R = v_0 \cdot t_R \quad (7.4)$$

s_{GPS} beschreibt die Ungenauigkeit der Positionsbestimmung. Eine absolute Positionsbestimmung erfolgt in kommunikationsbasierten Fahrerassistenzsystemen in der Regel über GPS. Standardmäßig verwendete GPS-Empfänger erreichen eine Genauigkeit von ca. 7 m¹⁹. Da dieser Fehler bei der Positionsbestimmung von Gefahrstelle und Motorrad möglich ist, wird nachfolgend von $s_{\text{GPS}} = \sqrt{s_{\text{GPS1}}^2 + s_{\text{GPS2}}^2} \approx 10 \text{ m}$ ausgegangen. Bei Annahme einer Reaktionszeit von $t_{\text{R}} = 1 \text{ s}$ und einer Verzögerung von $d_{\text{B1}} = 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ (Teilbremsung, z. B. durch das Motorschleppmoment²⁰) bei einer informierenden Warnung sowie einer Vollbremsung ($d_{\text{B2}} = 10,0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$)²¹ bei einer alarmierenden Warnung ergeben sich für typische Geschwindigkeiten auf Landstraßen die in Tabelle A.12 im Anhang A.8 aufgeführten Zeitlücken. Diese betragen bei der informierenden Warnstufe bis zu $t_{\text{th1}} = 8 \text{ s}$ und bei der alarmierenden Warnstufe bis zu $t_{\text{th2}} = 3 \text{ s}$.

Um alle Geschwindigkeitsbereiche abzudecken, werden daher folgende Zeitlücken t_{th} als Zeitpunkte für die beiden Warnstufen festgelegt:

- $t_{\text{th1}} = 8 \text{ s}$
- $t_{\text{th2}} = 3 \text{ s}$

7.4 Bewertung und Zuordnung von Warnelementen

inform. alarm. Warnstufe	(mittel)	(spät)	Abdeckungsrate			Informationsgehalt			Verzeihlichkeit			Irritationspotential		
			niedrig	mittel	hoch	aufmerksamkeits- erregend	hinweisend auf die Situation	hinweisend auf die Aktion	weniger verzeihlich	verzeihlich	sehr verzeihlich	große Ablenkung und Verwirrung	mittel	geringe Ablenkung und Verwirrung
	X	X	X	X	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓
	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	X	✓	✓

Abbildung 7.2: Portfolio-Diagramm nach Hoffmann (Haken: geeignet, Kreuz: nicht geeignet, Anpassungen sind grau unterlegt)

Grundlage für die Zuordnung von Warnelementen zu den beiden Warnstufen ist eine von Hoffmann entwickelte Methode²² (siehe auch Abbildung 7.2). Mit dieser werden Warn-elemente hinsichtlich Abdeckungsrate, Informationsgehalt und Verzeihlichkeit bewertet. Portfolio-Diagramme geben basierend auf der Bewertung an, ob Warnelemente für frühe, mittlere oder späte Einsatzzeitpunkte geeignet sind. Die genannte Methode ist für Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ausgelegt. Für eine Übertragbarkeit der Methodik auf Warnmaßnahmen in einem kbW für Motorräder werden folgende Anpassungen vorgenommen, die in erwähnter Abbildung grau unterlegt sind:

¹⁹Schmidt (2010): Satellitennavigations- und Fahrdynamiksensordaten, S. 20

²⁰Stoffregen (2006): Motorradtechnik, S. 223

²¹Weidele (1994): Motorradbremsung, S. 64

²²Hoffmann (2008): Test und Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen, S. 49 ff.

- Hinsichtlich des Informationsgehaltes besteht für die informierende Warnstufe, d. h. für einen mittleren Einsatzzeitpunkt, die Anforderung nach einer erhöhten Aufmerksamkeit (siehe auch Abschnitt 7.2). Ein aufmerksamkeitserregendes Warnelement wird daher als ausreichend angenommen. Ein Hinweis auf die erforderliche Aktion wird aufgrund der relativ großen Entfernung zur Gefahrstelle als zu früh bewertet. Aufgrund der Nähe zur Gefahrstelle ist für die alarmierende Warnstufe, d. h. für einen späten Einsatzpunkt, eine unmittelbare Reaktion des Fahrers erforderlich. Wie bei Hoffmann werden daher aufmerksamkeitserregende Warnelemente aufgrund der erhöhten Informationsverarbeitungsdauer als nicht geeignet bewertet. Da das untersuchte kbW vor Gefahrstellen warnt, aber keine Handlungsempfehlungen gibt, werden alle hinweisenden Warnelemente als geeignet angesehen.
- Aufgrund der erhöhten mentalen und physischen Beanspruchung des Fahrers beim Motorradfahren wird davon ausgegangen, dass im Vergleich zum Pkw-Fahren eine Konzentration auf die eigentliche Fahraufgabe noch wichtiger ist²³. Daraus folgt die Einführung des Irritationspotentials als zusätzliches Bewertungskriterium. Dieses umfasst die Dimensionen Ablenkung und Verwirrung des Fahrers. Ein hohes Irritationspotential wird daher als Ausschlusskriterium für alle Warnzeitpunkte definiert. Bei späten Warnungen wird ein niedriges Irritationspotential gefordert, um eine möglichst hohe Konzentration auf die Fahraufgabe zu ermöglichen.

7.5 Gestaltungsbeispiele

7.5.1 Vorauswahl

Ziel der Vorauswahl ist eine Reduzierung der Anzahl der möglichen Warnelemente. Daher erfolgt eine Begrenzung auf Konzepte, die sich, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, als Warnelemente in anderen Systemen für Motorräder bewährt haben. Außerdem wird mindestens ein Element für jeden in Kraftfahrzeugen für Warnungen erreichbaren Sinneskanal (visuell, auditiv, haptisch²⁴) berücksichtigt. Daraus ergibt sich eine Vorauswahl von folgenden in Abbildung 7.3 dargestellten Warnelementen:

- Display am Lenker
- LED-Leiste am Ende des Cockpits
- Warnblitzer ähnlich einem Schaltblitzer
- Headset zur Übertragung von Sprachwarnungen und Warntönen
- Haptischer Sitz zur Warnung durch Vibrationen

²³Funke (2007): Belastung von Motorradfahrern, S. 15

²⁴König (2009): MMI-Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, S. 35



Abbildung 7.3: Übersicht der Warnelemente: Haptischer Sitz, Sprachwarnung/Warntöne, Warnblitzer, LED-Leiste, Display

7.5.2 Bewertung und Zuordnung

Die in Abschnitt 7.4 beschriebene Methode erlaubt eine Zuordnung der vorausgewählten Warnelemente zu den beiden Warnstufen bzw. eine Reduzierung der Kombinationsmöglichkeiten. Basierend auf den Ergebnissen einer Expertenbewertung, durch Anwendung der genannten Methode, ergeben sich folgende drei Varianten für jede Warnstufe²⁵:

V 1.1	V 1.2	V 1.3
- Warnblitzer	- Haptischer Sitz	- Sprachwarnung
- Display	- Display	- Display
V 2.1	V 2.2	V 2.3
- Sprachwarnung	- Warntöne	- Haptischer Sitz
- LED-Leiste	- Haptischer Sitz	- LED-Leiste

Die Bestimmung der spezifischen Parameter der ausgewählten Warnelemente erfolgt basierend auf Normen (z. B. ISO 9241²⁶, ISO 15006²⁷, ISO 15008²⁸, ISO 17287²⁹), Gestaltungsrichtlinien (z. B. *European Statement of Principles on HMI*³⁰) sowie Vorversuchen mit Probanden. Nachfolgend werden die realisierten Varianten beschrieben.

V 1.1: Warnblitzer und Display

Das Display ist oberhalb der obersten Gabelbrücke angebracht. Der Anzeigenbereich hat eine Größe von ca. 70 mm x 40 mm. Das Display ist monochrom, verfügt über eine Auflösung von 128 x 64 Pixel und hat eine blaue Hintergrundbeleuchtung. Auf dem Display werden

²⁵siehe auch Lattke et al. (2010): A Communication-Based ADAS for Motorcycles, S. 61 ff.

²⁶DIN EN ISO 9241-110 (2008): Mensch-System-Interaktion

²⁷DIN EN ISO 15006 (2004): Auditive Informationen

²⁸DIN EN ISO 15008 (2003): Visuelle Informationsdarstellung

²⁹DIN EN ISO 17287 (2003): Gebrauchstauglichkeit

³⁰EU (2006): Statements of Principles on HMI

ein Warnsymbol (ähnlich Verkehrszeichen 101 der StVO³¹) sowie Entfernung und Richtung zur Gefahrenstelle angezeigt.

Der Warnblitzer ist rechts neben dem Display angebracht und besteht aus 15 gelb leuchtenden LEDs mit einer Lichtstärke von insgesamt ca. 2000 mcd. Die Blinkfrequenz beträgt 3 Hz bei einer Leuchtdauer von 50% (der Periodendauer) und insgesamt sechs Blinkvorgängen.

V 1.2: Haptischer Sitz und Display

Unter der Sitzfläche des Motorrades befindet sich ein 12V-Gleichstrommotor mit einer Leistung von ca. 25 W, der eine Unwucht in Bewegung setzt, um Vibrationen an den Fahrer zu übermitteln. Die Dauer der (ununterbrochenen) Warnung beträgt 3 s. Die Gestaltungsparameter des Displays sind gleich wie bei Variante V 1.1.

V 1.3: Sprachwarnung und Display

Der Fahrer wird über ein Headset gewarnt, welches er unter dem Helm trägt. Dieses ist über ein Kabel mit der Motorradelektronik verbunden. Dem Fahrer wird die Sprachwarnung „Vorsicht, Gefahrstelle!“ einmalig übermittelt. Die Gestaltungsparameter des Displays sind gleich wie bei Variante V 1.1.

V 2.1: Sprachwarnung und LED-Leiste

Der Fahrer wird über das Headset (Beschreibung siehe Variante V 1.3) gewarnt. Ihm wird die Sprachwarnung „Achtung!“ mit zweimaliger Wiederholung übermittelt.

Die LED-Leiste ist am oberen Ende des Cockpits bzw. am unteren Ende der Windschutzscheibe angebracht und besteht aus 18 LEDs mit einer Lichtstärke von ca. 400 mcd je LED. Die LEDs leuchten rot bei einer Blinkfrequenz von 4 Hz, einer Leuchtdauer von 50% (der Periodendauer) und insgesamt zehn Blinkvorgängen.

V 2.2: Warntöne und Haptischer Sitz

Die Warntöne werden über das Headset (Beschreibung siehe Variante V 1.3) an den Fahrer übermittelt. Das Warnsignal besteht aus insgesamt fünf Tonimpulsen mit einer Frequenz von 400 Hz und einer Gesamtdauer von 2,5 s.

Der haptische Sitz entspricht dem von Variante V 1.2. Allerdings ist der Verlauf der Vibrationen mit 2 Hz (d.h. 250 ms Vibrationen abwechselnd mit 250 ms Pause) pulsierend bei insgesamt fünf Pulsen.

V 2.3: Haptischer Sitz und LED-Leiste

Die Gestaltungsparameter des haptischen Sitzes entsprechen denen von Variante V 2.2 und die der LED-Leiste denen von Variante V 2.1.

³¹BGBI.: StVO (Stand 12/2010), Anlage 1

8 Bewertung von Warnmaßnahmen

Abschnitt 8.1 beschreibt die Konzeption einer Probandenstudie als Methode zur Evaluierung von Warnmaßnahmen im Motorrad hinsichtlich der Erfüllung der in Abschnitt 7.2 definierten Anforderungen. Die Methode wird auf die in Abschnitt 7.5 dargestellten Gestaltungsbeispiele angewendet. Abschnitt 8.2 präsentiert die Ergebnisse der Probandenstudie, aus denen sich das Fazit in Abschnitt 8.3 ableitet.

8.1 Konzeption einer Probandenstudie

8.1.1 Probandenkollektiv

Um den Einfluss bestimmter Probandenmerkmale (z. B. Alter) zu minimieren, empfehlen Bubb und Breuer die Vermeidung von Klumpenstichproben durch eine Gleichverteilung aller Probandengruppen mit gleichen Merkmalen^{1,2}. Mit der Anzahl n_i der Ausprägungen des Merkmals i ergibt sich bei k Merkmalen unter Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors SF (im Bereich von 3 bis 10) folgender Zusammenhang für die Mindestprobandenanzahl n je untersuchter Warnvariante:

$$n = SF \cdot \prod_{i=1}^k n_i \quad (8.1)$$

Andere Probandenstudien gehen davon aus, dass vor allem die Merkmale Alter und Fahrerfahrung Einfluss auf die Ergebnisse einer Probandenstudie haben^{3,4,5}. Bei jeweils zwei Ausprägungen je Merkmal führt dies zu insgesamt vier Gruppen. Die Einteilung der Probanden in die vier Gruppen ist in Tabelle 8.1 dargestellt. Weitere Angaben zu den ausgewählten Probanden befinden sich im Anhang A.9.1.

Nach Gleichung (8.1) ergibt sich bei einem Sicherheitsfaktor von $SF = 3$ folgende Probandenmindestanzahl je untersuchter Warnmaßnahme:

$$n = 3 \cdot 2 \cdot 2 = 12 \quad (8.2)$$

Bei drei Varianten und zwei unabhängigen Warnstufen erfordert dies daher insgesamt 36 Probanden.

¹Bubb (2003): Fahrversuche mit Probanden, S. 27

²Breuer (2009): Bewertungsverfahren von FAS, S. 56

³Funke (2007): Belastung von Motorradfahrern, S. 55 ff.

⁴Hoffmann (2008): Test und Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen, S. 59

⁵Hohm (2010): Überholassistentensystem, S. 46

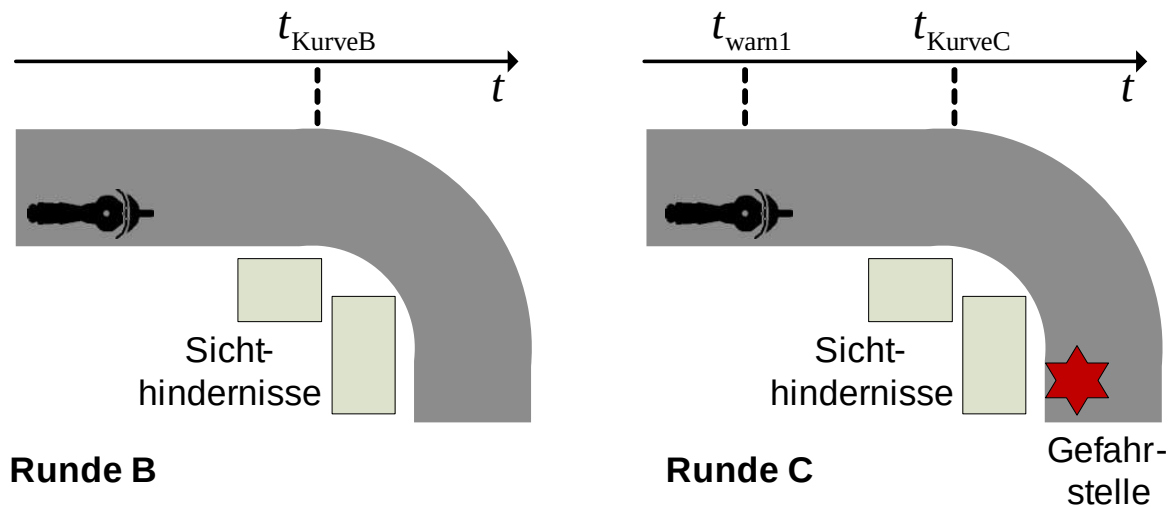
Tabelle 8.1: Festlegung von Probandenmerkmalen als Grundlage zur Probandeneinteilung

Gruppe		Alter	km seit Fahrerlaubnis		km pro Jahr
G1	jünger & eher erfahren	≤ 35 Jahre	≥ 10.000	UND	≥ 2.500
G2	jünger & eher unerfahren	≤ 35 Jahre	< 10.000	ODER	< 2.500
G3	älter & eher erfahren	> 35 Jahre	≥ 85.000	UND	≥ 2.500
G4	älter & eher unerfahren	> 35 Jahre	< 85.000	ODER	< 2.500

8.1.2 Versuchsaufbau

Informierende Warnstufe

Abbildung 8.1 zeigt den Versuchsaufbau zu den Evaluierungsversuchen für die informierende Warnstufe. Die Probanden fahren insgesamt drei Runden (Runde A bis C) auf einer vorgegebene Rundstrecke im kontrollierten Feld. Um zu vermeiden, dass die Probanden in Runde C ein besonderes Ereignis erwarten, erhalten sie die Anweisung, insgesamt fünf Runden zu fahren. Vor Fahrtbeginn wird auf die Warnfunktion des Displays hingewiesen. Die dargestellte Kurve ist Teil der Rundstrecke. Das Kurvenende ist sowohl während der Anfahrt als auch beim Kurveneintritt nicht zu erkennen, da Hindernisse die Sicht versperren.

**Abbildung 8.1:** Versuchsaufbau zur Evaluierung der informierenden Warnstufe

Ziel der Versuche ist eine Bewertung der drei Varianten der informierenden Warnstufe bei Zufahrten auf potentielle Gefahrstellen. Daher werden ungewarnte und gewarnte Fahrten durchgeführt. Während der ersten beiden Runden erfolgt keine Warnung. In Runde C werden die Probanden bei einem zeitlichen Abstand zum Kurvenbeginn von $t_{\text{th1}} = 8$ s (Zeitpunkt $t = t_{\text{warn1}}$) mit einer der drei Varianten gewarnt. Details zur Verteilung der Warnvarianten auf die Probanden befinden sich im Anhang A.9.1 in Tabelle A.13. Zur Simulation einer Gefahrstelle und damit zur Erhöhung der Realitätsnähe befindet sich in Runde C am Kurvenende ein kleines Fahrzeug auf der Fahrbahn. Um die Sicherheit der Probanden zu gewährleisten, ist ein Ausweichen problemlos möglich.

