
Gefahrstellenerkennung in einem kommunikationsbasierten Fahrerassistenzsystem für Motorräder

5. Tagung Fahrerassistenz München

Benedikt Lattke¹, Hermann Winner², Richard Eberlein³, Rainer Hoffmann⁴
München, 15.-16. Mai 2012



Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Fahrzeugtechnik
Petersenstraße 30
D-64287 Darmstadt

¹lattke@fzd.tu-darmstadt.de, 06151/16-6284

²winner@fzd.tu-darmstadt.de, 06151/16-3796

carhs.communication gmbh
Siemensstrasse 12
D-63755 Alzenau

³richard.eberlein@carhs.de, 06023/9640-77

⁴rainer.hoffman@carhs.de, 06023/9640-61

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.

Wichtiger Bestandteil eines solchen kommunikationsbasierten Warnsystems ist ein Modul zur Erkennung von Gefahrstellen. In einer Unfalldatenbankanalyse erweisen sich Unfälle aufgrund von überhöhter Kurvengeschwindigkeit, Reibwertsprüngen (z. B. durch Ölflecken, Rollsplitt), Fahrbahnschäden (z. B. Bodenwellen, Unebenheiten) und Hindernissen (z. B. liegengebliebene Fahrzeuge) als relevant und durch ein solches System potentiell vermeidbar.

Diese Veröffentlichung behandelt die Analyse der Fahrdynamik in Situationen, die durch die beiden letztgenannten Gefahrstellen verursacht werden: Überfahrt von einzelnen Straßenschäden und Ausweichmanöver. Daraus resultieren Kriterien, die auf der Auswertung der Daten von Sensoren im Motorrad basieren und diesen Gefahrstellen eindeutig zuordenbar sind.

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 Warneschwindigkeiten. 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. Damit kann dieses neue Kriterium zur Erkennung von Ausweichmanövern herangezogen werden.

Diese Veröffentlichung liefert somit zwei neue, validierte Kriterien zur sensorbasierten Erkennung von Gefahrstellen. Diese sind wichtige Grundlagen zur Entwicklung eines kommunikationsbasierten Warnsystems für Motorräder.

1 Einleitung

1.1 MoLife - Ein kommunikationsbasiertes Warnsystem für Motorräder



Abbildung 1.1: Funktionsweise von MoLife, einem kommunikationsbasierten Warnsystem für Motorräder

Abbildung 1.1 stellt die Funktionsweise eines kommunikationsbasierten Warnsystems (kbW) für Motorräder 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.

1.2 Stand von Technik und Forschung

Erste kommunikationsbasierte Fahrerassistenzsysteme unter Berücksichtigung von Motorrädern zeigen, dass eine Verwendung von Kommunikationstechnik in dieser Fahrzeugklasse möglich ist (u. a. *Honda ASV*, *BMW Connected Ride*). Diese Anwendungen zur Erhöhung der Sicherheit beim Motorradfahren konzentrierten sich bisher auf die Vermeidung von Kreuzungsunfällen^{1,2}. Weitere realisierte Systeme sind solche zur Warnung vor Rotlichtmissachtung³, Hindernissen⁴, „schlechtem“ Wetter und Einsatzfahrzeugen⁵. Das „Elektronische Bremslicht“⁶ warnt vor starker Verzögerung vorausfahrender Fahrzeuge. Es ist somit das einzige System im Motorrad, das basierend auf der Auswertung von Fahrdynamiksensorik Gefahrstellen erkennt, um Warnmeldungen zu generieren.

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

²Pfeifer et al. (2008): Fahrzeugkommunikation im Motorrad

³Fuerstenberg et al. (2007): INTERSAFE-Abschlussbericht

⁴Fuchs (2009): V2V-Kommunikation für Motorräder, S. 19 f.

⁵Naab (2009): simTD - Beschreibung der C2X-Funktionen, S. 50 ff.

⁶BMW (2009): BMW Motorrad ConnectedRide

1.3 Identifizierung relevanter Gefahrstellen

Eine Unfalldatenbankrecherche führt zu zwei Klassen von durch ein kbW vermeidbaren Unfällen⁷. 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 Ergebnisse einer Nutzerbefragung zur Gefahrstellenbewertung bestätigt⁸. Insgesamt leiten sich daraus folgende relevante Gefahrstellen ab:

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

1.4 Zielsetzung

Der Stand von Technik und Forschung sowie die identifizierten Gefahrstellen führen zu den folgenden Fragestellungen hinsichtlich der Gefahrstellenerkennung basierend auf den Daten von Fahrdynamiksensorik:

1. Gibt es Kriterien zur Erkennung der identifizierten Gefahrstellen, die auf der Auswertung der Daten von Fahrdynamiksensoren im Motorrad basieren?
2. Sind die Kriterien für die identifizierten Gefahrstellen eindeutig?
3. Bewähren sich diese Kriterien in realen Fahrsituationen?

Die vorliegende Veröffentlichung beschreibt Untersuchungen zu diesen Fragestellungen für die Gefahrstellen Fahrbahnschaden (Einzelschaden) und Hindernis. Einzelne Fahrbahnschäden werden in Abschnitt 2 behandelt. Abschnitt 3 konzentriert sich auf die Erkennung von Ausweichmanövern, die durch Hindernisse auf der Fahrbahn ausgelöst werden. Abschnitt 4 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick.

⁷ siehe auch Lattke et al. (2010): A Communication-Based ADAS for Motorcycles, S. 55 ff.

⁸ s. o.

2 Einzelne Fahrbahnschäden

2.1 Beschreibung von Einzelschäden

Erhabene Einzelschäden von Fahrbahnen werden nach Länge, Höhe und Form unterschieden^{1,2,3,4}. Aus genannten Quellen werden folgende Merkmale für erhabene Einzelschäden abgeleitet:

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

Für tiefe Einzelschäden (Schlaglöcher) werden folgende Merkmale angenommen:

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

2.2 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.

2.2.1 Herleitung eines Kriteriums zur Erkennung von Einzelschäden

Mitschke et al. bewerten das menschlichen Empfinden von transienten Schwingungen, die durch einen Einzelschaden ausgelöst werden, anhand der Ergebnisse von Cucuz⁵. Demnach korreliert das

¹BGBl. (A): StVO (Stand 05/2011), §50

²SNV (2003): Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen, S. 11

³Mitschke et al. (1995): Einfluss von Einzelhindernissen und Periodizitäten, S. 117 ff.