Die Messung der Fahrgeschwindigkeit bei Kurveneintritt in Runde B (Zeitpunkt t_{KurveB}) und in Runde C (Zeitpunkt t_{KurveC}) ist u. a. Grundlage zur Bewertung. Runde A wird nicht näher untersucht, um den Einfluss von Eingewöhnungseffekten zu reduzieren. Eine Falschwarnung (mit einer anderen Warnvariante) dient bei einer anschließenden Folgefahrt hinter einem Pkw auf einem geraden Abschnitt der Teststrecke als Grundlage zur Bewertung der Verzeihlichkeit.

Nachfolgende Auflistung fasst den Ablauf der Evaluierungsversuche für die informierende Warnstufe zusammen:

1. Runde A: Eingewöhnungsrunde
2. Runde B: ungewarnte Fahrt ohne Gefahrstelle
3. Runde C: gewarnte Fahrt mit Gefahrstelle
4. Falschwarnung (mit einer anderen Warnvariante)

Alarmierende Warnstufe

Abbildung 8.2 zeigt den Versuchsaufbau zu den Evaluierungsversuchen für die alarmierende Warnstufe. Die Probanden erhalten die Anweisung, einem vorgegebenen Streckenverlauf im kontrollierten Feld zu folgen. Der dargestellte Ausschnitt ist ein Teil der Strecke. Einer Kurve folgt eine Gerade, auf der sich ca. 100 m nach Kurvenende ein ca. 1 m x 2 m großer Sandfleck befindetet.

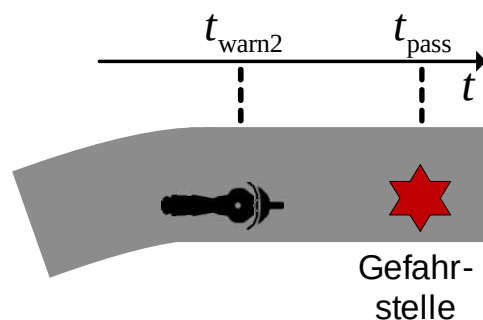


Abbildung 8.2: Versuchsaufbau zur Evaluierung der alarmierenden Warnstufe

Ziel dieses Versuches ist eine Bewertung der drei Varianten der alarmierenden Warnstufe bei Zufahrten auf eine Gefahrstelle. Um eine „kurzfristige“ Reaktion hervorzurufen, ist die Gefahrstelle so gestaltet, dass sie zunächst von den Probanden nicht als solche erkannt wird⁶. Im Gegensatz zu den Versuchen für die informierenden Warnstufe passieren die Probanden nur einmal diesen Streckenabschnitt. Um zwischen ungewarnten und gewarnten Fahrern zu unterscheiden, erhält ein Teil der Probanden keine Warnung bei Zufahrt auf die Gefahrstelle. Damit erhöht sich die Anzahl der Versuchsvarianten auf vier. Die Verteilung der Warnvarianten auf die Probanden befindet sich im Anhang A.9.1 in Tabelle A.13.

⁶Vorversuche ergaben, dass beim Zufahren auf den erwähnten Sandfleck, dieser nicht als gefährlich eingeschätzt wird.

Grundlage für die Bewertung der Versuche ist u. a. die Messung der Fahrgeschwindigkeit bei einer Zeitlücke von $t_{th2} = 3$ s (Zeitpunkt $t = t_{warn2}$) und beim Passieren der Gefahrstelle (Zeitpunkt t_{pass}). Wie bei den Versuchen zur informierenden Warnstufe dient eine Falschwarnung (mit einer anderen Warnvariante) bei einer anschließenden Folgefahrt hinter einem Pkw auf einem geraden Abschnitt der Teststrecke als Grundlage zur Bewertung der Verzeihlichkeit.

Nachfolgende Auflistung fasst den Ablauf der Evaluierungsversuche für die alarmierende Warnstufe zusammen:

1. Passage einer Gefahrstelle
 - a) neun Probanden ohne Warnung (Variante V 2.0)
 - b) je neun Probanden mit Warnung (Varianten V 2.1, V 2.2 und V 2.3)
2. Falschwarnung (zwölf Probanden je Variante)

8.1.3 Probandenbewertung

Neben den bereits in den beiden vorherigen Abschnitten beschriebenen objektiven (Mess-)Daten werden durch eine Probandenbefragung subjektive Daten zur Evaluierung der Warnmaßnahmen erfasst. Durch Beantwortung des im Anhang A.9.2 befindlichen Fragebogens (Abbildung A.12 bis A.15) bewerten die Probanden die Varianten der beiden Warnstufen hinsichtlich folgender aus den Anforderungen (siehe Abschnitt 7.2) abgeleiteter Punkte:

- **Wirksamkeit:**
 - wahrgenommene Warnelemente
 - Wahrnehmbarkeit
 - Aufmerksamkeitssteigerung (nur informierende Warnstufe)
 - Alarmierungsgrad (nur alarmierende Warnstufe)
- **Akzeptanz:**
 - empfundene Wirksamkeit
 - Unterstützung
 - Gefahrenenerwartung (nach erfolgter Warnung)
 - Verzeihlichkeit
- **Aufgabenangemessenheit:**
 - Angemessenheit
 - Verwirrung

8.2 Ergebnisse

8.2.1 Informierende Warnstufe

Wirksamkeit

Abbildung 8.3 zeigt die kumulativen Häufigkeiten zu den Geschwindigkeiten aller Probanden bei Versuchen zur informierenden Warnstufe. In den Plots a bis c sind die Kurveneintrittsgeschwindigkeiten v_{KurveB} und v_{KurveC} dargestellt, d. h. die Fahrzeuglängsgeschwindigkeiten zu den Zeitpunkten $t = t_{\text{KurveB}}$ und $t = t_{\text{KurveC}}$. Dies ermöglicht für jede Variante einen Vergleich der Fahrten ohne und mit Warnung. In Plot d sind die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Warnung (Zeitpunkt $t = t_{\text{warn1}}$) und Kurveneintritt (Zeitpunkt $t = t_{\text{KurveC}}$) für alle drei Varianten dargestellt, d. h. $\Delta v_X = v_{\text{KurveC}} - v_{\text{warn1}}$. Dies ermöglicht einen Vergleich der Varianten untereinander.

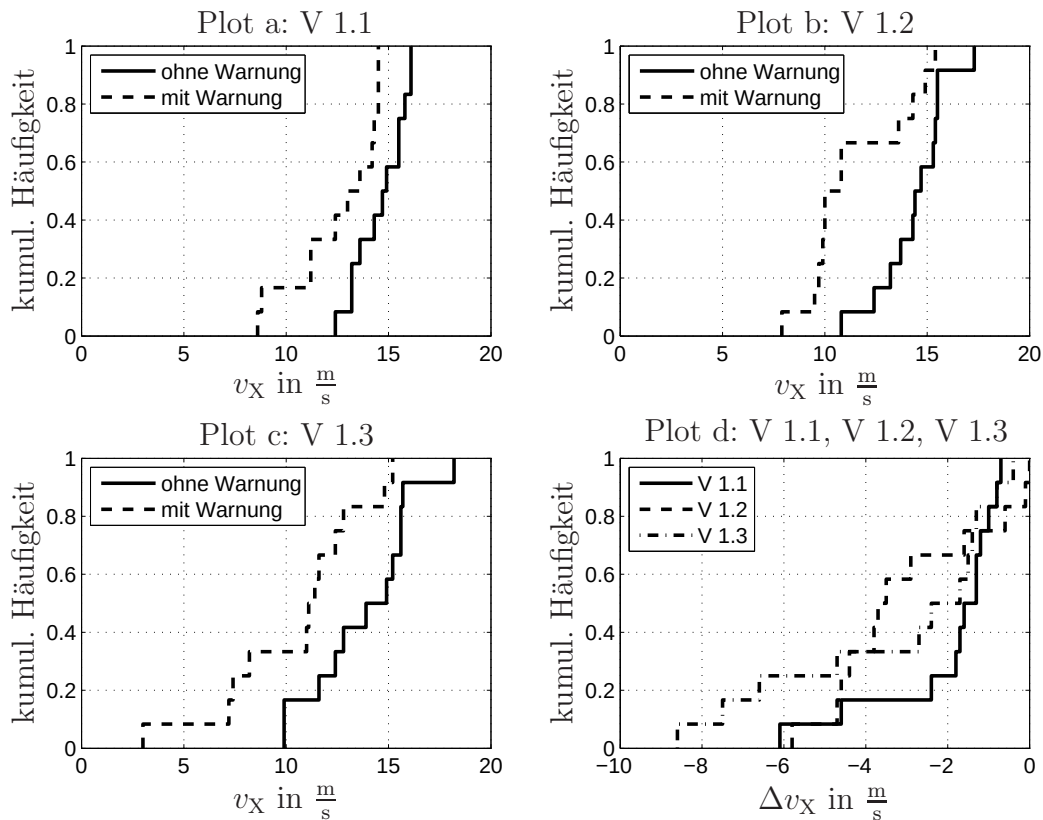


Abbildung 8.3: Plot a bis c: Kurveneintrittsgeschwindigkeiten ohne Warnung ($v_X = v_{\text{KurveB}}$) und mit Warnung ($v_X = v_{\text{KurveC}}$) für $n = 12$ je Variante, Plot d: Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Warnzeitpunkt und Kurveneintritt ($\Delta v_X = v_{\text{KurveC}} - v_{\text{warn1}}$) für $n = 12$ je Variante

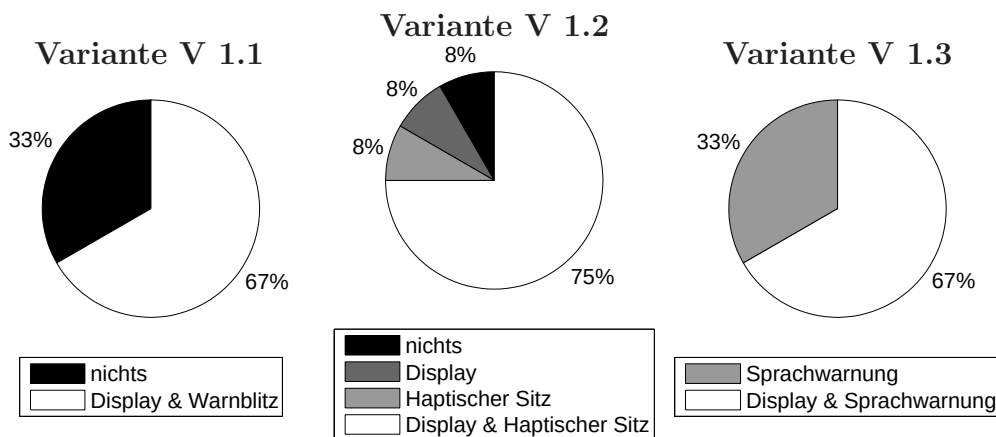
Aufgrund der Abhängigkeit der Stichproben erfolgt ein Vergleich der Fahrten ohne und mit Warnung durch einen Wilcoxon-Paardifferenzen-Test. Tabelle 8.2 enthält die Ergebnisse. Die Nullhypothese des Testes, dass sich die Mediane nicht unterscheiden, wird bei allen drei Varianten mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 0,1% abgelehnt. Dies bedeutet, dass sich die Mediane der Kurveneintrittsgeschwindigkeiten bei Fahrten mit Warnung höchstsignifikant von denen ohne Warnung unterscheiden.

Tabelle 8.2: Mediane der Kurveneintrittsgeschwindigkeiten (siehe auch Plot a bis c in Abbildung 8.3) und Signifikanzbetrachtungen nach Wilcoxon-Paardifferenzen-Tests

	V 1.1	V 1.2	V 1.3
$\tilde{v}_{\text{KurveB}}$ in m/s	14,8	14,6	14,4
$\tilde{v}_{\text{KurveC}}$ in m/s	13,8	10,4	11,3
p-Wert	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$
Signifikanz	höchstsignifikant	höchstsignifikant	höchstsignifikant

Ein Vergleich der Varianten untereinander (siehe Plot d in Abbildung 8.3) zeigt, dass bei Variante V 1.2 der Median der Geschwindigkeitsdifferenz mit $\Delta\tilde{v}_X = -3,6$ m/s betragsmäßig am größten ist. Zur Überprüfung auf signifikante Unterschiede erfolgt aufgrund der angenommenen Unabhängigkeit der Stichproben ein Wilcoxon-Rangsummen-Test. Die Hypothese, dass die Mediane der Geschwindigkeitsdifferenzen gleich sind, wird bei den drei möglichen Vergleichen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% jeweils nicht abgelehnt. Dies bedeutet, dass darauf basierend eine Aussage über Unterschiede zwischen den Varianten nicht möglich ist.

Abbildung 8.4 zeigt den Anteil der **wahrgenommenen Warnelemente**. V 1.1 wird von ca. 33% der Probanden nicht erkannt. Bei V 1.2 nimmt nur ein Proband keines der Elemente wahr, alle anderen mindestens eines. Bei V 1.3 registrieren alle Probanden mindestens ein Element.

**Abbildung 8.4:** Vom Fahrer wahrgenommene Warnelemente für $n = 12$ je Variante

Abgesehen von Probanden, die bei V 1.1 keines der Elemente wahrgenommen haben, sind mit einem Wilcoxon-Rangsummen-Test hinsichtlich der Punkte **Wahrnehmbarkeit** und **Aufmerksamkeitssteigerung** keine signifikanten Unterschiede feststellbar, d. h. $p\text{-Wert} > 0,05$. Alle Varianten werden mehrheitlich als *gut wahrnehmbar* und *aufmerksamkeitssteigernd* bewertet. Die Bewertung des letztgenannten Punktes ist bei V 1.3 tendenziell besser als die von V 1.2, d. h. $p\text{-Wert} \leq 0,20$. Anhang A.9.3 enthält weitere Angaben zur Antwortenverteilung. Ergebnisse der Signifikanztests befinden sich im Anhang A.9.4.

Akzeptanz

Beispielhaft für die Akzeptanzbewertungen sind in Abbildung 8.5 die Antwortverteilungen der Fragen zu **Gefahrenerwartung** und zu **Verzeihlichkeit** dargestellt. Demnach *erwartet* bei V 1.2 und V 1.3 die große Mehrheit der Probanden (zehn bzw. elf von zwölf) nach der Warnung eine Gefahrstelle. Bei V 1.1 ist dieser Anteil mit fünf von zwölf Probanden deutlich geringer. Insgesamt wird dennoch von der Mehrheit der Probanden (acht von zwölf) eine Gefahrstelle mindestens *eher erwartet*.

Die Verzeihlichkeit von V 1.2 bewerten die meisten Probanden als hoch. Zehn von zwölf Probanden empfinden eine Falschwarnung *nicht störend* oder *eher nicht störend*. V 1.3 hingegen bewertet die Mehrheit der Probanden (sieben von zwölf) als *eher störend* oder *störend*. Die Probandenbeurteilung von V 1.1 liegt zwischen den beiden anderen Varianten. Ein Wilcoxon-Rangsummen-Test ergibt hinsichtlich der Verzeihlichkeit einen signifikanten Unterschied zwischen V 1.2 und V 1.3.

Eine Auswertung der Punkte (**empfundene**) **Wirksamkeit** und **Unterstützung** ergibt keine das Gesamtergebnis beeinflussenden Ergebnisse. Abgesehen von Probanden, die bei V 1.1 keines der Elemente wahrgenommen haben, werden alle Varianten mehrheitlich als *wirksam* und *unterstützend* bewertet. Auf eine Darstellung wird daher verzichtet. Details sind in den Anhängen A.9.3 und A.9.4 enthalten.

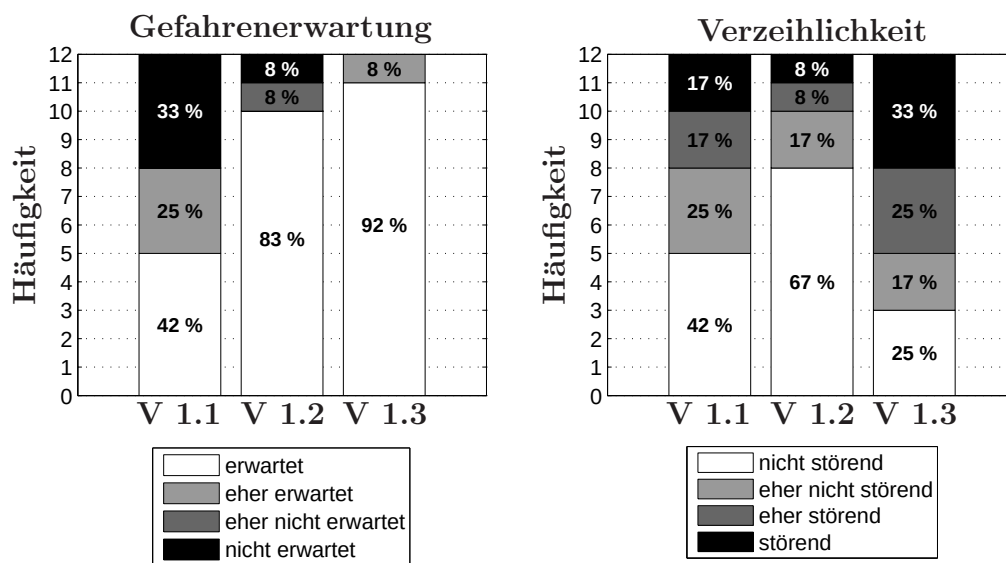


Abbildung 8.5: Probandenbewertungen zu Gefahrenerwartung und Verzeihlichkeit (jeweils $n = 12$)

Aufgabenangemessenheit

Hinsichtlich der **Angemessenheit** wird V 1.1 mit sieben von zwölf Probanden im Vergleich zu den beiden anderen Varianten am seltensten als *angemessen* oder *eher angemessen* bewertet. Bei V 1.2 hingegen empfindet dies die große Mehrheit (zehn von zwölf Probanden). Für V 1.3 geben alle Probanden diese Bewertung ab. Die Bewertung der Angemessenheit ist damit bei V 1.3 tendenziell besser als die von V 1.2.

Die **Verwirrung** durch eine Warnung wird bei allen Varianten von mindestens zehn der zwölf Probanden mit *nicht verwirrend* bewertet. Bis auf eine Angabe mit *verwirrend* bei

V 1.2 bewerten alle anderen Probanden die Warnung mit *eher nicht verwirrend*. Angaben zur Antwortenverteilung und den Ergebnissen der Signifikanztests befinden sich in den Anhängen A.9.3 und A.9.4.

8.2.2 Alarmierende Warnstufe

Wirksamkeit

Für den Versuch zur alarmierenden Warnstufe zeigt Abbildung 8.6 die kumulativen Häufigkeiten zu den Geschwindigkeiten aller Probanden. In Plot a sind die Passiergeschwindigkeiten v_{pass} , d. h. die Fahrzeuglängsgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt $t = t_{\text{pass}}$, für alle Probanden ohne Warnung (Variante V 2.0) und mit Warnung (Variante V 2.1 bis V 2.3) dargestellt. In Plot b sind die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Warnzeitpunkt⁷ (Zeitpunkt $t = t_{\text{warn2}}$) und Passieren der Gefahrstelle (Zeitpunkt $t = t_{\text{pass}}$) für alle vier Varianten dargestellt, d. h. $\Delta v_X = v_{\text{pass}} - v_{\text{warn2}}$.

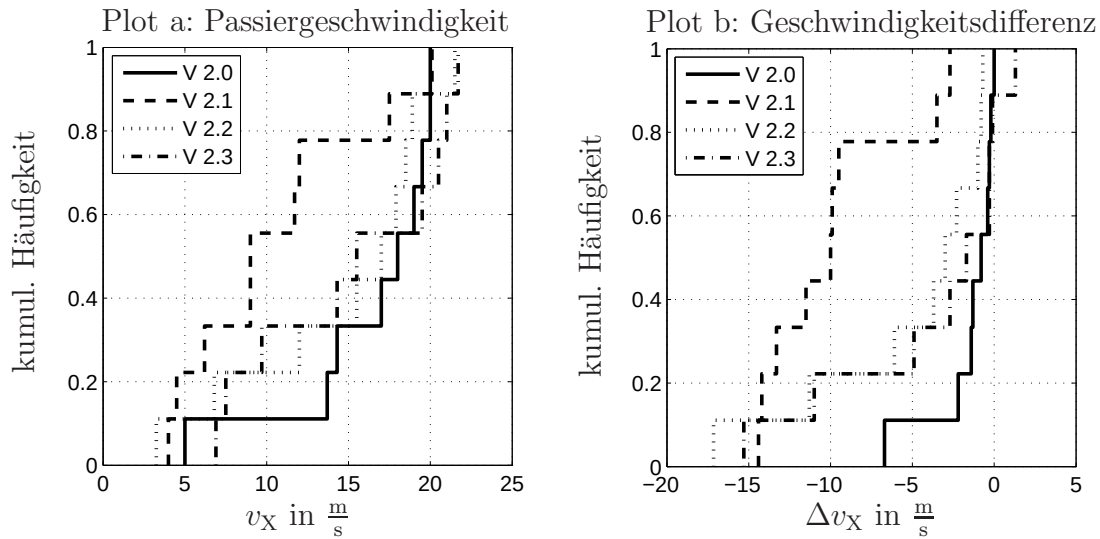


Abbildung 8.6: Plot a: Fahrzeuglängsgeschwindigkeit beim Passieren der Gefahrstelle ($v_X = v_{\text{pass}}$) für $n = 9$ je Variante, Plot b: Differenz zwischen Warn- und Passiergeschwindigkeit für $n = 9$ je Variante ($\Delta v_X = v_{\text{pass}} - v_{\text{warn2}}$)

Die Unabhängigkeit der Stichproben erlaubt die Durchführung eines Wilcoxon-Rangsummen-Testes zum Vergleich der Varianten. Tabelle 8.3 enthält die Ergebnisse des Vergleiches der Passiergeschwindigkeiten (siehe auch Plot a von Abbildung 8.6). Die Nullhypothese des Testes, dass sich die Mediane nicht unterscheiden, wird mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von maximal 5% nur bei Variante V 2.1 abgelehnt. Dies bedeutet, dass nur bei V 2.1 die Annahme eines signifikant geringeren Medians der Passiergeschwindigkeit aufgrund der Warnung gerechtfertigt ist.

Ein weiterer Vergleich der Varianten durch eine Betrachtung der Geschwindigkeitsdifferenzen mit einem Wilcoxon-Rangsummen-Test bestätigt die vorherigen Ergebnisse (siehe auch Tabelle 8.4). Demnach wird die Nullhypothese des Testes, dass sich die Mediane der Geschwindigkeitsdifferenzen nicht unterscheiden, für V 2.1 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von maximal 0,1% abgelehnt. Im Gegensatz zur Betrachtung der Passiergeschwin-

⁷bzw. äquivalenter Zeit bei V 2.0

digkeiten gilt dies bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von maximal 5% auch für V 2.2. Der Median der Geschwindigkeitsdifferenz ist mit $\Delta\tilde{v}_X = -3,0$ im Vergleich zu V 2.1 mit $\Delta\tilde{v}_X = -10,0$ allerdings betragsmäßig deutlich geringer.

Tabelle 8.3: Median der Passiergeschwindigkeiten und Signifikanzbetrachtungen nach Wilcoxon-Rangsummen-Tests

	V 2.0	V 2.1	V 2.2	V 2.3
$\tilde{v}_{\text{pass}}$ in m/s	18,0	9,0	17,0	15,5
p-Wert (vgl. zu V 2.0)	/	$4,7 \cdot 10^{-2}$	0,45	0,91
Signifikanz (zu V 2.0)	/	signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant

Tabelle 8.4: Median der Geschwindigkeitsdifferenzen und Signifikanzbetrachtungen nach Wilcoxon-Rangsummen-Tests

	V 2.0	V 2.1	V 2.2	V 2.3
$\Delta\tilde{v}_X$ in m/s	-0,8	-10,0	-3,0	-1,7
p-Wert (vgl. zu V 2.0)	/	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	0,60
Signifikanz (zu V 2.0)	/	höchstsignifikant	signifikant	nicht signifikant

Abbildung 8.7 zeigt den Anteil der **wahrgenommenen Warnelemente**. Bei allen Varianten wird mindestens eines wahrgenommen. Der haptische Sitz ist das einzige Warnelement, das alle Probanden, die damit gewarnt werden (V 2.2 und V 2.3), registrieren. Bei V 2.2 ist der Anteil der Probanden, die beide Warnelemente wahrnehmen, mit 78% am höchsten. Dieser Anteil ist bei V 2.1 mit 11% und bei V 2.3 mit 22% deutlich niedriger.

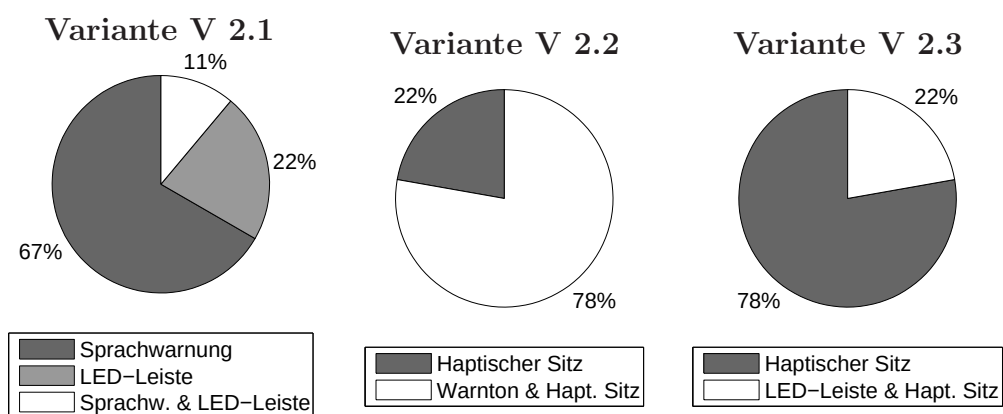


Abbildung 8.7: Vom Fahrer wahrgenommene Warnelemente für $n = 9$ je Variante

Ein Wilcoxon-Rangsummen-Test ergibt für die Probandenbewertung des Punktes **Wahrnehmbarkeit** keine signifikanten Unterschiede. Alle Varianten werden von mindestens sieben der neun Probanden als *gut wahrnehmbar* bewertet.

Bezüglich der Bewertung der **Alarmierungsgrades** sind hingegen Unterschiede feststellbar. Die Ergebnisse der Bewertung sind in Abbildung 8.8 dargestellt. V 2.1 wird signifikant

besser bewertet als V 2.2 und V 2.3. Mit einer Ausnahme vergeben alle Probanden diesbezüglich die Bestnote. Empfindet bei V 2.2 die große Mehrheit (sieben von neun Probanden) die Warnung als *eher alarmierend* oder *alarmierend*, so ist dies bei V 2.3 nur knapp die Hälfte der Probanden. Anhang A.9.3 enthält weitere Angaben zur Antwortenverteilung. Ergebnisse der Signifikanztests befinden sich im Anhang A.9.4.

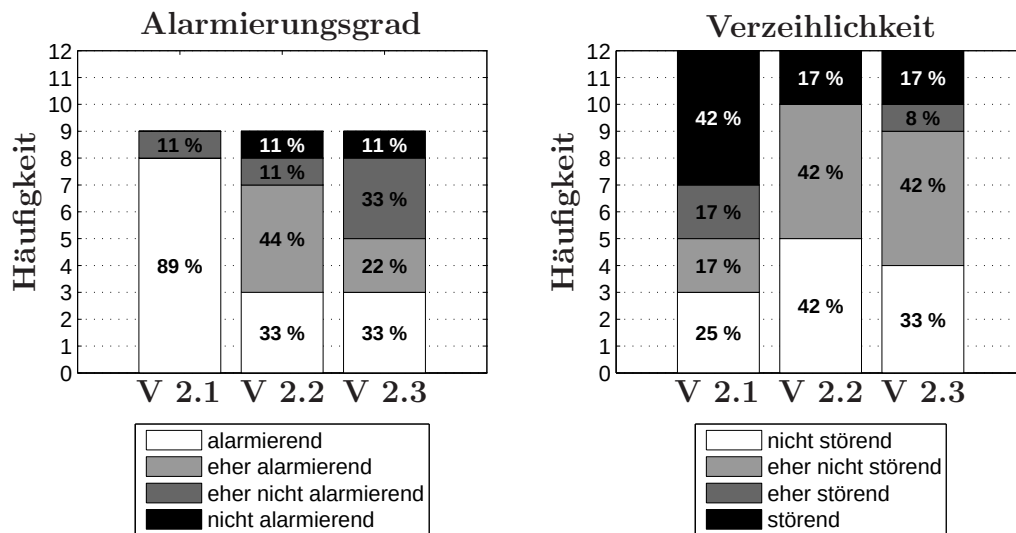


Abbildung 8.8: Probandenbewertungen zu Alarmierungsgrad ($n = 9$ je Variante) und Verzeihlichkeit ($n = 12$ je Variante)

Akzeptanz

Die Probandenbewertungen der **Verzeihlichkeit** nach erfolgter Falschwarnung sind in Abbildung 8.8 dargestellt. Alle Varianten erhalten mindestens zwei Bewertungen als *störend*. Bei V 2.2 und V 2.3 ist die Bewertung dennoch mit zehn bzw. neun Probanden, die die Warnung als *eher nicht störend* oder *nicht störend* empfinden, mehrheitlich positiv. V 2.1 erfüllt mit sieben von zwölf Bewertungen als *störend* oder *eher störend* nicht die Anforderungen.

Der Punkt **Gefahrenerwartung** (nach erfolgter Warnung) wird bei V 2.1 und V 2.2 mehrheitlich (sieben bzw. sechs von neun Probanden) als *erwartet* oder *eher erwartet* bewertet. Bei V 2.3 ist die Anzahl mit vier von neun Probanden geringer. Die Anzahl der Bewertungen mit *eher nicht erwartet* oder *nicht erwartet* überwiegt.

Eine Auswertung des Punktes (**empfundene**) **Wirksamkeit** deutet diesbezüglich nicht auf Unterschiede hin. Alle Varianten werden von mindestens acht der neun Probanden mit *eher wirksam* oder *wirksam* bewertet.

Mit jeweils einer Ausnahme werden V 2.1 und V 2.3 hinsichtlich des Punktes **Unterstützung** von allen Probanden als *eher unterstützend* oder *unterstützend* empfunden. Bei V 2.2 gilt dies nur für fünf der neun Probanden. Weitere Angaben zur Antwortenverteilung und den Ergebnissen der Signifikanztests befinden sich in den Anhängen A.9.3 und A.9.4.

Aufgabenangemessenheit

Hinsichtlich des Punktes **Angemessenheit** sind keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Alle Varianten werden mehrheitlich mit *angemessen* oder *eher angemessen* bewertet. Bei V 2.1 und V 2.3 trifft dies auf alle Probanden zu, bei V 2.2 nur auf zwei Drittel.

Verwirrung: V 2.2 und V 2.3 werden von zwei Drittel der Probanden *verwirrend* oder *eher verwirrend* empfunden. Nur V 2.1 wird von der Mehrheit der Probanden (sechs von neun) mit *nicht verwirrend* oder *eher nicht verwirrend* bewertet, aber auch hier gibt ein Drittel an, dass die Warnung *eher verwirrend* ist.

8.3 Fazit

8.3.1 Informierende Warnstufe

Die Auswertung der Probandenbewertung zeigt, dass V 1.1 von einem Drittel der Probanden nicht wahrgenommen wird. Dies spiegelt sich in der Auswertung der Kurveneintrittsgeschwindigkeiten wider. Deren Median ist im Vergleich zu den beiden anderen Varianten am höchsten. Da auch bei den anderen abgefragten Punkten kein signifikant besseres Abschneiden ermittelt wird, beschränkt sich der nachfolgende Vergleich der Varianten der informierenden Warnstufe auf die Varianten V 1.2 und V 1.3.

Beide Varianten werden mit Ausnahme des Punktes Verzeihlichkeit in allen Punkten von der Mehrheit der Probanden mit den beiden besten Evaluierungsordnungen bewertet. Variante V 1.3 schneidet hinsichtlich der Punkte Aufmerksamkeitssteigerung, Unterstützung und Angemessenheit tendenziell besser ab, d. h. $p\text{-Wert} \leq 0,20$. Signifikante Unterschiede, d. h. $p\text{-Wert} \leq 0,05$, zwischen den beiden Varianten werden aber nur hinsichtlich der Bewertung der Verzeihlichkeit ermittelt. Bei V 1.2 bewerten zehn der zwölf Probanden die Verzeihlichkeit einer Falschwarnung mindestens mit *eher nicht störend*. Damit schneidet V 1.2 signifikant besser ab als V 1.3. Demnach hat sich V 1.2 als einzige der drei untersuchten Varianten hinsichtlich einer Erfüllung der Anforderungen aus Abschnitt 7.2 bewährt.

8.3.2 Alarmierende Warnstufe

Die Versuche zur Bewertung der alarmierenden Warnstufe zeigen, dass nur bei V 2.1 der Median der Passiergeschwindigkeit nach erfolgter Warnung signifikant niedriger ist als bei Probanden, die nicht gewarnt werden. Dies spiegelt sich auch in einer Betrachtung der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Zeitpunkt der Warnung und Passierzeitpunkt wider. Hier führt V 2.1 mit einem Median der Geschwindigkeitsdifferenz von $\Delta \tilde{v}_X = 10,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ zu einem betragsmäßig deutlich höheren Geschwindigkeitsabbau als bei den beiden anderen Varianten.

Eine Begründung dafür liefert der signifikant besser bewertete Alarmierungsgrad im Vergleich zu V 2.2 und V 2.3. Aufgrund der genannten Ergebnisse wird angenommen, dass V 2.1 die einzige der untersuchten Varianten ist, die wirksam ist. Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich daher nur auf V 2.1. Mit Ausnahme der Punkte Verzeihlichkeit und Verwirrung ist die Anzahl der negativen Bewertungen gering. Maximal jeweils zwei Probanden bewerten die anderen Punkte mit den beiden schlechtesten Evaluierungsordnungen. Der Verwirrungsgrad wird auch mehrheitlich als gut empfunden, dennoch liegt

ein Drittel der Bewertungen nicht auf den beiden höchsten Bewertungsstufen. Der einzige mehrheitlich schlecht evaluierte Punkt ist die Verzeihlichkeit nach einer Falschwarnung. Hier werden die Anforderungen nicht erfüllt. Auffällig ist außerdem, dass nur ein Proband beide Warnelemente (bewusst) wahrnimmt.

8.4 Diskussion

Variante V 1.2 der informierenden Warnstufe, bestehend aus haptischem Sitz und Display, bewährt sich hinsichtlich einer Erfüllung der Anforderungen in den durchgeführten Versuchen. Bei der alarmierenden Warnstufe schneidet Variante V 2.1, bestehend aus Sprachwarnung und LED-Leiste, am besten ab. V 2.1 bewährt sich bezüglich Wirksamkeit und mit Einschränkungen auch für Akzeptanz und Aufgabenangemessenheit. Für die letztgenannten Punkte besteht Verbesserungspotential hinsichtlich der Verzeihlichkeit und des Verwirrungsgrades der Warnung. Die angewendete Methode, d. h. die durchgeführte Probandenstudie, zeigt somit anhand von Gestaltungsbeispielen, dass mit genannten Einschränkungen eine wirksame, akzeptierte und aufgabenangemessene Warnung von Motorradfahrern in einem kbW möglich ist.

Um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, erfolgte die Durchführung der Probandenstudie nach festen Vorgaben. Ablauf, Warnzeitpunkte und Positionen sind genau definiert. Die Versuche wurden tagsüber bei trockenem Wetter mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Versuchsmotorrad durchgeführt. Aussagen über eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Motorräder oder andere Umgebungsbedingungen wie Nässe oder Dunkelheit können nicht getroffen werden.

Unabhängig vom Untersucher aufgenommene Messdaten tragen zur Objektivität der Ergebnisse bei. Um den Einfluss der Versuchsbetreuer auf die Ergebnisse der Befragung zu minimieren, erfolgte diese mit Hilfe eines Fragebogens und nach festen Vorgaben bei der Formulierung der Fragestellung. Die Auswahl der Probanden war zufällig. Um den Einfluss der Probandenmerkmale Alter und Fahrerfahrung zu minimieren, wurde eine Gleichverteilung der vier daraus resultierenden Gruppen vorgenommen.