⁴Roadconsult (2011): Straßenzustand - Schadenbilder

⁵Mitschke et al. (1995): Einfluss von Einzelhindernissen und Periodizitäten, S. 62

menschliche Schwingungsempfinden, d. h. die ausgelöste Wahrnehmung, mit der Schwingungsgeschwindigkeit⁶. Daher wird diese als Grundlage für die weiteren Untersuchungen herangezogen.

In der Signaltheorie wird zur Bewertung endlicher Anregungen die Signalenergie E_S verwendet. In Abhängigkeit des Fourier-Integrals⁷ $S(\omega)$ gilt folgender Zusammenhang zur Bestimmung der Signalenergie E_S im Frequenzbereich:

$$E_S = \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{|S(\omega)|^2}_{\Phi_E(\omega)} d\omega \quad (2.1)$$

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 $\Phi_E(\omega)$ die Verteilung der Signalenergie in Abhängigkeit der (Zeitkreis-) Frequenz ω . Wird für die Bewertung der Schwingungsgeschwindigkeit die Radvertikalgeschwindigkeit $\hat{v}_{Z,W}(\omega)$ (im Frequenzbereich) verwendet, so berechnet sich die Energiedichte $\Phi_{E,vz,w}(\omega)$ wie folgt:

$$\Phi_{E,vz,w}(\omega) = |\hat{v}_{Z,W}|^2(\omega), [\hat{v}_{Z,W}] = \text{m} \quad (2.2)$$

Abschnitt 2.1 zeigt, dass Einzelschäden (Wellen-) Längen bis zu $L_{\max} = 2,5$ m aufweisen. Dies führt zur Annahme, dass Einzelschäden vorwiegend Vertikalschwingungen mit Wellenlängen (in Längsrichtung) von $L \leq 2,5$ m anregen. Aufgrund des endlichen Reifenradius wird außerdem angenommen, dass es eine untere Grenze L_{\min} gibt⁸. Nach diesen Annahmen regen Einzelschäden nur Schwingungen im Frequenzband von ω_m bis ω_n an. Für diese Frequenzen gilt:

$$\omega_m = \frac{2\pi \cdot v_X}{L_{\max}}, \quad \omega_n = \frac{2\pi \cdot v_X}{L_{\min}} \quad (2.3)$$

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 $E_{vz,w}$ durch das Produkt aus Frequenzauflösung $\Delta\omega$ und Summe der einzelnen Beträge der Energiedichte $\Phi_{E,vz,w}(\omega)$ in dem genannten Frequenzband ($\omega_m \dots \omega_n$) genähert, so gilt:

$$E_{vz,w} \approx \Delta\omega \cdot \sum_{i=m}^n \Phi_{E,vz,w}(\omega_i) = \Delta\omega \cdot \sum_{i=m}^n |\hat{v}_{Z,W}|^2(\omega_i) \quad (2.4)$$

Die Berechnung der Signalenergie $E_{vz,w}$ nach Gleichung (2.4) 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 (2.4) um diese Normierung⁹ sowie ein

⁶Cucuz (1992): Schwingungsempfinden

⁷Folgende Definition des Fourier-Integrals liegt zugrunde: $S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$

⁸Beim 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.

⁹ Der Faktor $\frac{\Delta\omega}{\omega_B}$ kann auch als Korrekturfaktor interpretiert werden.

Radizieren (zur Angleichung der Einheiten an das Eingangssignal $\hat{v}_{Z,W}$) führen zu folgender Gleichung zur Bestimmung des Kriteriums \mathcal{Y}_S :

$$\mathcal{Y}_S = \sqrt{\frac{\Delta\omega}{\omega_B} \sum_{i=m}^n |\hat{v}_{Z,W}|^2(\omega_i)} \quad (2.5)$$

2.2.2 Technische Realisierung

Die gesamte Signalverarbeitungskette zur Bestimmung des Kriteriums \mathcal{Y}_S nach Gleichung (2.5) ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Folgende Verarbeitungsschritte werden ausgeführt:

0. Messung der Radvertikalbeschleunigung $a_{Z,W}(t)$ 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*¹⁰ (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 $\Phi_{E,v_{Z,W}}(\omega)$ durch Quadrieren des Betrages der Radvertikalgeschwindigkeit $|\hat{v}_{Z,W}(\omega)|$
4. Bestimmung der Energie $E_{v_{Z,W}}$ durch Integration der Energiedichte $\Phi_{E,v_{Z,W}}(\omega)$ (näherungsweise durch Multiplikation von Frequenzauflösung $\Delta\omega$ und Summe der einzelnen Beträge der Energiedichte $\Phi_{E,v_{Z,W}}(\omega)$ in dem Frequenzband $\omega_m \dots \omega_n$)
5. Normierung auf die Bandbreite ω_B des ausgewählten Frequenzbereiches sowie Radizieren

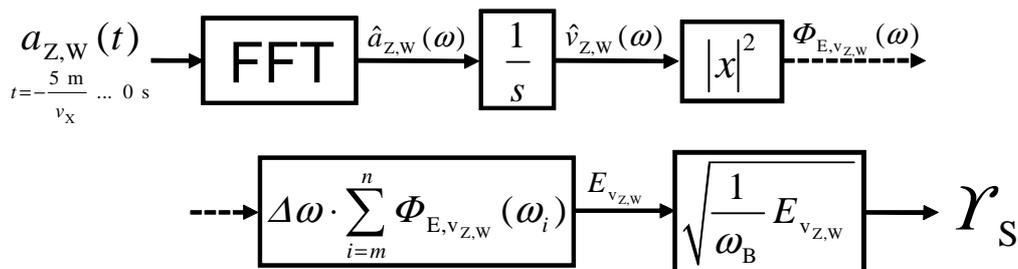


Abbildung 2.1: Signalverarbeitungskette zur Bestimmung des Kriteriums \mathcal{Y}_S

2.2.3 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 2.1 beschriebenen Einzelschadens. Die obere Grenze wird daher

¹⁰Da für die weiteren Schritte das wie im vorherigen Abschnitt definierte Fourier-Integral erforderlich ist, erfolgt eine FFT ohne Normierung auf die Länge des Messvektors.

als $L_{\max} = 2,5$ m definiert. 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 $L \geq 0,5$ m auftreten. Daher wird die untere Grenze auf $L_{\min} = 0,5$ m festgelegt. Aus den Wellenlängen L lassen sich nach Gleichung (2.3) die für die Bestimmung von γ_S erforderlichen Zeitkreisfrequenzen bestimmen.