Die Signifikanzbetrachtungen mit den durchgeführten Wilcoxon-Tests ermöglichen eine Bewertung der Reliabilität der Ergebnisse. Hinsichtlich der Wirksamkeit der untersuchten Varianten liegen die Irrtumswahrscheinlichkeiten unter 5%, teilweise sogar unter 0,1%.

9 Gesamtfazit und Ausblick

Ziele der Arbeit sind die Erarbeitung und die Evaluierung der funktionalen Grundlagen des in Abschnitt 1.3 beschriebenen kommunikationsbasierten Warnsystems für Motorräder. Zur Erreichung der Ziele wurden relevante Gefahrstellen identifiziert, basierend auf Fahrdynamikuntersuchungen Kriterien zur Erkennung der Gefahrstellen abgeleitet und die Realisierbarkeit von (Fahrer-) Warnmaßnahmen im Motorrad untersucht.

Ausgangspunkte zur Identifizierung von relevanten Gefahrstellen sind die Auswertung einer Unfalldatenbank und eine Nutzerbefragung („Motorradfahrer-Umfrage“). Als potentiell vermeidbar und relevant erweisen sich demnach Unfälle aufgrund von überhöhter Kurvengeschwindigkeit, Reibwertsprüngen, Fahrbahnschäden und Hindernissen. Die Unfalldatenbankrecherche ergibt, dass diese Unfälle einen Anteil von ca. 6-7% am Motorradunfallgeschehen in Deutschland haben. Die Relevanz dieser Unfälle wird durch die Nutzerbefragung zum Gefährdungspotential der Gefahrstellen bestätigt. Demnach werden von der Mehrheit der Befragten alle identifizierten Gefahrstellen in Kurven, und teilweise auch auf Geraden, mindestens als „gefährlich“ bewertet.

Fahrdynamikuntersuchungen zu den aus den Gefahrstellen resultierenden Fahrsituationen liefern neue Kriterien. Diese Kriterien ermöglichen die Erkennung bzw. Bewertung von Fahrbahmunebenheiten, einzelnen Fahrbahnschäden und Ausweichmanövern.

Das aus der Definition des Allgemeinen Unebenheits-Index AUN abgeleitete neue Kriterium $\mathcal{T}_U$ basiert auf der Leistungsdichte der vertikalen Radgeschwindigkeit. Zur Bestimmung des Kriteriums werden Fahrzeuglängsgeschwindigkeit und Radvertikalbeschleunigung gemessen und in einer Signalkette verarbeitet. Das Kriterium bewährt sich zur Erkennung von unebenen Fahrbahnen bei einer Mittelwertbildung über 100 m lange Fahrbahnabschnitte. D. h., eine gefahrene unebene Strecke mit einer Länge von mindestens 100 m ist erforderlich.

Eine Möglichkeit zur schnelleren Generierung von Warnmeldungen ist die Auswertung von Grenzwertüberschreitungen des Kriteriums bei einer Mittelwertbildung über kürzere, z. B. 20 m lange Fahrbahnabschnitte. Die Anzahl der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche ist allerdings zu gering, um diesbezüglich eine belastbare Aussage zu treffen.

Die kumulierte Energiedichte der vertikalen Radgeschwindigkeit im Wellenlängenbereich von 0,5 m bis 2,5 m erweist sich als unabhängig von Art und Form eines einzelnen erhabenen Fahrbahnschadens. Das daraus abgeleitete neue Kriterium $\mathcal{T}_S$ zeigt in Probandenversuchen einen eindeutigen Zusammenhang zu von Fahrern gewünschten Warngeschwindigkeiten. Demnach bewährt sich das Kriterium als Maß für die subjektiv empfundene Gefährlichkeit eines einzelnen erhabenen Fahrbahnschadens.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass das subjektive Empfinden der Fahrer unterschiedlichen Einfluss auf die Bewertung der Gefährlichkeit hat. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um zu ermitteln, wie eine aus dem Kriterium $\mathcal{T}_S$ abgeleitete Warngeschwindigkeit ggf. an den Fahrer angepasst werden kann.

Die beiden Korrelationsfaktoren c_{RR} und c_{RW} beschreiben die „Ähnlichkeit“ von während des Fahrens gemessenen Verläufen der Größen Rollrate und Rollwinkel zu vorher definierten Musterverläufen eines Ausweichmanövers. In realen Ausweichversuchen ermittelte Werte der Korrelationsfaktoren zeigen mit wenigen Ausnahmen eindeutige Unterschiede zu „fahrdynamisch ähnlichen“ Manövern. Falscherkennungen treten bei Manövern des Typs „Überholmanöver nach Folgefahrt mit vorherigem Wedeln“ auf. Bei Akzeptanz dieser Falscherkennungen können die Korrelationsfaktoren zur Erkennung von Ausweichmanövern herangezogen werden.

Ob diese Falscherkennungen akzeptiert werden oder ein Zusatzkriterium erforderlich ist, ist in weiteren Studien zu untersuchen. Die Versuchsergebnisse deuten auf die Fahrzeuglängsbeschleunigung als mögliches Zusatzkriterium hin.

Neue Methoden, um unter Berücksichtigung motorradspezifischer Anforderungen Warnmaßnahmen zu gestalten und zu bewerten, führen zu einer zweistufigen Warnstrategie, bestehend aus einer informierenden und einer alarmierenden Warnstufe. In der durchgeführten Probandenstudie erfüllt eine Kombination der Warnelemente Display und haptischer Sitz hinsichtlich Wirksamkeit, Akzeptanz und Aufgabenangemessenheit alle Anforderungen an die informierende Warnstufe.

Bei der alarmierenden Warnstufe gilt dies für eine Kombination der Warnelemente Sprachwarnung und LED-Leiste (mit Ausnahme der Anforderung nach Verzeihlichkeit bei einer Falschwarnung). Die Ergebnisse der Probandenstudie zeigen damit, dass es möglich ist, einen Motorradfahrer gemäß den gestellten Anforderungen in einem kommunikationsbasierten Warnsystem zu warnen.

Die vorliegende Arbeit gibt somit Antworten auf die Abschnitt 2.5 gestellten Fragestellungen. Die gesamte Kette der Gefahrstellenerkennung und Fahrerwarnung wurde entwickelt und hat sich in Versuchen bewährt. Der erreichte Entwicklungsstand liefert validierte Kriterien zur sensorbasierten Erkennung von Gefahrstellen sowie Gestaltungsbeispiele von Warnmaßnahmen, die zeigen, dass eine wirksame, akzeptierte und angemessene Warnung von Motorradfahrern möglich ist.

Wesentlich für die spätere Realisierung kommunikationsbasierter Fahrerassistenzsysteme in Serienfahrzeugen sind Konzepte für die Markteinführung. Das Gruppenfahrverhalten von Motorradfahrern (siehe auch Abschnitt 3.2.3) bietet in Kombination mit dem vorgestellten System Möglichkeiten zur schnelleren Markteinführung. Es führt bereits zu einem Sicherheitsgewinn, wenn mehrere oder alle Teilnehmer der Gruppe mit dem beschriebenen System ausgestattet sind. Im Gegensatz zu den meisten anderen Anwendungen von Fahrzeugkommunikation ist für einen Sicherheitsgewinn somit keine Ausstattung vieler Verkehrsteilnehmer erforderlich.

Die Erweiterung des Funktionsumfangs kann zu einer erhöhten Akzeptanz führen. Denkbar ist die Nutzung der für die Sicherheitsfunktion erforderlichen Kommunikationstechnik für die Realisierung einer Sprachkommunikation. Potential zur Erkennung weiterer Gefahrstellen liefert der Fahrer selbst. In vielen Situationen ist der Mensch der „beste Sensor“.

A Anhang

A.1 Unfallgeschehen in Deutschland

A.1.1 Unfallzahlen

Tabelle A.1: Unfallzahlen der Jahre 1991 bis 2010 für **alle Verkehrsteilnehmer**

Jahr	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Verunglückte	516.835	527.428	515.540	526.229	521.595	501.916	509.643
Getötete	11.300	10.631	9.949	9.814	9.454	8.758	8.549

Jahr	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Verunglückte	505.111	528.899	511.577	501.752	483.255	468.783	445.968
Getötete	7.792	7.772	7.503	6.977	6.842	6.613	5.842

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Verunglückte	438.804	427.428	436.368	413.524	401.823	374.818
Getötete	5.361	5.091	4.949	4477	4152	3648

Tabelle A.2: Unfallzahlen der Jahre 1991 bis 2010 für Aufsassen von **Motorrädern** mit amtlichen Kennzeichen

Jahr	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Verunglückte	40.355	37.266	35.219	38.337	38.121	36.842	42.200
Getötete	992	903	885	934	912	864	974

Jahr	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Verunglückte	39.575	43.799	41.112	38.663	38.279	39.285	35.311
Getötete	864	981	945	964	913	946	858

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Verunglückte	35.703	34.221	34.802	30.640	30.370	26.969
Getötete	875	793	807	656	650	635

Tabelle A.3: Unfallzahlen der Jahre 1991 bis 2010 für Insassen von **Personenkraftwagen**

Jahr	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Verunglückte	320.390	326.489	327.064	329.881	328.538	319.453	313.433
Getötete	6.801	6.431	6.128	5.966	5.929	5.622	5.249

Jahr	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Verunglückte	315.962	324.634	313.892	310.450	295.982	276.739	262.843
Getötete	4.741	4.640	4.396	4.023	4.005	3.774	3.238

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Verunglückte	250.114	240.821	244.377	227.123	223.508	213.396
Getötete	2.833	2.683	2.625	2.368	2.110	1.840

Quelle: Statistisches Bundesamt¹

A.1.2 Jahresfahrleistung

Tabelle A.4: Jahresfahrleistungen amtlich zugelassener Pkw und Motorräder der Jahre 1991 bis 2010

Jahr	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Jahresfahrl. Pkw in Tkm/Jahr	13,3	13,3	13,3	13,3	13,2	13,2	13,1
Jahresfahrl. Motorräder in Tkm/Jahr	4,2	4,2	4,2	4,2	4,1	4,1	4,0

Jahr	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Jahresfahrl. Pkw in Tkm/Jahr	13,2	13,4	13,1	13,0	13,1	12,9	13,1
Jahresfahrl. Motorräder in Tkm/Jahr	3,9	3,9	3,9	3,9	3,3	3,4	3,3

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Jahresfahrl. Pkw in Tkm/Jahr	12,7	12,6	14,3	14,1	14,3	14,2
Jahresfahrl. Motorräder in Tkm/Jahr	3,3	3,3	3,0	3,0	3,0	3,0

Quelle: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung²

¹Statistisches Bundesamt (2011): Zeitreihen 2010, S. 4 ff.

²Kunert et al. (2011): Kraftfahrzeugverkehr 2010, S. 16

A.1.3 Bestandsdaten

Tabelle A.5: Bestand amtlich zugelassener Fahrzeuge der Jahre 1991-2010 (bis 2000 jeweils zum 1.7., danach zum 1.1., ab 2008 ohne vorübergehende Stilllegungen). Kfz.-Bestand: alle Kraftfahrzeuge mit amtlichen Kennzeichen; Motorrad-Bestand: alle zweirädrigen Motorräder mit amtlichen Kennzeichen, d. h. Leichtkrafträder, Kraftroller und Krafträder; Pkw-Bestand: alle Personenkraftwagen

Jahr	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Kfz.-Bestand in Mio.	37,37	42,00	45,23	46,55	47,49	48,34	49,02
Motorrad-Bestand in Mio.	1,48	1,68	1,89	2,08	2,27	2,47	2,72
Pkw-Bestand in Mio.	32,09	36,05	38,77	39,76	40,40	40,99	41,37

Jahr	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Kfz.-Bestand in Mio.	49,59	50,61	51,37	52,49	53,31	53,66	54,08
Motorrad-Bestand in Mio.	2,93	3,18	3,34	3,41	3,55	3,65	3,72
Pkw-Bestand in Mio.	41,67	42,32	42,84	43,77	44,38	44,66	45,02

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Kfz.-Bestand in Mio.	54,52	54,91	55,51	49,33	49,60	50,18
Motorrad-Bestand in Mio.	3,78	3,83	3,89	3,48	3,56	3,65
Pkw-Bestand in Mio.	45,38	45,67	46,14	40,84	40,98	41,39

Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt³

A.1.4 Unfallrisiken

Tabelle A.6: Bestandsbezogenes Risiko der Jahre 1991 bis 2010: Getötete pro 10.000 zugelassener Fahrzeuge

Jahr	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Getötete/10.000 Fzg. (Motorrad)	6,70	5,38	4,67	4,48	4,02	3,50	3,59
Getötete/10.000 Fzg. (Pkw)	2,12	1,78	1,58	1,50	1,47	1,37	1,27

Jahr	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Getötete/10.000 Fzg. (Motorrad)	2,95	3,09	2,83	2,83	2,57	2,59	2,31
Getötete/10.000 Fzg. (Pkw)	1,14	1,10	1,03	0,92	0,90	0,85	0,72

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Getötete/10.000 Fzg. (Motorrad)	2,32	2,07	2,08	1,88	1,83	1,74
Getötete/10.000 Fzg. (Pkw)	0,62	0,59	0,57	0,58	0,51	0,44

³KBA (2010): Fahrzeugzulassungen, S. 10 und S. 18

Tabelle A.7: Fahrleistungsbezogenes Risiko der Jahre 1991 bis 2010: Getötete pro 1 Mrd. gefahrener Kilometer

Jahr	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Getötete/Mrd. km (Motorrad)	159,5	128,1	111,2	106,7	98,1	85,3	89,6
Getötete/Mrd. km (Pkw)	15,9	13,4	11,9	11,3	11,1	10,4	9,7

Jahr	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Getötete/Mrd. km (Motorrad)	75,7	79,2	72,6	72,5	77,8	76,2	69,9
Getötete/Mrd. km (Pkw)	8,6	8,2	7,8	7,1	6,9	6,6	5,5

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Getötete/Mrd. km (Motorrad)	77,2	62,7	69,2	62,8	60,9	58,0
Getötete/Mrd. km (Pkw)	4,9	4,7	4,0	4,1	3,6	3,1

A.2 Bestimmung von Faktoren zur Gewichtung von Unfällen der GIDAS-Unfalldatenbank

Dieser Abschnitt beschreibt die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren für jede mögliche Kombination der Merkmale Ortslage und Verletzungsschwere (innerorts oder außerorts bzw. Unfall mit Getöteten, Schwerverletzten oder Leichtverletzten⁴). Dafür wird der Anteil jeder Kombination sowohl für die in der GIDAS-Datenbank ($n = 1379$)⁵ als auch für die in der Amtlichen Statistik der Jahre 2000 bis 2007 enthaltenen Motorradunfälle ($n = 431230$)⁶ bestimmt. Um Unterschiede in der Bewertung von Unfällen möglichst gering zu halten, werden bei den GIDAS-Unfällen nicht die vom Erhebungsteam ermittelten Daten, sondern die von der Polizei in den Unfallbericht eingetragenen Daten verwendet⁷. Das Ergebnis ist Tabelle A.8 zu entnehmen. Durch direkten Vergleich der beiden Tabellen ergeben sich die Gewichtungsfaktoren, die in Tabelle A.9 enthalten sind.

Tabelle A.8: Anteile nach amtlicher Unfallstatistik und GIDAS-Datenbank

	Amtliche Unfallstatistik				GIDAS			
	innerorts		außerorts		innerorts		außerorts	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
Getötet	2121	0,005	6200	0,014	19	0,014	27	0,020
Schwerverletzt	68187	0,158	55882	0,130	292	0,212	153	0,111
Leichtverletzt	227539	0,528	71301	0,165	743	0,534	145	0,105

Zu erkennen ist, dass Innerortsunfälle mit Getöteten in der GIDAS-Datenbank deutlich überrepräsentiert und Außerortsunfälle mit Leichtverletzten deutlich unterrepräsentiert

⁴Jeder Unfall wird nur einmal gezählt. Entscheidend für die Zuordnung bei mehreren Verunglückten ist der Grad der schwersten Verletzung.

⁵Unfalldaten, die keine Angaben zu entsprechenden Merkmalen enthalten, werden nicht berücksichtigt.

⁶u. a. Statistisches Bundesamt (2008): Verkehrsunfälle, Tabelle UJ 47

⁷Diese Daten gehen in die Unfallstatistik ein.

Tabelle A.9: Gewichtungsfaktoren

	innerorts	außerorts
Getötet	0,36	0,73
Schwerverletzt	0,75	1,17
Leichtverletzt	0,98	1,57

sind. Ebenfalls überrepräsentiert sind Außerortsunfälle mit Getöteten und Innerortsunfälle mit Schwerverletzten. Nur der Anteil der Innerortsunfälle mit Leichtverletzten ist annähernd gleich.

A.3 Nutzerbefragung

A.3.1 Datenbasis

Tabelle A.10: Vergleich der Umfrage- und der KBA-Bestandsdaten hinsichtlich der Merkmale Geschlecht, Alter und Hubraumklasse

	Geschlecht	
	Männlich	Weiblich
Umfragedaten	86,4%	13,6%
KBA-Bestandsdaten	85,9%	14,1%

	Alter		
	18 - 34 Jahre	35 - 49 Jahre	≥50 Jahre
Umfragedaten	30,5%	52,5%	17,0%
KBA-Bestandsdaten	16,9%	51,4%	31,7%

	Hubraum		
	125 - 749 ccm	750 - 999 ccm	≥1000 ccm
Umfragedaten	38,1%	22,0%	39,8%
KBA-Bestandsdaten	58,9%	19,3%	21,8%
KBA-Neuzulassungen	37,2%	26,6%	36,2%

A.3.2 Fragebogen zur Gefahrstellenbewertung

Fragebogen - Gefahrenwarnsystem am Motorrad

Das Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt und die Firma xxx arbeiten zur Zeit gemeinsam an der Entwicklung eines Gefahrenwarnsystems für Motorradfahrer. Dabei wird großer Wert auf die Erfahrung und die Wünsche der Motorradfahrer gelegt. Mit dem Ausfüllen dieses Fragebogens leisten Sie hierzu einen wichtigen Beitrag. Die Daten werden selbstverständlich absolut anonym ausgewertet.