2.3 Evaluierung

In Abschnitt 2.2 werden Anforderungen an ein Kriterium zur Erkennung von Einzelschäden aufgestellt. Daraus leiten sich folgende zu untersuchende Punkte ab:

- **Zuordnung von Warngeschwindigkeiten:** Neukum et al. und Wesp zeigen, dass von Probanden mehrheitlich als gefährlich eingestufte Fahrsituationen objektiv nicht gefährlich sind^{11,12}. Daher wird die subjektive Bewertung durch Probanden als Referenzmaß für die Gefährlichkeit eines Einzelschadens ausgewählt. Dabei wird angenommen, dass jedem Einzelschaden eine Warngeschwindigkeit v_{warn} zugeordnet werden kann. Diese ist die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X , ab der Motorradfahrer bei Zufahrt auf einen Einzelschaden eine Warnung wünschen.
- **Unabhängigkeit von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit:** Dies bedeutet, dass bei mehrfacher Überfahrt über einen Einzelschaden mit unterschiedlichen Fahrzeuglängsgeschwindigkeiten der ermittelte Wert des Kriteriums γ_S nur in einem noch zu definierenden Bereich schwankt.

Für eine Bewährung des Kriteriums γ_S als Maß für die Gefährlichkeit eines Einzelschadens ist es erforderlich, dass sich aus den Ergebnissen der beiden genannten Untersuchungspunkte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Kriterium γ_S und Warngeschwindigkeit v_{warn} ableitet.

2.3.1 Validierungsversuche¹³

2.3.1.1 Versuche zur Zuordnung von Warngeschwindigkeiten

Die Zuordnung von Warngeschwindigkeiten zu den Einzelschäden basiert auf der Durchführung einer Probandenstudie. In der Studie fahren 13 erfahrene Motorradfahrer mehrfach bei vorgegebener Zunahme der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X über die in Abbildung 2.2 dargestellten 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.

2.3.1.2 Versuche zur Analyse der Abhängigkeit von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit

Die Versuche zur Analyse der Abhängigkeit des Kriteriums γ_S von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X basieren ebenfalls auf den bereits beschriebenen Einzelschäden. Das Versuchskonzept sieht

¹¹Neukum et al. (2007): Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Störfall, S. 111

¹²Wesp (2011): Bewertung eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 87 ff.

¹³Das Versuchskonzept wird kurz beschrieben. Details befinden sich in anderen Veröffentlichungen der Autoren, z. B. Latke et al. (2011): A New Cooperative Driver Assistance System for Motorcycles

eine dreimalige Überfahrt vor, wobei die Fahrzeuglängsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Einzelschäden im Bereich von $v_X = 10$ km/h bis $v_X = 70$ km/h variiert werden.

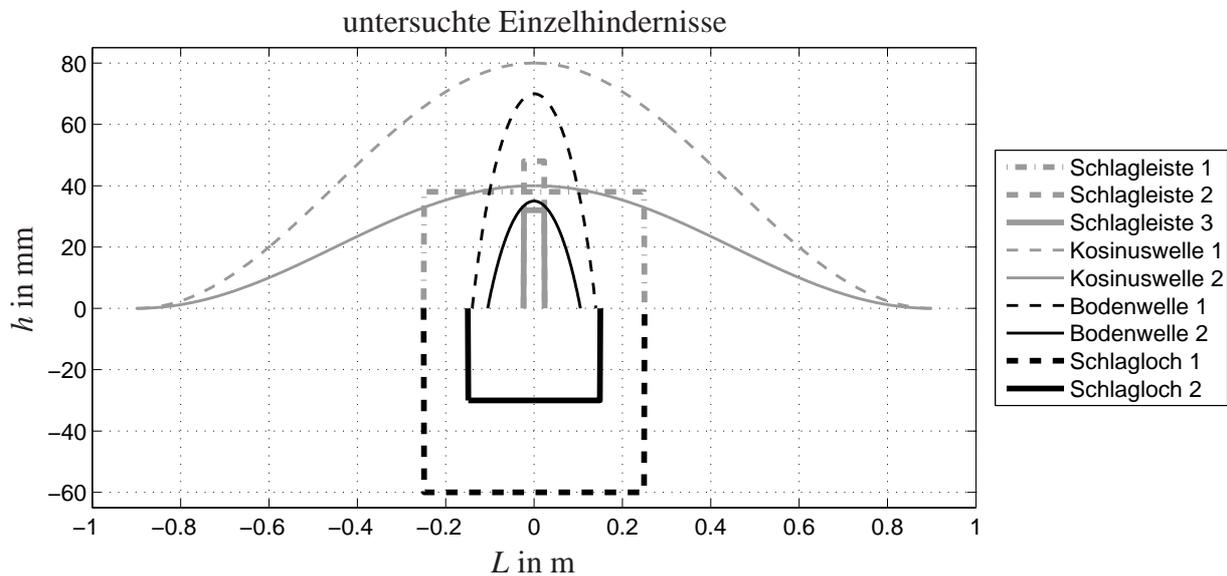


Abbildung 2.2: Einzelhindernisse zur Abbildung von Einzelschäden

2.3.2 Ergebnisse

2.3.2.1 Zuordnung von Warngeschwindigkeiten

In Abbildung 2.3 sind die kumulierten relativen Häufigkeiten der von den Probanden gewünschten Warngeschwindigkeiten¹⁴ bei Überfahrt über die genannten 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).

Werden ausschließlich die Mediane \tilde{v}_{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 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%).

2.3.2.2 Abhängigkeit von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit

Abbildung 2.4 zeigt die ermittelten Werte des Kriteriums γ_S bei Variation der Überfahrgeschwindigkeiten v_X . Dargestellt sind die gemessenen Geschwindigkeiten. Für jeden Einzelschaden zusätzlich abgebildet sind die als „Ausgleichsgerade“ dargestellten Mittelwerte.

¹⁴Dargestellt sind die gemessenen Überfahrgeschwindigkeiten und nicht die Geschwindigkeitsvorgaben.

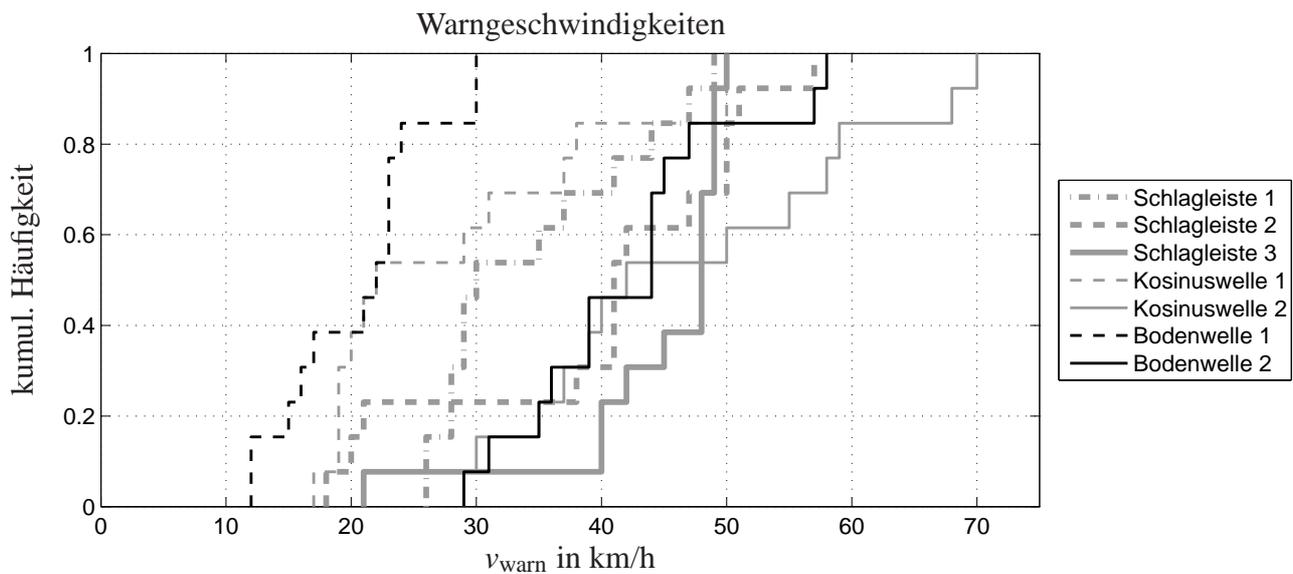


Abbildung 2.3: Kumulierte relative Häufigkeit der von Probanden gewünschten Warngeschwindigkeiten bei Überfahrt über Einzelschäden

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 (*Schlagleiste 3*) und 24,4% nach oben (*Kosinuswelle 2*).

Lineare Regressionsanalysen führen zu (korrigierten) Bestimmtheitsmaßen von $R_{\text{kor}}^2 \leq 0,15$. Die mit einem F-Test ermittelten p-Werte unterschreiten bei keinem der untersuchten Einzelschäden ein Signifikanzniveau von 5%. Ein linearer Einfluss der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X auf das Kriterium γ_S wird daher nicht angenommen.

Bei der quadratischen Regression unterschreiten die ermittelten p-Werte nur für die *Kosinuswelle 1* und die *Bodenwelle 2* ein Signifikanzniveau von 5%. Abgesehen von diesen Einzelschäden beträgt das (korrigierte) Bestimmtheitsmaß maximal $R_{\text{kor}}^2 = 0,23$. Daher wird angenommen, dass ein quadratischer Einfluss der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X auf das Kriterium γ_S nicht berücksichtigt werden muss.

2.3.2.3 Zusammenhang von Warngeschwindigkeit v_{warn} und Kriterium γ_S

In Abbildung 2.5 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 $1/\gamma_S$ dargestellt.

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

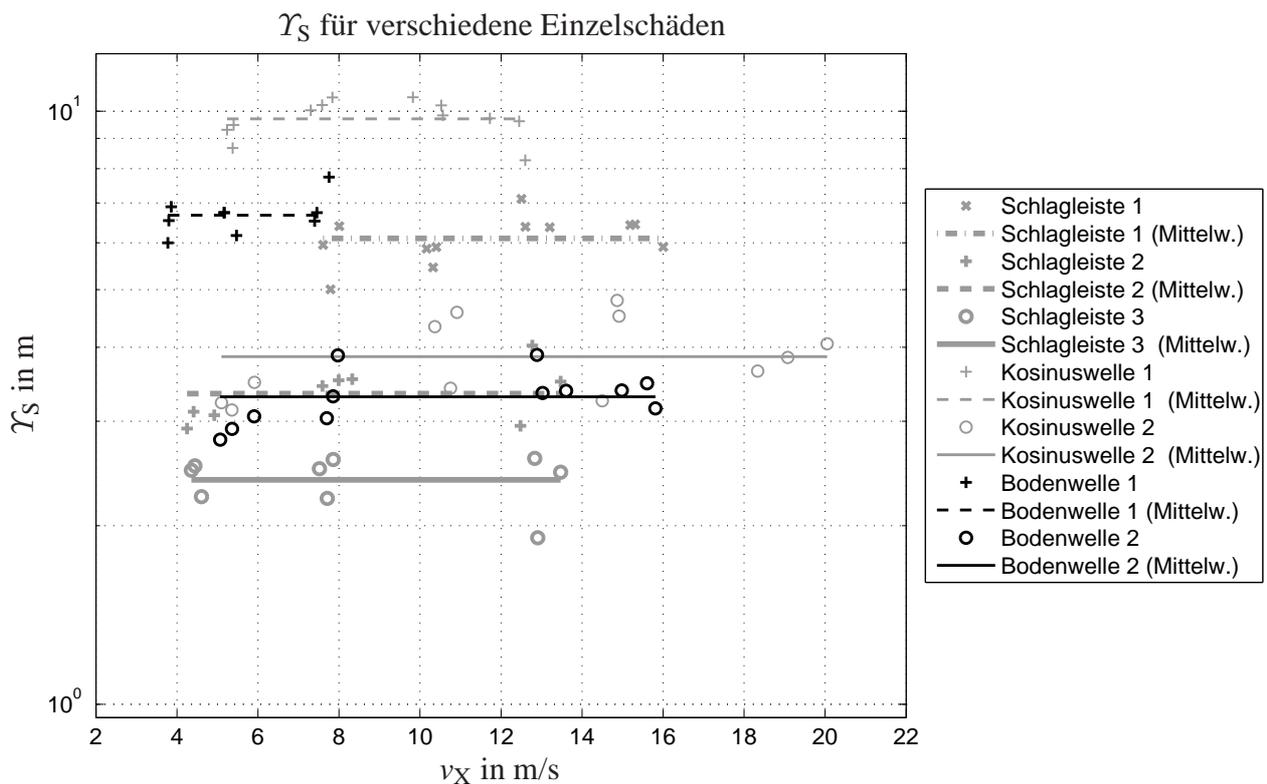


Abbildung 2.4: Ermittelte (Mittel-) Werte des Kriteriums γ_S für verschiedene Überfahrsgeschwindigkeiten und Einzelschäden