Gefahrstellen:

1) Wie gefährlich schätzen Sie folgende Gefahrstellen für Motorradfahrer ein?

a) Bodenwellen/Verwerfungen/Wellblechverformungen				
i. Kurve	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
ii. Gerade	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
b) Querrinnen				
i. Kurve	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
ii. Gerade	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
c) Schlaglöcher				
i. Kurve	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
ii. Gerade	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
d) Durchgehend schlechter Fahrbahnbelag (z.B. Straße mit vielen Ausbesserungen)				
i. Kurve	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
ii. Gerade	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
e) Ölfleck				
i. Kurve	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
ii. Gerade	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
f) Straßenausbesserung (stellenweise) durch Bitumen (dunkle Asphaltflecken)				
i. Kurve	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
ii. Gerade	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
g) Straßenausbesserung (stellenweise) durch Rallsplitt				
i. Kurve	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
ii. Gerade	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
h) Großes, feststehendes Hindernis (z.B. verunfalltes Auto, großer Ast)				
i. Kurve	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
ii. Gerade	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
i) Kleines, feststehendes Hindernis (z.B. Stein, Radkappe)				
i. Kurve	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich
ii. Gerade	☐ sehr ungefährlich	☐ ungefährlich	☐ gefährlich	☐ sehr gefährlich

Abbildung A.1: Fragebogen Seite 1

Sicherheitssystem:

1) Fänden Sie ein System im Motorrad, das vor solchen Gefahrstellen warnt, sinnvoll?

☐ ja, auf jeden Fall ☐ ja, vielleicht ☐ nein, eher nicht ☐ nein, auf keinen Fall

2) Fänden Sie ein System, das vor zu hohen Geschwindigkeiten vor Kurven warnt, sinnvoll?

☐ ja, auf jeden Fall ☐ ja, vielleicht ☐ nein, eher nicht ☐ nein, auf keinen Fall

3) Würden Sie ein System kaufen, das vor den oben genannten Gefahrstellen und zu hohen Geschwindigkeiten warnt?

☐ ja, auf jeden Fall ☐ ja, vielleicht ☐ nein, eher nicht ☐ nein, auf keinen Fall

Gruppenverhalten:

1) Wie viele Fahrten unternehmen Sie mit dem Motorrad pro Jahr (alleine / in einer Gruppe)?

ca. Fahrten alleine

ca. Fahrten in einer Gruppe

2) Wie viele Teilnehmer hat die Gruppe im Durchschnitt, wenn Sie Gruppenfahrten unternehmen?

ca. Teilnehmer fahren im Durchschnitt in meiner Gruppe

Statistische Erhebungen:

1) Ihr Geschlecht ist...

☐ männlich ☐ weiblich

2) Sie gehören zu folgender Altersklasse...

☐ 18 - 20 ☐ 21 - 24 ☐ 25 - 34 ☐ 35 - 49 ☐ 50 und mehr

3) Ihr Motorrad gehört zu folgender Hubraum-Klasse ... (in ccm)

☐ weniger als 125 ☐ 125 - 499 ☐ 500 - 749 ☐ 750 - 999 ☐ 1000 und mehr

Vielen Dank für Ihre Mithilfe und weiterhin gute Fahrt!

Kontakt: Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Petersenstr. 30, 64287 Darmstadt, Tel. 06151/166284

Abbildung A.2: Fragebogen Seite 2

A.3.3 Umfrageergebnisse

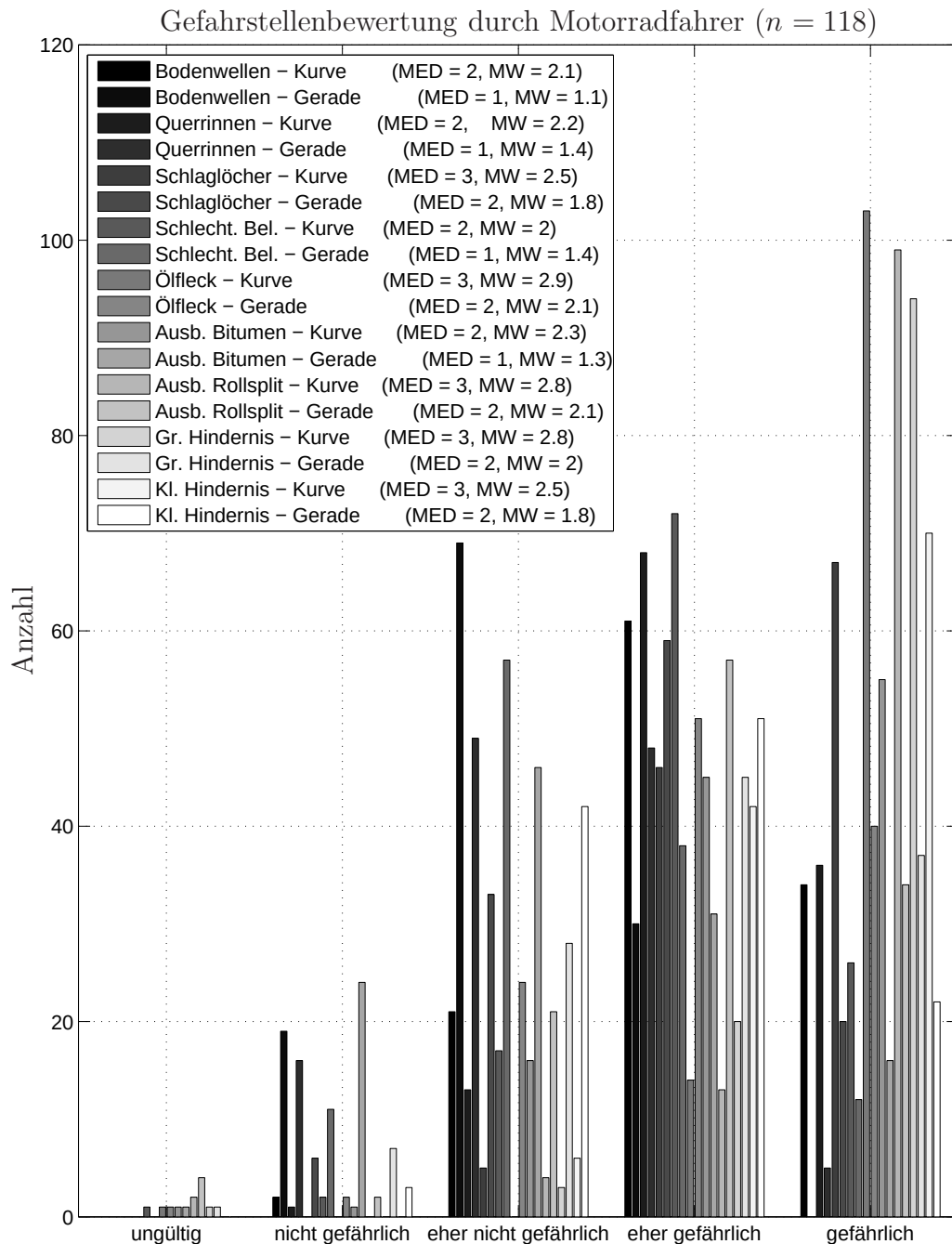


Abbildung A.3: Gefahrstellenbewertung durch Motorradfahrer (Wertebereich: 0 = sehr un-gefährlich, 1 = ungefährlich, 2 = gefährlich, 3 = sehr gefährlich; MW = Mittelwert; MED = Median)

A.4 Kalman-Filter zur Rollwinkelschätzung

A.4.1 Grundlagen

Angelehnt an Lunze lässt sich im Zustandsraum ein diskretes System durch ein Systemmodell und ein Messmodell beschreiben⁸. Wenn ein Steuereingang nicht vorhanden ist, lautet das Systemmodell in Abhängigkeit des Zustandsvektors $\mathbf{x}$ und der diskreten Systemmatrix $\hat{\mathbf{A}}$:

$$\mathbf{x}(k) = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{w}(k-1) \quad (\text{A.1})$$

Das Messmodell, beschrieben durch Messvektor $\mathbf{y}$ und diskrete Messmatrix $\hat{\mathbf{C}}$, hat folgende allgemeine Form, wenn ein Durchgang nicht vorhanden ist:

$$\mathbf{y}(k) = \hat{\mathbf{C}}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (\text{A.2})$$

Die Vektoren $\mathbf{w}$ und $\mathbf{v}$ stehen für das Systemrauschen bzw. das Messrauschen. Für eine optimale⁹ Schätzung mit einem Kalman-Filter ist erforderlich, dass diese unabhängig voneinander, weiß und normalverteilt sind.

Der Algorithmus des Kalman-Filters lässt sich in eine Prädiktion und eine Korrektur unterteilen. Bei der Prädiktion wird ein *a priori* Schätzvektor $\hat{\mathbf{x}}^*$ und eine *a priori* Schätzfehler-Kovarianzmatrix $\mathbf{P}_k^*$ mit Hilfe des Systemmodelles und der entsprechenden Varianz-Kovarianzmatrix des Systemrauschens $\mathbf{Q}$ vorhergesagt. Somit ergibt sich folgender prädizierender Teil des Algorithmus:

$$\hat{\mathbf{x}}^*(k) = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}}(k-1) \quad (\text{A.3})$$

$$\mathbf{P}_k^* = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{P}_{k-1}\hat{\mathbf{A}}^T + \mathbf{Q} \quad (\text{A.4})$$

Nach der Messung erfolgt eine Korrektur der vorhergesagten Werte über das Messmodell und die entsprechende Varianz-Kovarianzmatrix des Messrauschens $\mathbf{R}$ unter Verwendung der Kalman-Matrix $\mathbf{K}_k$. Folgender korrigierender Teil ergibt sich:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^* \hat{\mathbf{C}}^T \left(\hat{\mathbf{C}}\mathbf{P}_k^* \hat{\mathbf{C}}^T + \mathbf{R} \right)^{-1} \quad (\text{A.5})$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \hat{\mathbf{x}}^*(k) + \mathbf{K}_k \left(\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{x}}^*(k) \right) \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{P}_k = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \hat{\mathbf{C}} \right) \mathbf{P}_k^* \quad (\text{A.7})$$

Werden System und/oder Messung durch nichtlineare Gleichungen beschrieben, so ist eine Verwendung des Erweiterten Kalman-Filters erforderlich. Bei diesem erfolgt zu jedem Abtastschritt eine Linearisierung der Modelle durch Bestimmung von Jacobi-Matrizen. Das Filter ist dann allerdings kein Optimalschätzer mehr. Details zu den beiden genannten Filtern werden von Welch et al. beschrieben¹⁰.

⁸Lunze (2010): Regelungstechnik, S. 78 ff.

⁹im Sinne einer Minimierung der Fehler-Quadrate

¹⁰Welch et al. (2006): Kalman-Filter

A.5 Unebeheitsbestimmung

A.5.1 Merkmale der Strecken zur Validierung der Unebenheitserkennung

Tabelle A.11: Merkmale der untersuchten Strecken: Länge L , durchschnittliches Unebenheitsmaß $\overline{AUN}_{20}$, minimales Unebenheitsmaß $AUN_{20,\min}$, maximales Unebenheitsmaß $AUN_{20,\max}$, Standardabweichung des Unebenheitsmaßes $\sigma_{AUN,20}$ (relativ zu $\overline{AUN}_{20}$)

Strecke	L in m	$\overline{AUN}_{20}$ in cm^3	$AUN_{20,\min}$ in cm^3	$AUN_{20,\max}$ in cm^3	$\sigma_{AUN,20,\text{rel}}$
S1	650	30,9	18,7	52,6	0,27
S2	650	4,8	2,2	8,0	0,28
S3	800	1,1	1,5	0,6	0,13
S4	3400	8,2	1,1	49,1	0,82

A.5.2 Vergleich der Referenzgrößen

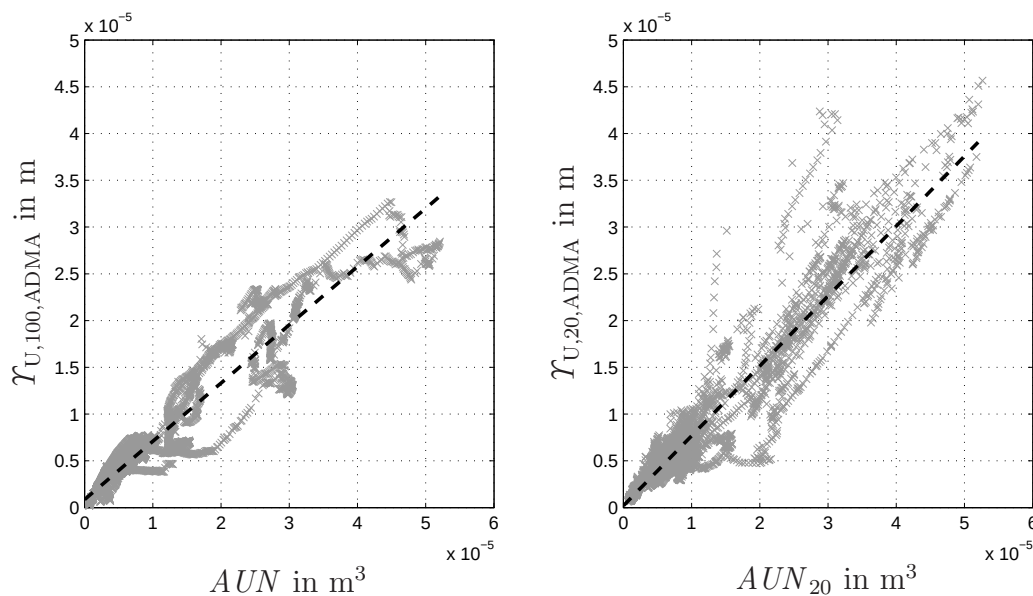


Abbildung A.4: Vergleich der Referenzgrößen AUN und AUN_{20} mit dem basierend auf den ADMA-Messungen bestimmten Werten des Kriteriums $\mathcal{T}_U$ für alle untersuchten Strecken

A.6 Verläufe zur Unebenheitserkennung

A.6.1 Strecke S1

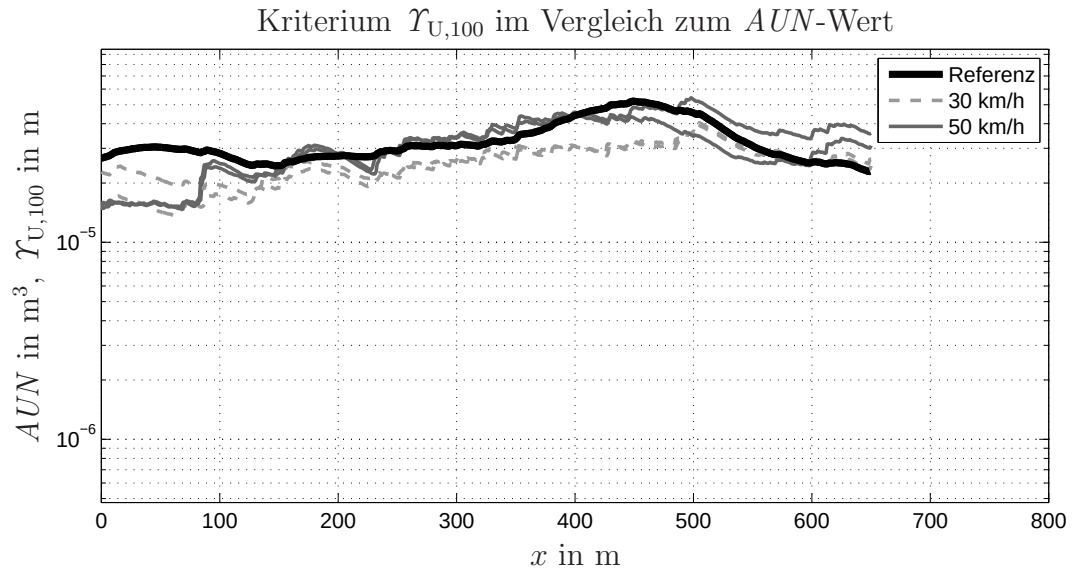


Abbildung A.5: Kriterium $\gamma_{U,100}$ im Vergleich zum AUN -Wert (Referenz) für Strecke 1

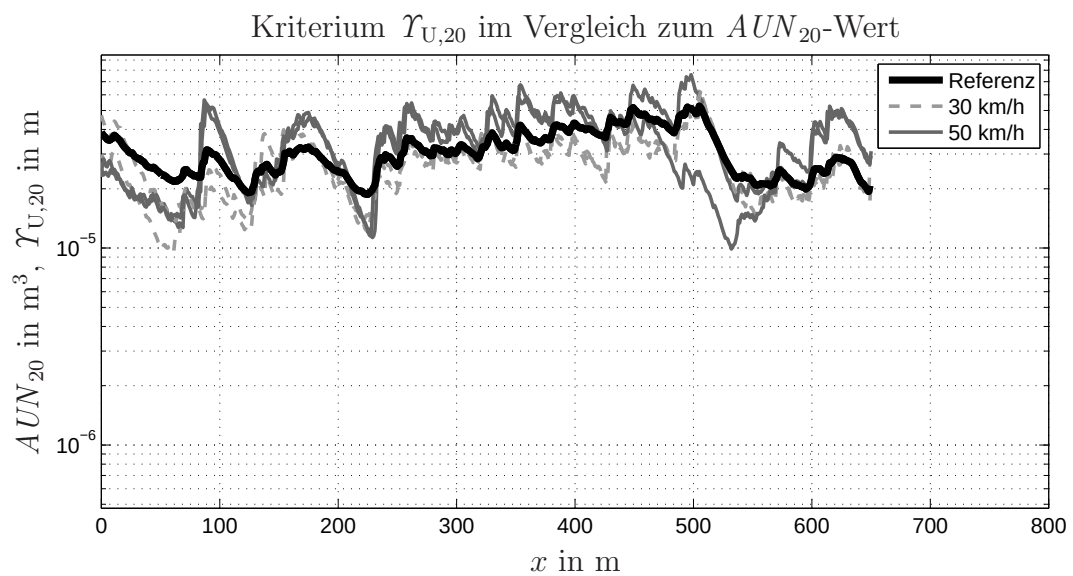


Abbildung A.6: Kriterium $\gamma_{U,20}$ im Vergleich zum AUN_{20} -Wert (Referenz) für Strecke 1