Der Verlauf deutet auf eine reziproke Abhängigkeit des Quadrates der Warngeschwindigkeit v_{warn}^2 vom Kriterium γ_S hin. Diese Abhängigkeit lässt sich durch folgende Gleichung einer Ausgleichsgeraden ($R_{\text{kor}}^2 = 0,91$), die ebenfalls in Abbildung 2.5 dargestellt ist, beschreiben:

$$v_{\text{warn}}^2 = 444 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{\gamma_S} \quad (2.6)$$

2.3.2.4 Falscherkennungen

Zur Überprüfung des Auftretens von Falscherkennungen wird die von Präckel beschriebene Strecke¹⁵ 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 $\gamma_S = 0,95$ m. Dies entspricht nach Gleichung (2.6) einer Warngeschwindigkeit von $v_{\text{warn}} = 21,6 \text{ m/s} = 77,8 \text{ km/h}$.

¹⁵Präckel (1999): Die Motorradbremsung, S. 56 ff.

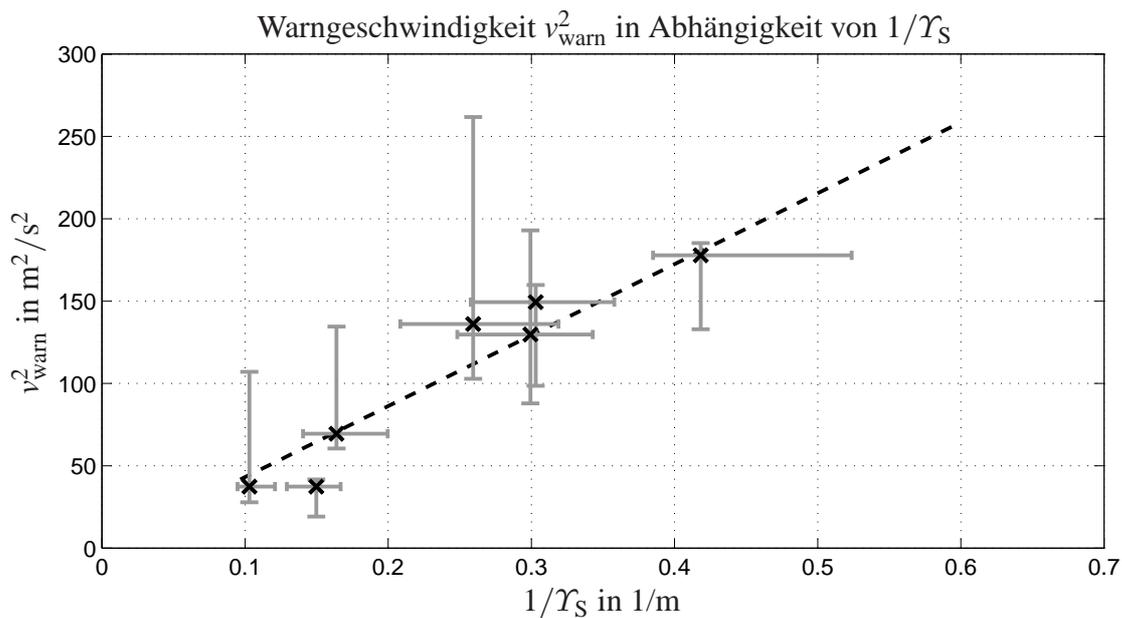


Abbildung 2.5: Quadrat der Warngeschwindigkeit v_{warn}^2 in Abhängigkeit des Kriterium-Kehrwertes $1/\gamma_S$

2.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Mit den durchgeführten Versuche ist weder eine lineare noch eine quadratische Abhängigkeit des Kriteriums $\tilde{\gamma}_S$ von der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v_X nachweisbar. Daher wird angenommen, dass für jeden Einzelschaden der Mittelwert des Kriteriums $\tilde{\gamma}_S$ 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 γ_S ohne Kenntnis von Länge, Höhe oder Form ermittelbar.

Gleichung (2.6) beschreibt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Kriterium γ_S und der Gefährlichkeit eines erhabenen Einzelschadens, ausgedrückt durch eine von Motorradfahrern gewünschte Warngeschwindigkeit v_{warn} . Damit sind alle in Abschnitt 2.2 definierten Anforderungen erfüllt. **Das Kriterium γ_S hat sich als Maß für die Gefährlichkeit eines Einzelschadens bewährt.** Der niedrigste bei einem erhabenen Einzelschaden ermittelte Wert des Kriteriums γ_S beträgt $1,9\text{ m}^{16}$ (Schlagleiste 3). An Stellen ohne Einzelschäden wird maximal ein Wert von $\gamma_S = 0,95\text{ m}$ ermittelt. Unter der Annahme eines Wertes von $\gamma_S = 1,9\text{ m}$ als untere Erkennungsschwelle für einen Einzelschaden treten bei den durchgeführten Versuchen weder Fehl- noch Falscherkennungen auf.

Das Kriterium γ_S 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 Warngeschwindigkeit v_{warn} ist nicht möglich. Die Auswahl der untersuchten Einzelschäden erfolgte so, dass ein auf deutschen Straßen „typischer“ Bereich von Schlaglöchern abgedeckt wird. Dies deutet darauf hin, dass eine Warnung vor diesen Einzelschäden nicht akzeptiert wird oder nicht erforderlich ist.

¹⁶Der Mittelwert $\tilde{\gamma}_S$ über alle durchgeführten Versuche beträgt $2,4\text{ m}$.

3 Ausweichmanöver

3.1 Erkennung von Ausweichmanövern

3.1.1 Definition eines Mustermanövers

Basierend auf den Ergebnissen von Untersuchungen zu (Motorrad-) Ausweichmanövern werden folgende Merkmale eines „typischen“ Motorrad-Ausweichmanövers definiert^{1,2,3,4,5}:

- 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 s⁶.
- Die horizontierte Querbeschleunigung beträgt mindestens 3,0 m/s².
- Der Betrag der Rollratenamplitude liegt im Bereich von $\dot{\lambda}_0 \geq 40$ °/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:

$$\dot{\lambda}(t) = \dot{\lambda}_0 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (3.1)$$

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

$$w_{Ty}(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } \left| t - \frac{T_{Ty}}{2} \right| \leq p \cdot \frac{T_{Ty}}{2}, \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left[\pi \frac{t - (1+p) \frac{T_{Ty}}{2}}{(1-p) \frac{T_{Ty}}{2}} \right] \right) & \text{für } p \cdot \frac{T_{Ty}}{2} \leq \left| t - \frac{T_{Ty}}{2} \right| \leq \frac{T_{Ty}}{2}, \\ 0 & \text{sonstige} \end{cases} \quad (3.2)$$

¹Rauscher (2007): Ausweichen von einspurigen Fahrzeugen, S. 59

²Burg et al. (2007): Unfälle mit Zweirädern, S. 397 f.

³Cossalter (2006): Motorcycle Dynamics, S. 324 ff.

⁴Spiegel (2006): Die obere Hälfte des Motorrads, S. 45

⁵Hohm (2010): Überholassistenzen, S. 88

⁶Eine Rückkehr zur ursprünglich geplanten Fahrspur ist in angegebener Zeit nicht berücksichtigt.

Die durch die Gleichungen (3.1) und (3.2) beschriebenen Teilfunktionen des Mustermanövers („Sinus“, „Fenster“) sind in Abbildung 3.1 (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:

$$\dot{\lambda}_{\text{Muster}}(t) = w_{\text{Ty}}(t) \cdot \dot{\lambda}_0 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (3.3)$$

Abbildung 3.1 (rechts) zeigt den Verlauf der durch Gleichung (3.3) beschriebenen Rollrate $\dot{\lambda}_{\text{Muster}}$. Zusätzlich ist das Integral der Musterfunktion, d. h. der Rollwinkel λ_{Muster} , dargestellt.

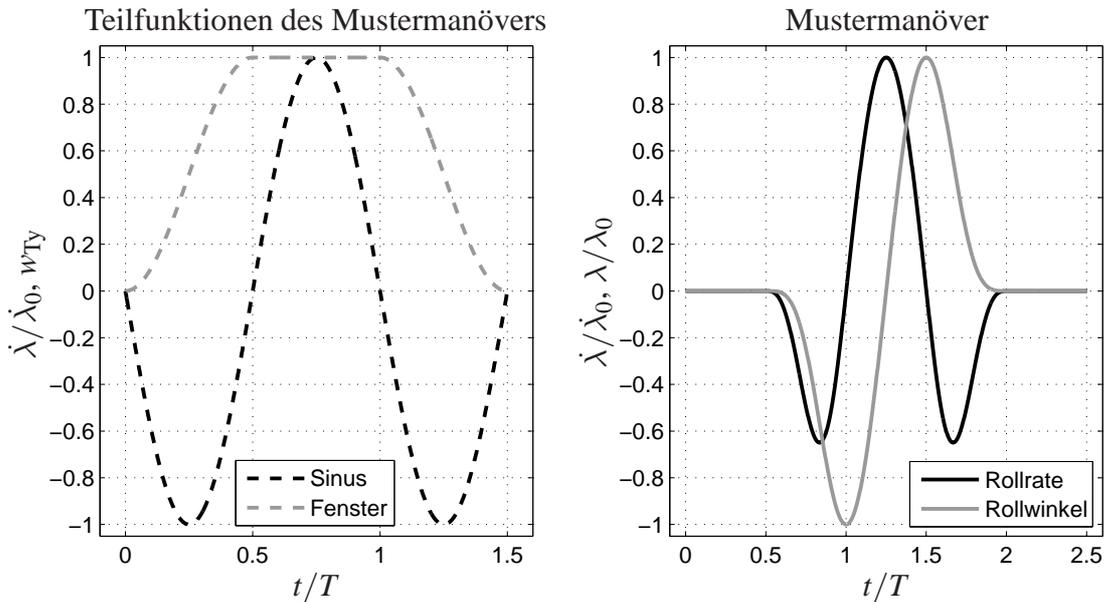


Abbildung 3.1: links: Teilfunktionen des Mustermanövers („Sinus“, „Fenster“), rechts: Musterfunktion (Rollrate) und Integral der Musterfunktion (Rollwinkel), jeweils amplitudennormiert

3.1.2 Bestimmung eines Korrelationskoeffizienten

Der Korrelationskoeffizient ist nach Ohm ein Maß für Ähnlichkeit zweier Signalverläufe⁷. 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:

$$c^* = \frac{(\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}}\dot{\lambda}_{\text{Mess}}}(\tau))^2}{\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}}\dot{\lambda}_{\text{Muster}}}(\tau) \cdot \Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Mess}}\dot{\lambda}_{\text{Mess}}}(\tau)} \quad (3.4)$$

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

⁷Ohm et al. (2010): Signalübertragung, S. 206

3.1.3 Herleitung eines Kriteriums zur Erkennung von Ausweichmanövern

Der Korrelationskoeffizient nach Gleichung (3.4) ist ein Maß für die Ähnlichkeit der Signale Rollrate des Mustermanövers $\dot{\lambda}_{\text{Muster}}$ und Rollrate einer Messung $\dot{\lambda}_{\text{Mess}}$. Demnach gibt dieser den Grad der Ähnlichkeit von tatsächlichem Manöver und Muster (bezüglich der beiden genannten Signale) an. Nach Gleichung (3.4) 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:

$$c_{\text{RR}} = \frac{(\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}}\dot{\lambda}_{\text{Mess}}})^2}{\max(\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}}\dot{\lambda}_{\text{Muster}}}, \Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Mess}}\dot{\lambda}_{\text{Mess}}}) \cdot \Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}}\dot{\lambda}_{\text{Muster}}}} \quad (3.5)$$