A.6.2 Strecke S2

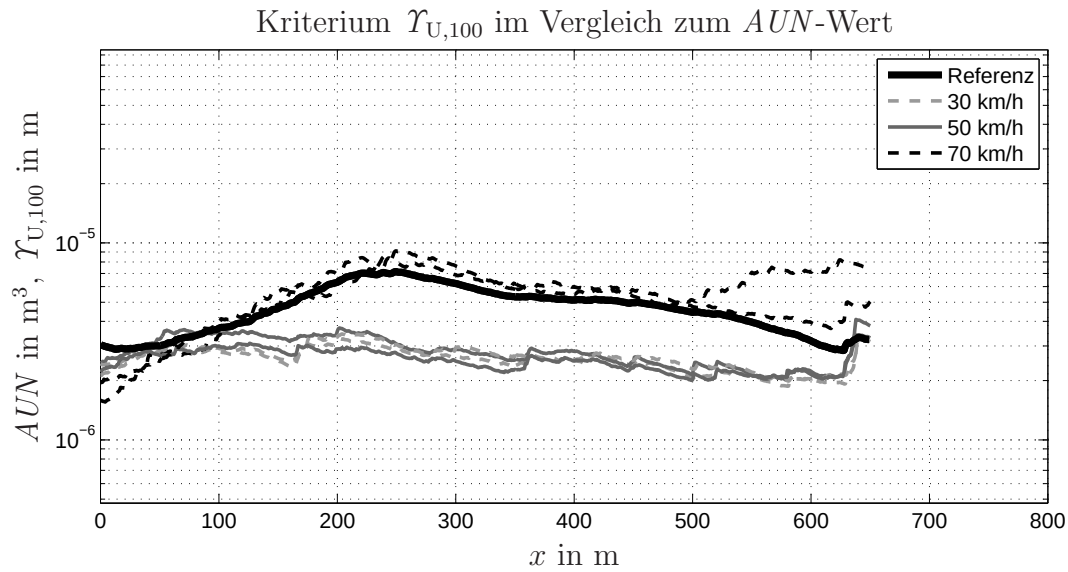


Abbildung A.7: Kriterium $\gamma_{U,100}$ im Vergleich zum AUN -Wert (Referenz) für Strecke 2 (Erläuterungen zu den Abweichungen siehe auch Abschnitt 6.1.4)

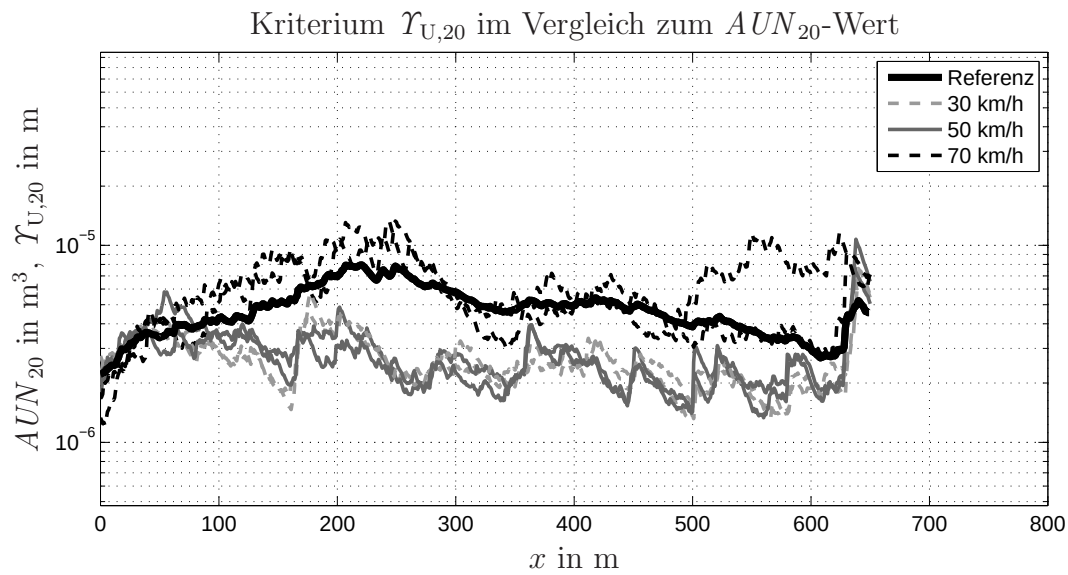


Abbildung A.8: Kriterium $\gamma_{U,20}$ im Vergleich zum AUN_{20} -Wert (Referenz) für Strecke 2

A.6.3 Strecke S3

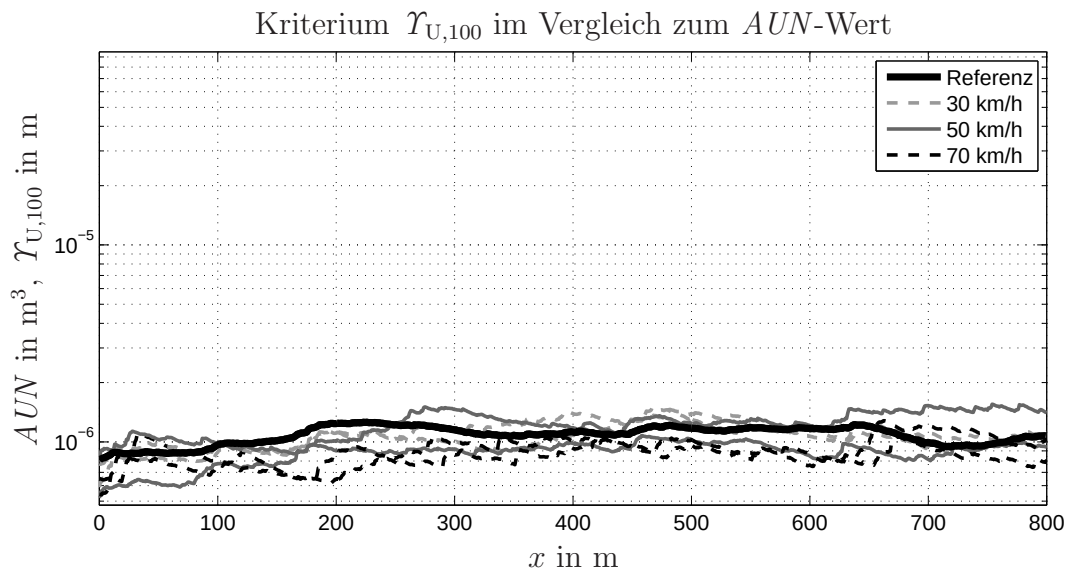


Abbildung A.9: Kriterium $\gamma_{U,100}$ im Vergleich zum AUN -Wert (Referenz) für Strecke 3

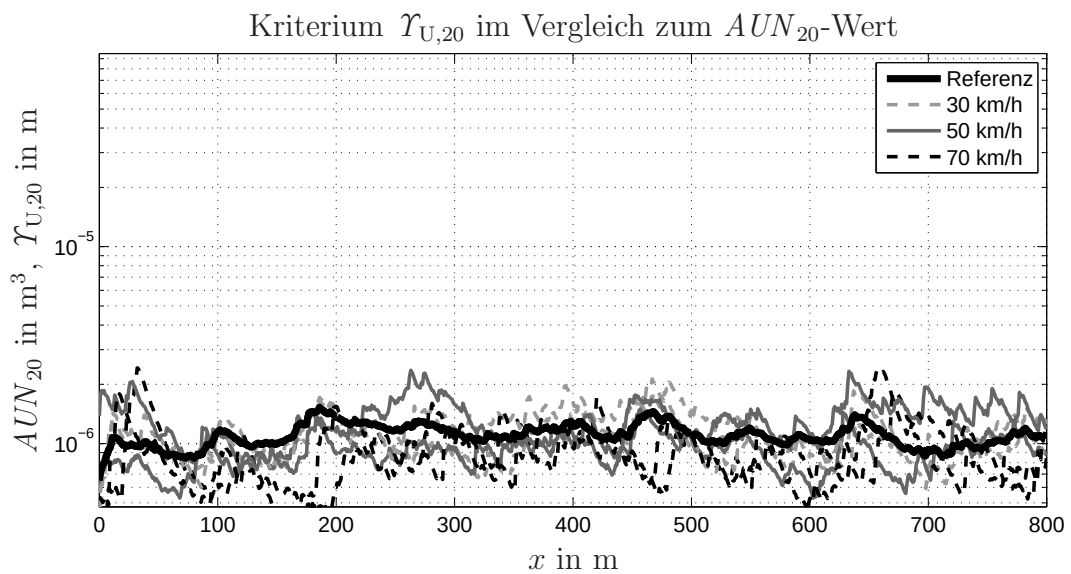


Abbildung A.10: Kriterium $\gamma_{U,20}$ im Vergleich zum AUN_{20} -Wert (Referenz) für Strecke 3

A.7 Erkennung von Ausweichmanövern

A.7.1 Falscherkennung

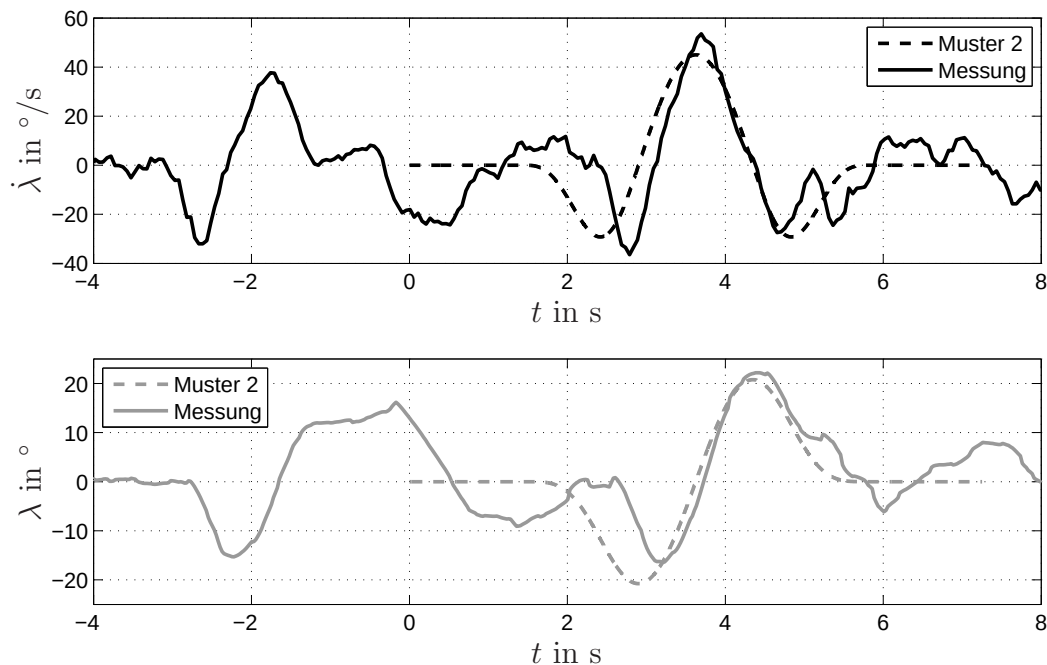


Abbildung A.11: Falscherkennung: Muster 2 im Vergleich zu den Messdaten von Versuch-Nr. 223

A.8 Bestimmung von Warnzeitpunkten

Tabelle A.12: Zeitlücken t_{th} für informierende und alarmierende Warnstufe

v_X in km/h	v_X in m/s	$s_{H,W1}$ in m	t_{th1} in s	$s_{H,W2}$ in m	t_{th2} in s
50	13,9	62,5	4,5	33,5	2,4
60	16,7	82,2	4,9	40,6	2,4
70	19,4	105,1	5,4	48,3	2,5
80	22,2	131,0	5,9	56,9	2,6
90	25,0	160,0	6,4	66,3	2,7
100	27,8	192,1	6,9	76,4	2,7
110	30,6	227,3	7,4	87,2	2,9
120	33,3	265,6	8,0	98,9	3,0

A.9 Probandenstudie

A.9.1 Probandenaufteilung

Tabelle A.13: Verteilung der Warnvarianten auf die Probanden (1. WS: Warnung durch informierenden Warnstufe, 1. FW: Falschwarnung durch informierenden Warnstufe, 2. WS: Warnung durch alarmierende Warnstufe, 2. FW: Falschwarnung durch alarmierende Warnstufe)

ID	Gruppe	1. WS	1. FW	2. WS	2. FW
1	jünger & eher unerfahren	V 1.3	V 1.1	V 2.1	V 2.3
2	älter & eher erfahren	V 1.3	V 1.1	V 2.3	V 2.2
3	jünger & eher unerfahren	V 1.3	V 1.2	V 2.3	V 2.2
4	jünger & eher erfahren	V 1.3	V 1.1	V 2.3	V 2.1
5	älter & eher unerfahren	V 1.3	V 1.1	V 2.2	V 2.1
6	älter & eher unerfahren	V 1.3	V 1.2	V 2.3	V 2.2
7	jünger & eher erfahren	V 1.3	V 1.2	V 2.1	V 2.2
8	jünger & eher erfahren	V 1.3	V 1.1	V 2.3	V 2.1
9	jünger & eher erfahren	V 1.2	V 1.3	V 2.2	V 2.3
10	älter & eher erfahren	V 1.3	V 1.1	V 2.3	V 2.1
11	jünger & eher unerfahren	V 1.3	V 1.1	V 2.3	V 2.1
12	jünger & eher unerfahren	V 1.2	V 1.3	V 2.2	V 2.1
13	jünger & eher erfahren	V 1.2	V 1.1	V 2.2	V 2.3
14	jünger & eher erfahren	V 1.2	V 1.3	V 2.1	V 2.3
15	jünger & eher unerfahren	V 1.1	V 1.3	V 2.0	V 2.3
16	älter & eher erfahren	V 1.2	V 1.3	V 2.2	V 2.3
17	jünger & eher erfahren	V 1.1	V 1.2	V 2.0	V 2.2
18	älter & eher erfahren	V 1.3	V 1.2	V 2.3	V 2.2
19	älter & eher erfahren	V 1.2	V 1.3	V 2.1	V 2.3
20	älter & eher unerfahren	V 1.3	V 1.1	V 2.3	V 2.1
21	jünger & eher unerfahren	V 1.2	V 1.1	V 2.2	V 2.1
22	älter & eher erfahren	V 1.2	V 1.1	V 2.2	V 2.1
23	älter & eher unerfahren	V 1.2	V 1.3	V 2.2	V 2.3
24	älter & eher unerfahren	V 1.2	V 1.1	V 2.2	V 2.1
25	älter & eher erfahren	V 1.1	V 1.2	V 2.1	V 2.2
26	älter & eher erfahren	V 1.1	V 1.3	V 2.0	V 2.3
27	älter & eher erfahren	V 1.1	V 1.2	V 2.0	V 2.1
28	jünger & eher unerfahren	V 1.2	V 1.3	V 2.1	V 2.3
29	älter & eher unerfahren	V 1.2	V 1.3	V 2.1	V 2.3
30	jünger & eher unerfahren	V 1.1	V 1.2	V 2.1	V 2.2
31	älter & eher unerfahren	V 1.1	V 1.2	V 2.1	V 2.2
32	älter & eher unerfahren	V 1.1	V 1.3	V 2.0	V 2.3
33	jünger & eher erfahren	V 1.1	V 1.3	V 2.0	V 2.2
34	älter & eher unerfahren	V 1.1	V 1.2	V 2.0	V 2.2
35	jünger & eher unerfahren	V 1.1	V 1.2	V 2.0	V 2.2
36	jünger & eher erfahren	V 1.1	V 1.2	V 2.0	V 2.1

A.9.2 Probandenfragebogen

Probandenfragebogen

Proband-Nr.: _____

☐ sonnig, keine Wolken

☐ leicht bewölkt

☐ stark bewölkt

☐ kompl. bedeckt

Datum/Uhrzeit: _____

=====

2. Warnstufe

Gefahrstellenpassage

Variante: ☐ V 2.1

☐ V 2.2

☐ V 2.3

☐ V 2.0, d.h. ohne Warnung (keine Bewertung)

Haben Sie am Motorrad etwas wahrgenommen?

☐ nein

☐ ja

Was haben Sie am Motorrad wahrgenommen?

Elemente:

Haben Sie nach der Warnung eine Gefahrenstelle erwartet?

erwartet

--	--	--	--

nicht erwartet

Abbildung A.12: Probandenfragebogen Seite 1

Bewerten Sie die Warnung hinsichtlich der nachfolgenden Aspekte!

wirksam	☐ ☐ ☐ ☐	nicht wirksam
gut wahrnehmbar	☐ ☐ ☐ ☐	nicht gut wahrnehmbar
alarmierend	☐ ☐ ☐ ☐	nicht alarmierend
verwirrend	☐ ☐ ☐ ☐	nicht verwirrend
angemessen	☐ ☐ ☐ ☐	nicht angemessen
unterstützend	☐ ☐ ☐ ☐	nicht unterstützend

Haben Sie weitere Bemerkungen bezüglich der Warnung, die bisher nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt wurden?

FW-Frage

Variante: ☐ V 2.1 ☐ V 2.2 ☐ V 2.3

Haben Sie am Motorrad etwas wahrgenommen?

☐ nein ☐ ja

Was haben Sie am Motorrad wahrgenommen?

Elemente:

Wie störend empfanden Sie dies?

störend	☐ ☐ ☐ ☐	nicht störend
---------	---	---------------

Haben Sie weitere Bemerkungen, die bisher nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt wurden?

Abbildung A.13: Probandenfragebogen Seite 2

1. Warnstufe

Gefahrstellenpassage

Variante: ☐ V 1.1 ☐ V 1.2 ☐ V 1.3

Haben Sie am Motorrad etwas wahrgenommen?

☐ nein ☐ ja

Was haben Sie am Motorrad wahrgenommen?

Elemente: _____

Haben Sie nach der Information eine Gefahrenstelle erwartet?

erwartet  nicht erwartet

Bewerten Sie die Information hinsichtlich der nachfolgenden Aspekte!

wirksam  nicht wirksam

gut wahrnehmbar  nicht gut wahrnehmbar

aufmerksamkeitssteigernd  nicht aufmerksamkeitssteigernd

verwirrend  nicht verwirrend

angemessen  nicht angemessen

unterstützend  nicht unterstützend

Abbildung A.14: Probandenfragebogen Seite 3

Haben Sie weitere Bemerkungen bezüglich der Warnung, die bisher nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt wurden?

FW-Frage

Variante: ☐ V 1.1 ☐ V 1.2 ☐ V 1.3

Haben Sie am Motorrad etwas wahrgenommen?

☐ nein ☐ ja

Was haben Sie am Motorrad wahrgenommen?

Elemente:

Wie störend empfanden Sie dies?

störend

--	--	--	--

nicht störend

Haben Sie weitere Bemerkungen, die bisher nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt wurden?

Abbildung A.15: Probandenfragebogen Seite 4

A.9.3 Ergebnisse der Probandenbewertungen

Tabelle A.14: HMI-Probandenbewertung V 1.1

	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	
	Anteil	Anteil	Anteil	Anteil	
nicht erwartet	4	0	3	5	erwartet
	33%	0%	25%	42%	
nicht wirksam	4	0	1	7	wirksam
	33%	0%	8%	58%	
nicht gut wahrnehmbar	4	1	0	7	gut wahrnehmbar
	33%	8%	0%	58%	
nicht aufm.-steigernd	4	0	1	7	aufmerksamkeitsst.
	33%	0%	8%	58%	
verwirrend	0	0	2	10	nicht verwirrend
	0%	0%	17%	83%	
nicht angemessen	5	0	1	6	angemessen
	42%	0%	8%	50%	
nicht unterstützend	4	0	1	7	unterstützend
	33%	0%	8%	58%	
störend	2	2	3	5	nicht störend
	17%	17%	25%	42%	

Tabelle A.15: HMI-Probandenbewertung V 1.2

	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	
	Anteil	Anteil	Anteil	Anteil	
nicht erwartet	1	1	0	10	erwartet
	8%	8%	0%	83%	
nicht wirksam	1	0	0	11	wirksam
	8%	0%	0%	92%	
nicht gut wahrnehmbar	1	0	2	9	gut wahrnehmbar
	8%	0%	17%	75%	
nicht aufm.-steigernd	2	0	0	10	aufmerksamkeitsst.
	17%	0%	0%	83%	
verwirrend	1	0	1	10	nicht verwirrend
	8%	0%	8%	83%	
nicht angemessen	1	1	2	8	angemessen
	8%	8%	17%	67%	
nicht unterstützend	2	0	0	10	unterstützend
	17%	0%	0%	83%	
störend	1	1	2	8	nicht störend
	8%	8%	17%	67%	

Tabelle A.16: HMI-Probandenbewertung V 1.3

	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	
	Anteil	Anteil	Anteil	Anteil	
nicht erwartet	0	0	1	11	erwartet
	0%	0%	8%	92%	
nicht wirksam	0	0	2	10	wirksam
	0%	0%	17%	83%	
nicht gut wahrnehmbar	0	0	1	11	gut wahrnehmbar
	0%	0%	8%	92%	
nicht aufm.-steigernd	0	0	0	12	aufmerksamkeitsst.
	0%	0%	0%	100%	
verwirrend	0	0	1	11	nicht verwirrend
	0%	0%	8%	92%	
nicht angemessen	0	0	1	11	angemessen
	0%	0%	8%	92%	
nicht unterstützend	0	0	0	12	unterstützend
	0%	0%	0%	100%	
störend	4	3	2	3	nicht störend
	33%	25%	17%	25%	

Tabelle A.17: HMI-Probandenbewertung V 2.1

	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	
	Anteil	Anteil	Anteil	Anteil	
nicht erwartet	1	1	2	5	erwartet
	11%	11%	22%	56%	
nicht wirksam	0	0	0	9	wirksam
	0%	0%	0%	100%	
nicht gut wahrnehmbar	0	1	1	7	gut wahrnehmbar
	0%	11%	11%	78%	
nicht alarmierend	0	1	0	8	alarmierend
	0%	11%	0%	89%	
verwirrend	0	3	2	4	nicht verwirrend
	0%	33%	22%	44%	
nicht angemessen	0	0	3	6	angemessen
	0%	0%	33%	67%	
nicht unterstützend	1	0	1	7	unterstützend
	11%	0%	11%	78%	
störend	5	2	2	3	nicht störend
	42%	17%	17%	25%	

Tabelle A.18: HMI-Probandenbewertung V 2.2

	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	
	Anteil	Anteil	Anteil	Anteil	
nicht erwartet	2	1	3	3	erwartet
	22%	11%	33%	33%	
nicht wirksam	1	0	1	7	wirksam
	11%	0%	11%	78%	
nicht gut wahrnehmbar	0	0	0	9	gut wahrnehmbar
	0%	0%	0%	100%	
nicht alarmierend	1	1	4	3	alarmierend
	11%	11%	44%	33%	
verwirrend	3	3	1	2	nicht verwirrend
	33%	33%	11%	22%	
nicht angemessen	2	1	1	5	angemessen
	22%	11%	11%	56%	
nicht unterstützend	2	2	2	3	unterstützend
	22%	22%	22%	33%	
störend	2	0	5	5	nicht störend
	17%	0%	42%	42%	

Tabelle A.19: HMI-Probandenbewertung V 2.3

	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	
	Anteil	Anteil	Anteil	Anteil	
nicht erwartet	4	1	3	1	erwartet
	44%	11%	33%	11%	
nicht wirksam	1	0	2	6	wirksam
	11%	0%	22%	67%	
nicht gut wahrnehmbar	0	0	1	8	gut wahrnehmbar
	0%	0%	11%	89%	
nicht alarmierend	1	3	2	3	alarmierend
	11%	33%	22%	33%	
verwirrend	2	4	2	1	nicht verwirrend
	22%	44%	22%	11%	
nicht angemessen	0	0	3	6	angemessen
	0%	0%	33%	67%	
nicht unterstützend	0	1	2	6	unterstützend
	0%	11%	22%	67%	
störend	2	1	5	4	nicht störend
	17%	8%	42%	33%	

A.9.4 Statistische Auswertung der Probandenbewertungen

Tabelle A.20: Signifikanzbetrachtungen nach Wilcoxon-Rangsummen-Tests für Probandenbewertungen von V 1.2 und V 1.3 der informierenden Warnstufe (Signifikanzen, d. h. p-Wert $\leq 0,05$, und Tendenzen, d. h. p-Wert $\leq 0,20$, hervorgehoben)

	p-Wert
Gefahrenerwartung	51%
empfundene Wirksamkeit	65%
Wahrnehmbarkeit	29%
Aufmerksamkeitssteigerung	17%
Verwirrung	55%
Angemessenheit	13%
Unterstützung	17%
Verzeihlichkeit	3%

Tabelle A.21: Signifikanzbetrachtungen nach Wilcoxon-Rangsummen-Tests für Probandenbewertungen der alarmierenden Warnstufe (Signifikanzen, d. h. p-Wert $\leq 0,05$, und Tendenzen, d. h. p-Wert $\leq 0,20$, hervorgehoben)

	p-Wert		
	V 2.1 zu V 2.2	V 2.1 zu V 2.3	V 2.2 zu V 2.3
Gefahrenerwartung	44%	6%	28%
empfundene Wirksamkeit	47%	21%	93%
Wahrnehmbarkeit	47%	74%	100%
Alarmierungsgrad	4%	4%	73%
Verwirrung	15%	11%	97%
Angemessenheit	40%	100%	40%
Unterstützung	11%	93%	13%
Verzeihlichkeit	13%	22%	67%

Literaturverzeichnis

Aktiv (2010): Ergebnishandbuch

Aktiv: *Ergebnishandbuch*. Forschungsinitiative Aktiv, Kirchheim, 2010

Albers et al. (1998): Regressionsanalyse

Albers, S.; Skiera, B.: *Regressionsanalyse*. Marktforschung. Grundlagen - Methoden - Anwendungen, Dr. Th. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1998

Albus (1993): Bewertung von Maßnahmen der aktiven Sicherheit

Albus, C.: *Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der aktiven Sicherheit von Motorrädern*. 5. VDI-Fachtagung Motorrad, Berlin, 1993

ADAC (2010): Unfallforschung zu Motorrad-ABS

Allgemeiner Deutscher Automobil-Club: *ADAC Unfallforschung zu Motorrad-ABS*. Internetquelle: http://www1.adac.de/Auto_Motorrad/Motorrad/sicherheit/unfallf_motoabs/default.asp, Zugriff: 05.04.2010, 2010

Appel et al. (2002): Unfallforschung

Appel, H.; Krabbel, G.; Vetter, D.: *Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion*. Verlag INFORMATION Ambs, Kippenheim, 2002

Assing (2002): Unfallgeschehen von Motorradfahrern

Assing, K.: *Schwerpunkte des Unfallgeschehens von Motorradfahrern*. BAST-Bericht M 137, Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach, 2002

ACEM (2008): MAIDS-Studie V 1.3

Association des Constructeurs Européens de Motocycles: *In-Depth Investigations of Accidents Involving Powered Two Wheelers (MAIDS) Version 1.3*. ACEM, Brüssel, 2008

Bachmann (1996): Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn

Bachmann, T.: *Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 286, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996

Bar-Shalom et al. (2001): Estimation for Tracking and Navigation

Bar-Shalom, Y.; Li, X.-R.; Kirubarajan, T.: *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. John Wiley & Sons, New York, 2001, 1995

Bayer (1986): Pendeln und Flattern von Krafträdern

Bayer, B.: *Das Pendeln und Flattern von Krafträdern*. IfZ-Forschungshefte, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, 1986

BMW (2009): BMW Motorrad ConnectedRide

Bayerische Motoren Werke AG: *BMW: ConnectedRide, 2009*. Pressemitteilung von Honda Motor Co., Ltd. am 25. Juni 2009, 2009

Becker (2003): IVHW System Concept

Becker, I.: *Inter-Vehicle Hazard Warning - System Concept and Issues relevant for Standardization*. Projektbericht, DEUFRAKO Project Consortium, 2003

Boes et al. (2007): Verkehrswarnsystem

Boes, J.; Seibert, W.; Hilt, H.-J.: *Verfahren zur ortsabhängigen Warnung von Fahrzeugen vor Gefahrensituationen*. Patentschrift DE 10 2005 055 208 A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München, 2007

Braun et al. (1991): Sammlung und Auswertung von Straßenunebenheitsdaten - Teil 1

Braun, H.; Liesner, W.; Mitschke, M.; Gerz, U.; Ohnemüller, L.; Altendorfer, D.; Sulten, P.; Hellenbroich, T.: *Sammlung und Auswertung von Straßenunebenheitsdaten - Untersuchung und Vergleich verschiedener Meßgeräte und Auswerteverfahren auf Eignung zur routinemäßigen Erfassung und Bewertung des Ebenheitszustandes - Teil 1*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Nr. 598, Bundesministerium für Verkehr, 1991

Brendicke (1993): Problemstrecken für Motorradfahrer

Brendicke, R.: *Problemstrecken für Motorradfahrer - Ergebnisse eines interdisziplinären Forschungsprojekts*. 5. VDI-Fachtagung Motorrad, Berlin, S. 287 ff., 1993

Breuer (2009): Bewertungsverfahren von FAS

Breuer, J.: *Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen*. Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009

Brignolo et al. (2008): SAFESPOT Project - Use cases

Brignolo, V. G., R.; Visintainer, F.; Belarbi, F.; , M., Dozza: *Use cases, functional specifications and safety margin applications for the SAFESPOT Project*. SAFESPOT Project, Turin, 2008

Bruder et al. (2009): Gestaltung von MMS

Bruder, R.; Didier, M.: *Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen*. Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009

Bubb (2003): Fahrversuche mit Probanden

Bubb, H.: *Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko*. Tagungsband des 1. Darmstädter Kolloquiums Mensch und Fahrzeug, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 557, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 26 ff., 2003

BGBI.: StVO (Stand 12/2010)

Bundesgesetzblatt: *Straßenverkehrs-Ordnung*. Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft, Bonn, 2010, 2010

BGBI. (A): StVO (Stand 05/2011)

Bundesgesetzblatt: *Straßenverkehrsordnung, 23. StVO-Novelle*. Rechtsinformationssystem der Republik Österreich, Wien, 2011, 2011

Burg et al. (2007): Unfälle mit Zweirädern

Burg, H.; Moser, A.: *Unfälle mit Zweirädern*. Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, Vieweg, 2007

Cossalter (2006): Motorcycle Dynamics

Cossalter, V.: *Motorcycle Dynamics - Second Edition*. LULU, Raleigh, 2006

Cucuz (1992): Schwingungsempfinden

Cucuz, S.: *Schwingungsempfinden von Pkw-Insassen*. Dissertation, TU Braunschweig, 1992

DIN EN 13036-5 (2006): Oberflächeneigenschaften - Bestimmung der Längsunebenheit

DIN-Normenausschuss Bauwesen: *Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Prüfverfahren - Teil 5: Bestimmung der Längsunebenheitsindizes (13036-5:2006)*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2006

DIN EN ISO 9241-110 (2008): Mensch-System-Interaktion

DIN-Normenausschuss Ergonomie: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006)*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2008

DIN 70000 (1994): Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten

DIN-Normenausschuss Kraftfahrzeuge: *Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 1994

DIN EN ISO 17287 (2003): Gebrauchstauglichkeit

DIN-Normenausschuss Kraftfahrzeuge: *Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und -assistenzsystemen - Verfahren zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit beim Führen eines Kraftfahrzeuges (ISO 17287:2003)*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2003

DIN EN ISO 15008 (2003): Visuelle Informationsdarstellung

DIN-Normenausschuss Kraftfahrzeuge: *Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug (ISO 15008:2003)*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2003

DIN EN ISO 15006 (2004): Auditive Informationen

DIN-Normenausschuss Kraftfahrzeuge: *Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Anforderungen und Konformitätsverfahren für die Ausgabe auditiver Informationen im Fahrzeug (ISO 15006:2004)*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2004

Eichhorn (1994): Reibwert - Erkennung und Einflussgrößen

Eichhorn, U.: *Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn - Erkennung und Einflussgrößen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 222, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994

Engels (1986): Analyse des Unfallgeschehens mit motorisierten Zweirädern

Engels, K.: *Analyse des Unfallgeschehens mit motorisierten Zweirädern auf der Basis des von der Polizei erhobenen Unfallmaterials*. Forschungsheft Nr. 3: Der Motorradunfall, hrsg. von H. Koch, Institut für Zweiradsicherheit, Bochum, S. 93 ff., 1986

Enkelmann (2003): FleetNet

Enkelmann, W.: *FleetNet - Applications for Inter-Vehicle Communication*. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2003, Columbus, S. 162ff., 2003

EU (2006): Statements of Principles on HMI

European Union: *Update of the European Statements of Principles on Human Machine Interface*. Official Journal of the European Union L 32/200, European Union, 2006

Frey et al. (2008): Signal- und Systemtheorie

Frey, T.; Bossert, M.: *Signal- und Systemtheorie*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008

Fuchs (2009): V2V-Kommunikation für Motorräder

Fuchs, O.: *Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation: Wie reden Motorräder mit der Straße und anderen Verkehrsteilnehmern?* Internationales Motorradsymposium 2009, Tagungsband, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Berlin, 2009

Fuerstenberg et al. (2007): INTERSAFE-Abschlussbericht

Fuerstenberg, K.; Hopstock, M.; Obojski, A.; Rössler, B.; Chen, S., J. Deutschle; Benson, C.; Weingart, J.; Chinea Manrique de Lara, A.: *INTERSAFE - Final Report (Project Evaluation and Effectiveness of the Intersection Safety System)*. PREVENT Consortium, Sindelfingen, 2007

Funke (2007): Belastung von Motorradfahrern

Funke, J.: *Belastung und Beanspruchung von Motorradfahrern bei der Bremsung mit verschiedenen Bremssystemen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 633, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007

Ganzhorn et al. (2010): MMS-Konzept für motorisierte Krafträder

Ganzhorn, M.; Diederichs, J. P. F.; Bekiaris, E.; Nikolaou, S.; Montanari, R.; Spadoni, A.; Fontana, M.; Bencini, G.; Baldanzini, S., N. Granelli: *Entwicklung eines benutzergerechten MMS-Konzepts für Fahrerassistenzsysteme für motorisierte Krafträder*. Tagungsband der 8. Internationalen Motorradkonferenz, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, S. 49 ff., 2010

Geissler et al. (2011): Assessment of the SAFESPOT cooperative systems

Geissler, T.; Schindhelm, R.; Luedeke, A.: *Socio-economic assessment of the SAFESPOT cooperative systems - Methodology, final assessment results and deployment conclusions*. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2011, Baden-Baden, 2011

Giovannini et al. (2011): Development of PTW Active Braking

Giovannini, F.; Savino, G.; Pierini, M.: *Influence of the Minimum Swerving Distance on the Development of Powered Two Wheeler Active Braking*. Proceedings of the 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Washington, 2011

Gross et al. (2010): Technische Mechanik: Kinetik

Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W. A.: *Technische Mechanik - Band 3: Kinetik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010

Gwehenberger et al. (2006): Schwerstunfälle mit Motorrädern

Gwehenberger, J.; Schwaben, I.; Sporner, A.; Kubitzki, J.: *Schwerstunfälle mit Motorrädern - Analyse der Unfallstruktur und der Wirksamkeit von ABS*. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Nr. 01/2006, Wiesbaden, S. 11 ff., 2006

Hautzinger et al. (2006): Hochrechnung von Unfalldaten

Hautzinger, H.; Pfeifer, M.; Schmidt, J.: *Hochrechnung von Daten aus Erhebungen am Unfallort*. BAST-Bericht F 59, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, 2006

Hegewald (2010): Straßeninfrastruktur und Motorradunfälle

Hegewald, A.: *The interaction between road infrastructure parameters and motorcycle crashes in Germany - results from the EU project '2BESAFE'*. Tagungsband der 8. Internationalen Motorradkonferenz, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, S. 49 ff., 2010

Heißing et al. (2011): Fahrwerkhandbuch

Heißing, B.; Ersoy, M.; Gies, S.: *Fahrwerkhandbuch - Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. Vieweg, 2011

Hoffmann (2008): Test und Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen

Hoffmann, J.: *Das Darmstädter Verfahren (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 693, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2008

Hoffmann et al. (2009): Fahrerwarnelemente

Hoffmann, J.; Gayko, J. E.: *Fahrerwarnelemente*. Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009

Hohm (2010): Überholassistentensystem

Hohm, A.: *Umfeldklassifikation und Identifikation von Überholzielen für ein Überholassistentensystem*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 727, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2010

Honda (2008): ASV 4 Motorcycle

Honda: *Advanced Safety Vehicle 4 Motorcycle*. Pressemitteilung zum Car2Car Communication Concorcium Demonstrator am 22./23. Oktober 2008, Dudenhofen, 2008

Honda (2005): ASV-3 Advanced Safety Vehicles

Honda Motor Co., Ltd.: *Honda Completes Development of ASV-3 Advanced Safety Vehicles*. Pressemitteilung von Honda Motor Co., Ltd. am 02. September 2005, 2008

IVM (2010): Jahresbericht 2009

Industrie-Verband Motorrad Deutschland (IVM): *IVM-Jahresbericht 2009*. IVM, Essen, 2010, 2010

INVENT (2006): Schlussbericht FAS

INVENT, F.: *Schlussbericht FAS*. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2006

Issing (2006): Telematik und Telemedizin

Issing, M. M.: *Telematik und Telemedizin zur Verbesserung der präklinischen Notfallversorgung nach Straßenverkehrsunfällen*. Dissertation, Medizinische Fakultät der Charité - Universitätsmedizin Berlin, Berlin, 2006

Jakobsson et al. (2010): Automatisierte Stauassistentz

Jakobsson, E.; Beutner, A.; Bergquist, S.; Wassén, H.; Grubb, G.; Svedlund,

- B.; Jarlengrip, J.:** *Automated Queue Assistance: 1st System Functionality*. HAVEit Consortium, 2010
- Kühn et al. (2008): Analyse des Motorradunfallgeschehens
Kühn, M.; Körner, M.; Unger, M.: *Analyse des Motorradunfallgeschehens - Interdisziplinäre Analyse der Sicherheitslage von Motorradfahrern in Deutschland*. Tagungsband der 7. Internationalen Motorradkonferenz, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, S. 51 ff., 2008
- Klanner (2008): Kommunikationsbasierte Querverkehrsassistenz
Klanner, F.: *Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 685, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2008
- Knepper et al. (1997): systematische Straßenerhaltung
Knepper, S.; Sulten, P.: *Auf dem Wege zu einer systematischen Straßenerhaltung*. Straße und Autobahn 48.1997, Kirschbaum Verlag, Bonn, S. 605 ff., 1997
- König (2009): MMI-Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen
König, W.: *Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen*. Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009
- Koelen et al. (2011): Radarbasierter Spurwechselassistent für Motorräder
Koelen, C.; Dostal, T.; Diederichs, F.: *Erster radarbasierter Spurwechselassistent für motorisierte Zweiräder*. Tagungsband zum 7. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Uni-DAS, Walting, 2011
- KBA (2010): Fahrzeugzulassungen
Kraftfahrt-Bundesamt: *Fahrzeugzulassungen 2010*. Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2010
- Kramlich (2002): Die häufigsten Gefahrensituationen für Motorradfahrer
Kramlich, T.: *Noch immer gefährliche Begegnungen - Die häufigsten Gefahrensituationen für Motorradfahrer und die resultierenden Verletzungen*. GDV Institut für Fahrzeugsicherheit, München, 2002
- Kunert et al. (2011): Kraftfahrzeugverkehr 2010
Kunert, U.; und Radke, S.: *Kraftfahrzeugverkehr 2010: Weiteres Wachstum und hohe Bedeutung von Firmenwagen*. Wochenbericht Nr. 48/2011, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin, 2011
- Kuschefski et al. (2006): Sicherheitsbewusstsein von Motorradfahrern
Kuschefski, A.; Haasper, M.; Vallese, A.: *Das Sicherheitsbewusstsein von Motorradfahrern in Deutschland*. Tagungsband der 6. Internationalen Motorradkonferenz, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, S. 317 ff., 2006
- Lattke et al. (2011): Hazard Detection in a Cooperative Assistance System
Lattke, B.; Sperber, F.; Müller, T.; Winner, H.; Eberlein, R.; Hoffman, R.: *MoLife - Hazard Detection in a Cooperative Assistance System for Motorcycles*. Proceedings of the 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Washington, 2011

- Lattke et al. (2010): A Communication-Based ADAS for Motorcycles
Lattke, B.; Sperber, F.; Schad, R.; Zademach, M.; Winner, H.; Eberlein, R.: *MoLife - Development of a Communication-Based Driver Assistance System for Motorcycles*. Tagungsband der 8. Internationalen Motorradkonferenz, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, S. 49 ff., 2010
- Lunze (2010): Regelungstechnik
Lunze, J.: *Regelungstechnik 1 - Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- Mages (2008): Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten
Mages, M.: *Top-Down-Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 694, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2008
- Mages et al. (2009): Kreuzungsassistenten
Mages, M.; Hopstock, M.; Klanner, F.: *Kreuzungsassistenten*. Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009
- Matheus et al. (2004): Economic Background of C2CC
Matheus, K.; Morich, R.; Lübke, A.: *Economic Background of Car-to-Car-Communication*. 2. Braunschweiger Symposium Informationssysteme für mobile Anwendungen, GZVB Verlag, Braunschweig, 2004
- Meinken et al. (2007): WATCH-OVER
Meinken, K.; Andreone, L.; Guarise, A.; Sikora, A.: *Watch-Over: The Concept of a Cooperative System for Vehicle to Vulnerable Road Users Communication*. Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Lyon, 2007
- Mühlbacher et al. (2011): Wirkung von C2X-basierten Fahrerassistenzsystemen
Mühlbacher, D.; Maag, C.; Krüger, H.-P.: *Die Pulksimulation als neue Methode zur Erfassung der Wirkung von Car2X-basierten Fahrerassistenzsystemen*. Tagungsband zum 7. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Uni-DAS, Walting, 2011
- Mitschke et al. (1995): Einfluss von Einzelhindernissen und Periodizitäten
Mitschke, M.; Klingner, B.; Braun, H.: *Zulässige Amplituden und Wellenlängen herausragender Unebenheitsanteile - Einfluss von Einzelhindernissen und Periodizitäten auf Fahrkomfort, Straßen-, Fahrzeug- und Ladegutbeanspruchung sowie Fahrsicherheit*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, 1995
- Müller et al. (2003): Reibwertschätzung
Müller, S.; Uchanski, M.; Hedrick, K.: *Estimation of the Maximum Tire-Road Friction Coefficient*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2003
- Naab (2009): simTD - Beschreibung der C2X-Funktionen
Naab, K.: *Deliverable D11.1 - Beschreibung der C2X-Funktionen*. simTD Konsortium, 2009

Najm et al. (2011): Framework for Vehicle-to-Vehicle Communications

Najm, W.; Toma, S.; Harding, J.: *Pre-Crash Scenario Framework for Crash Avoidance Systems Based on Vehicle-to-Vehicle Communications*. Proceedings of the 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Washington, 2011

Nathan et al. (2007): System zum Warnen vor Gefahren

Nathan, J. F.; Maue, W.: *Verfahren und System zum Warnen vor Gefahren*. Patentschrift DE 10 2007 043 911 A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München, 2007

Neukum et al. (2007): Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Störfall

Neukum, A.; Ufer, E.; Paulig, J.; Krüger, H.-P.: *Bewertung des Fail-Safe-Verhaltens von Überlagerungslenkungen: Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Störfall*. Abschlussbericht, Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg, 2007

Ohm et al. (2010): Signalübertragung

Ohm, J.-R.; Lüke, H. D.: *Signalübertragung - Grundlagen der digitalen und analogen Nachrichtenübertragungssysteme*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010

Otte et al. (1991): Einsatz von Elektronik im Motorrad

Otte, D.; Schlichting, K.-D.: *Kann der Einsatz von Elektronik im Motorrad Unfälle vermeiden?* VDI-Berichte, Nr. 875, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 323, 1991

Pfeifer et al. (2008): Fahrzeugkommunikation im Motorrad

Pfeifer, R.; Müller, P.; Klanner, F.; Purschwitz, A.; Kosch, T.: *Aktive Motorradsicherheit auf Basis von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation*. Tagungsband der 7. Internationalen Motorradkonferenz, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, S. 341 ff., 2008

Pieve (2010): Safety in Motion (SIM)

Pieve, M.; Santucci, M. D.; Di Tanna, O.: *Safety In Motion (SIM). Integrated approach for motorcycle safety*. Tagungsband der 8. Internationalen Motorradkonferenz, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, S. 49 ff., 2010

Präckel (1999): Die Motorradbremsung

Präckel, J.: *Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 384, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999

Rauscher (2007): Ausweichen von einspurigen Fahrzeugen

Rauscher, H.: *Empirische Untersuchung des Spurwechsels und Ausweichens von einspurigen Fahrzeugen*. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2/2007, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2007

Reichardt et al. (2002): CarTALK 2000

Reichardt, D.; Miglietta, M.; Moretti, L.; Morsink, P.; Schulz, W.: *CarTALK 2000 - Safe and Comfortable Driving Based Upon Inter-Vehicle Communication*. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2002, Versailles, S. 545f., 2002

Reichel (2003): Einfluss von Schwingungsdämpfern

Reichel, J.: *Untersuchungen zum Einfluss stufenlos verstellbarer Schwingungsdämpfer*

auf das instationäre Bremsen von Personenwagen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 553, VDI-Verlag, Düsseldorf

Reithinger et al. (2007): SmartWeb

Reithinger, N.; Herzog, G.; Blocher, A.: *SmartWeb - Mobile Broadband Access to the Semantic Web*. KI - Künstliche Intelligenz 2/2007, 2007

Reul (2011): Bremswegverkürzungspotential

Reul, M.-A.: *Bremswegverkürzungspotential bei Informationsaustausch und Koordination zwischen semiaktiver Dämpfung und ABS*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 738, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2011

Roadconsult (2011): Straßenzustand - Schadenbilder

Roadconsult AG: *Straßenzustand - Schadenbilder*. Internetquelle: <http://www.roadconsult.ch/schadenbilder.html>, Zugriff: 21.09.2011, 2011

Sagisaka (2011): Toward Safety Technology Using ITS

Sagisaka, A.: *Toward Safety Technology Using ITS*. First International Symposium on Future Active Safety Technology toward Zero-traffic-accident, Shibaura Institute of Technology, Tokyo, 2011

Sanfridson et al. (2011): Active Green Driving

Sanfridson, M.; Lundgren, A.; Jarlengrip, J.; Grubb, G.; Feng, L.; Bruce, M.: *Active Green Driving: 1st System Functionality*. HAVEit Consortium, 2011

Schell (2002): MMS-Untersuchungen Motorrad

Schell, M.: *Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Schnittstelle am motorisierten Zweirad*. Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie der TU München, 2002

Schlipf et al. (2011): Videobasierte Rollwinkelschätzung

Schlipf, M.; Schepanek, J.; Salmen, J.: *Video-Based Roll Angle Estimation for Two-Wheeled Vehicles*. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2011, Baden-Baden, 2011

Schmidt (2010): Satellitennavigations- und Fahrdynamiksensordaten

Schmidt, D.: *Fehleranalyse und Datenfusion von Satellitennavigations- und Fahrdynamiksensordaten*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 719, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2010

Schröter et al. (2010): Bremslenkmomentoptimierte Motorrad-Kurvenbremsung

Schröter, K.; Bunthoff, J.; Fernandes, F.; Schröder, T.; Winner, H.; Seini-ger, P.; Tani, K.; Fuchs, O.: *Bremslenkmomentoptimierte Motorrad-Kurvenbremsung*. Tagungsband der 8. Internationalen Motorradkonferenz, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, S. 396 ff., 2010

Schüssler (2001): Funkbasierte Gefahrenwarnung

Schüssler, R.: *Vorrichtung zur funkbasierten Gefahrenwarnung des Fahrers eines Kraftfahrzeugs*. Patentschrift DE 100 07 573 C1, Deutsches Patent- und Markenamt, München, 2001

Schulze et al. (2008): PReVENT Final Report

Schulze, M.; Mäkinen, T.; Irion, J.; Flament, M.; Kessel, T.: *Preventive and Active Safety Applications Integrated Project - Final Report*. PReVENT Consortium, Sindelfingen, 2008

Schweers et al. (1993): Einfluss von Bitumen auf das Fahrverhalten

Schweers, T. F.; Brendicke, R.: *Untersuchungen des Einflusses von Fahrbahnoberflächen aus Bitumen-Vergussmassen auf das Fahrverhalten von Krafträdern*. 5. VDI-Fachtagung Motorrad, Berlin, S. 247 ff., 1993

SNV (2003): Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen

Schweizerische Normen-Vereinigung: *Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF)*. Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 2003

Seiniger (2009): Erkennung von Motorrad-Kurvenunfällen

Seiniger, P.: *Erkennbarkeit und Vermeidbarkeit von ungebremsten Motorrad-Kurvenunfällen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 707, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2009

Seiniger et al. (2009): Erkennung kritischer Fahrsituationen

Seiniger, P.; Winner, H.: *Objektive Erkennung kritischer Fahrsituationen von Motorrädern*. BAST-Bericht F73, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 2009

Seiniger et al. (2006): Rollwinkelsensorik

Seiniger, P.; Winner, H.; Schröter, K.; Kolb, F.; Eckert, A.; Hoffmann, O.: *Entwicklung einer Rollwinkelsensorik für zukünftige Bremssysteme*. Tagungsband der 6. Internationalen Motorradkonferenz, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, S. 369 ff., 2006

Spiegel (2006): Die obere Hälfte des Motorrads

Spiegel, B.: *Die obere Hälfte des Motorrads - Über die Einheit von Fahrer und Maschine*. Motorbuchverlag, Stuttgart, 2006

Sporner (2002): Bremsen mit Motorrädern

Sporner, A.: *Neueste Ergebnisse der Unfallforschung der Deutschen Autoversicherer mit speziellem Schwerpunkt: Bremsen mit Motorrädern*. Tagungsband der 4. Internationalen Motorradkonferenz, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, S. 151 ff., 2002

Sporner (2006): Einflussgrößen durch Straßenführung und Umfeld

Sporner, A.: *Risiken beim Motorradfahren - Spezielle Einflussgrößen durch Straßenführung und Umfeld*. Tagungsband der 6. Internationalen Motorradkonferenz, Institut für Zweiradsicherheit, Essen, S. 41 ff., 2006

Statistisches Bundesamt (2008): Verkehrsunfälle

Statistisches Bundesamt: *Verkehr - Verkehrsunfälle 2007*. Fachserie 8, Reihe 7, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2008

Statistisches Bundesamt (2011): Zeitreihen 2010

Statistisches Bundesamt: *Verkehrsunfälle - Zeitreihen 2010*. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2011

Stählin et al. (2011): Straßenzustandsinformationen für Vehicle2X

Stählin, U.; Menzel, M.; Eckert, A.; Scherping, R.; Bertram, T.: *Neue Chancen zur Einbeziehung von Straßenzustandsinformationen durch Vehicle2X*. VDI-Berichte, Nr. 2137, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 35 ff., 2006

Stoffregen (2006): Motorradtechnik

Stoffregen, J.: *Motorradtechnik - Grundlagen und Konzepte von Motor, Antrieb und Fahrwerk*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2006

Swoboda et al. (2008): Warnung vor Gefahrensituationen

Swoboda, A.; Stählin, U.: *Verfahren zur ortsabhängigen Warnung von Fahrzeugen vor Gefahrensituationen*. Patentschrift DE 10 2007 052 540 A1, Deutsches Patent- und Markenamt, München, 2008

Takahashi et al. (2004): ASV-2 Safety Vehicle

Takahashi, A.; Asanuma, N.: *ASV-2 Safety Technology*. International Journal of ITS Research, Vol. 2 No. 1, S. 91 ff., 2004

Timpe et al. (2002): Mensch-Maschine-Systematik

Timpe, K. P.; Kolrep, H.; Jürgensohn, T.: *Mensch-Maschine-Systematik ; Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*. Symposium Publishing GmbH, Düsseldorf, 2002

Trias Bonet et al. (2009): Kommunikationssystem für Motorradfahrer

Trias Bonet, S.; Casas, F. J.: *Intercommunication Device for Motorcyclists*. Patentschrift WO 2009/013380 A1, Organización Mundial de la Propiedad Intelectual, 2009

Ueckermann (2005): Das Bewertete Längsprofil

Ueckermann, A.: *Das Bewertete Längsprofil*. Straße und Autobahn 1.2005, Kirschbaum Verlag, Bonn, S. 18 ff., 2005

Verband HUK (1981): Ursachen und Folgen von Kraftradunfällen

Verband der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer, Autoversicherer und Rechtsschutzversicherer e.V.: *Ursachen und Folgen von Kraftradunfällen*. HUK-Verband, Büro für Kfz-Technik, München, 1981

Walker (1992): PROMETHEUS

Walker, J.: *DRIVE, PROMETHEUS and GSM*. Proceedings of Mobile Radio Technology, Marketing and Management Conference, London, 1992

Weber (2005): Verbesserungspotenzial durch Reibwertsensorik

Weber, I.: *Verbesserungspotenzial von Stabilisierungssystemen im Pkw durch eine Reibwertsensorik*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 595, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005

Weiß (2009): Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland

Weiß, C.: *Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland*. Projektprofil, simTD Konsortium, 2009

Weidele (1994): Motorradbremsung

Weidele, A.: *Untersuchungen zum Bremsverhalten von Motorrädern unter besonderer*

Berücksichtigung der ABS-geregelten Kurvenbremsung. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 210, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994

Weidele (2011): Motorräder

Weidele, A.: *Motorräder.* Skriptum, TU Darmstadt, 2011

Welch et al. (2006): Kalman-Filter

Welch, G.; Bishop, G.: An Introduction to the Kalman Filter, Department of Computer Science University of North Carolina and Chapel Hill, Chapel Hill, 2006

Wesp (2011): Bewertung eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung

Wesp, A.: *Analyse fahrerwirksamer Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung bei gleichzeitiger Fahrerbeanspruchung durch eine Fahraufgabe.* Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 741, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2011

Wieker et al. (2008): Projekt WILLWARN

Wieker, H.; Seibert, W.: *Das PReVENT Projekt WILLWARN - Eine neue Dimension der Fahrsicherheit.* Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Saarbrücken, 2008

Winner et al. (2009): Handbuch Fahrerassistenzsysteme

Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme.* Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009

Zeller (2009): Handbuch Fahrzeugakustik

Zeller, P.: *Handbuch Fahrzeugakustik - Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch.* Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009