Im Unterschied zu Gleichung (3.4) erfolgt mindestens eine Division durch den Korrelationswert des Mustermanövers $\Psi_{\dot{\lambda}_{\text{Muster}}\dot{\lambda}_{\text{Muster}}}$. Dadurch werden „große“ Werte bei „ähnlichen“ Manövern mit „kleinen“ Amplituden vermieden. Analog zu Gleichung (3.5) lässt sich durch einen Vergleich des basierend auf Messdaten geschätztem Rollwinkels λ_{Mess} und des integrierten Verlaufes der Musterfunktion (Musterrollwinkel λ_{Muster}) folgender zweiter Korrelationsfaktor c_{RW} bestimmen:

$$c_{\text{RW}} = \frac{(\Psi_{\lambda_{\text{Muster}}\lambda_{\text{Mess}}})^2}{\max(\Psi_{\lambda_{\text{Muster}}\lambda_{\text{Muster}}}, \Psi_{\lambda_{\text{Mess}}\lambda_{\text{Mess}}}) \cdot \Psi_{\lambda_{\text{Muster}}\lambda_{\text{Muster}}}} \quad (3.6)$$

Für eine Verwendung der beiden Korrelationsfaktoren als Erkennungskriterium für Ausweichmanöver ist erforderlich, dass sich die bei realen Ausweichmanövern ermittelten (Maximal-) Werte der Faktoren 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:

$$(c_{\text{RR}} \geq c_{\text{RR,grenz}}) \cap (c_{\text{RW}} \geq c_{\text{RW,grenz}}) \rightarrow \text{Ausweichen} \quad (3.7)$$

3.2 Beispiele für Mustermanöver

Abbildung 3.2 zeigt zwei Beispiele für Mustermanöver nach Gleichung (3.3), deren Parameter im Bereich eines „typischen“ Ausweichmanövers (Definition siehe Abschnitt 3.1) liegen. Für die Parameter Amplitude $\dot{\lambda}_0$ und Periodendauer T gilt⁸:

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

⁸Bei der Auswahl der Parameter ist eine Rückkehr zur ursprünglich geplanten Fahrspur berücksichtigt.

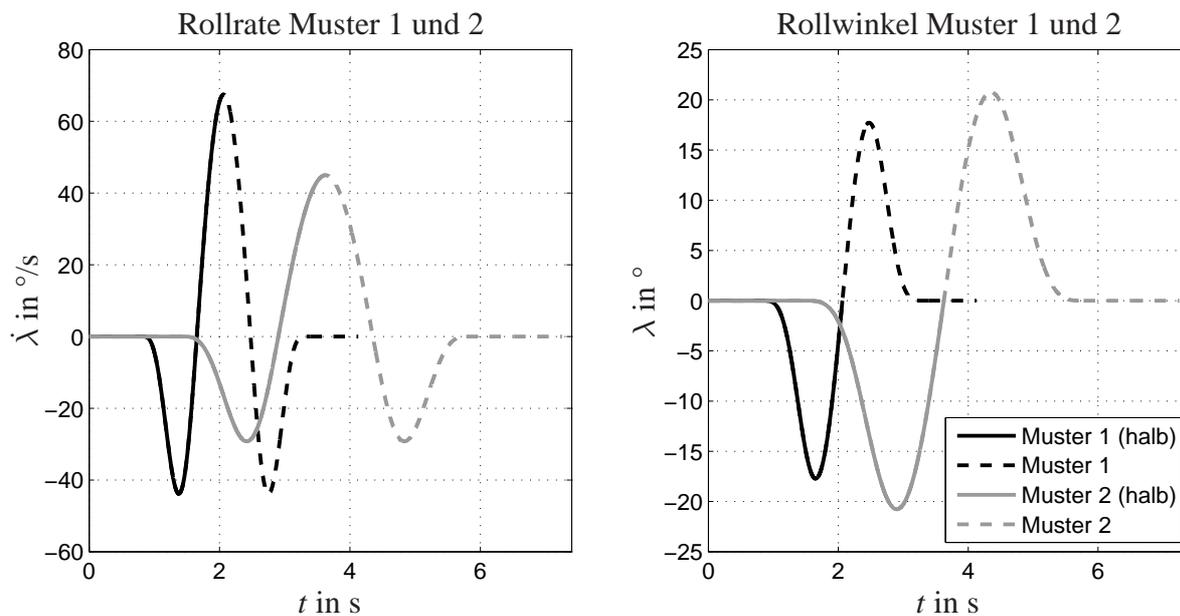


Abbildung 3.2: Beispiele für zwei ganze und zwei halbe Mustermanöver

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 3.2 dargestellt.

3.3 Evaluierung

3.3.1 Validierungsversuche

Für eine Bewährung als Kriterium zur Erkennung von Ausweichmanövern ist erforderlich, dass das durch Gleichung (3.7) 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.

3.3.1.1 Ausweichmanöver

Um ein möglichst großes Spektrum von realen Ausweichmanövern im Fahrversuch abzubilden, werden nachfolgende Größen in 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). Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Die Abstände s_1 und s_2 werden nach Rauscher⁹ bestimmt.

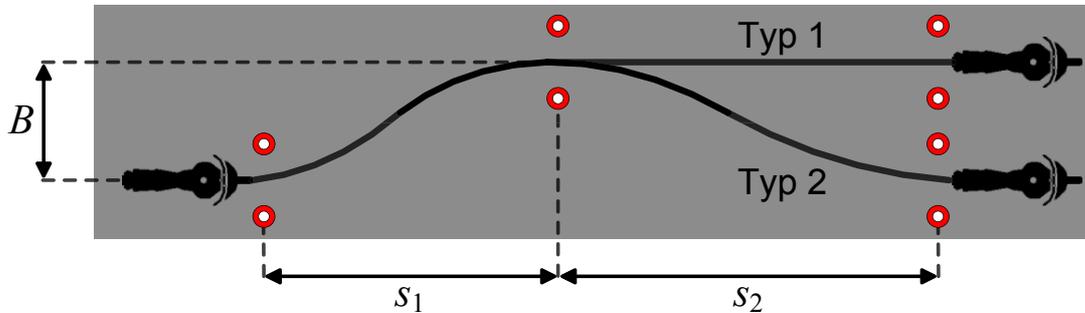


Abbildung 3.3: Versuchsaufbau zur Durchführung von Ausweichmanövern

3.3.1.2 Sonstige Manöver

Zur Überprüfung auf Falscherkennungen werden „fahrtdynamisch ähnliche“ Manöver durchgeführt. Als „fahrtdynamisch 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 aufgelistet:

- Befahren einer 90°-Kurve mit Radien von $R_K = 20$ m und $R_K = 40$ m (Versuch-Nr. 181 bis Versuch-Nr. 208)
- Überholmanöver nach Folgefahrt mit $v_X = 20 \dots 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ (Versuch-Nr. 209 bis Versuch-Nr. 218)
- Überholmanöver nach Folgefahrt mit vorherigem Wedeln mit $v_X = 20 \dots 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ (Versuch-Nr. 219 bis Versuch-Nr. 228)
- Freies Überholmanöver ohne vorherige Folgefahrt mit $v_X = 20 \dots 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ (Versuch-Nr. 229 bis Versuch-Nr. 238)
- Slalom mit jeweils 5 bis 7 Schwüngen bei Pylonenabständen von 7 m bis 14 m (Versuch-Nr. 239 bis Versuch-Nr. 254)
- „VDA-Spurwechseltest“ mit Geschwindigkeiten von $v_X = 40 \dots 60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ (Versuch-Nr. 255 bis Versuch-Nr. 260)
- 180°-Durchfahrt eines Kreisverkehrs mit einem Radius von $R_K = 9$ m (Versuch-Nr. 260 bis Versuch-Nr. 264)

⁹Rauscher (2007): Ausweichen von einspurigen Fahrzeugen, S. 59

3.3.2 Ergebnisse

3.3.2.1 Vergleich der Muster mit realen Messdaten

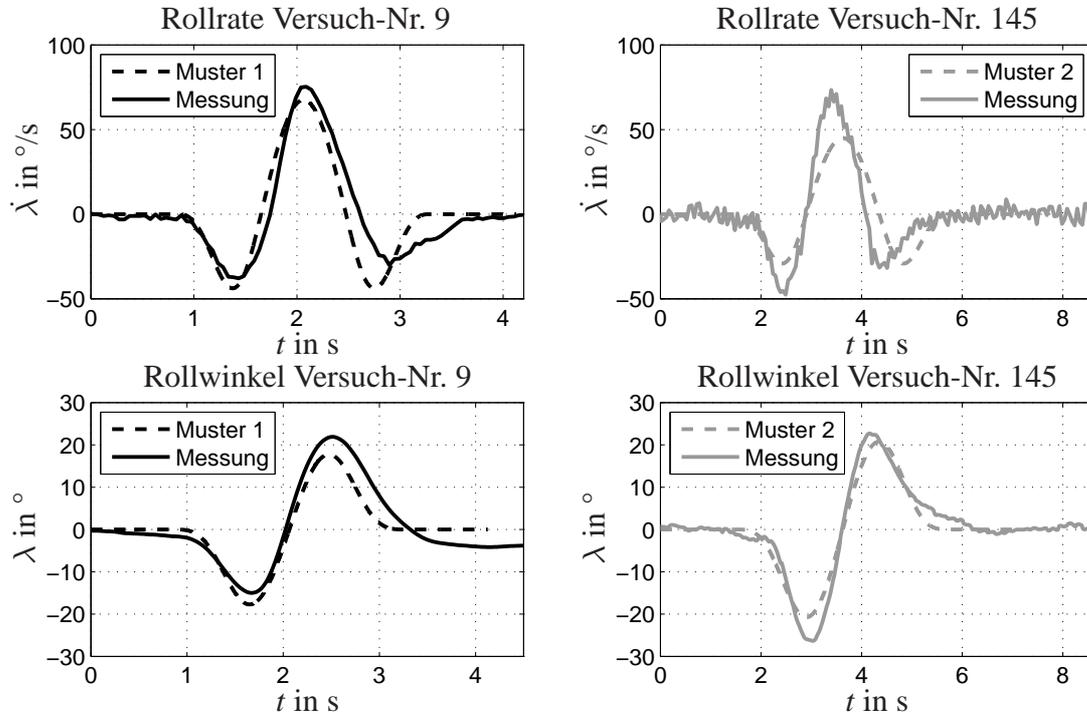


Abbildung 3.4: Muster 1 im Vergleich zu den Messdaten von Versuch-Nr. 9 und Muster 2 im Vergleich zu den Messdaten von Versuch-Nr. 145

Abbildung 3.4 zeigt beispielhaft die Messgrößenverläufe von Versuch-Nr. 9¹⁰ und Versuch-Nr. 145¹¹ im Vergleich zu den in Abschnitt 3.2 definierten Musterverläufen (Muster 1 und 2). Die darauf basierend nach den Gleichungen (3.5) und (3.6) bestimmten Maximalwerte¹² der Korrelationsfaktoren $c_{RR,max}$ (Rollrate) bzw. $c_{RW,max}$ (Rollwinkel) betragen für Versuch-Nr. 9 bei einer Korrelation mit den halben Verläufen¹³ von Muster 1:

$$c_{RR,1h,max} = 0,87 \quad (3.8)$$

$$c_{RW,1h,max} = 0,98 \quad (3.9)$$

Gleichermaßen ergeben sich für Versuch-Nr. 145 bei einer Korrelation mit Muster 2 folgende Korrelationsfaktoren: $c_{RR,2h,max} = 0,93$, $c_{RW,2h,max} = 0,98$. Aus der Bestimmung der Korrelationsfaktoren

¹⁰ $a_Y = 8 \frac{m}{s^2}$, $B = 2 \text{ m}$, Typ I, $v_X = 30 \frac{km}{h}$

¹¹ $a_Y = 3 \frac{m}{s^2}$, $B = 5 \text{ m}$, Typ I, $v_X = 30 \frac{km}{h}$

¹²Da die Korrelationsfaktoren kontinuierlich bestimmt werden, ist der Maximalwert entscheidend.

¹³Für einen Vergleich mit ganzen Mustern siehe spätere Veröffentlichungen der Autoren.

für alle durchgeführten Ausweichmanöver resultieren die in Gleichung (3.7) enthaltenen Grenzwerte $c_{RR,grenz}$ und $c_{RW,grenz}$. Deren Ermittlung wird in den nächsten Abschnitten beschrieben.

3.3.2.2 Grenzwertbestimmung

In Abbildung 3.5 (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 des (halben) Musters 1 dargestellt. Abbildung 3.5 (rechts) zeigt dies für die Ausweichmanöver mit einem Versatz von $B = 4 \text{ m} \dots 5 \text{ m}$ unter Verwendung von Muster 2.

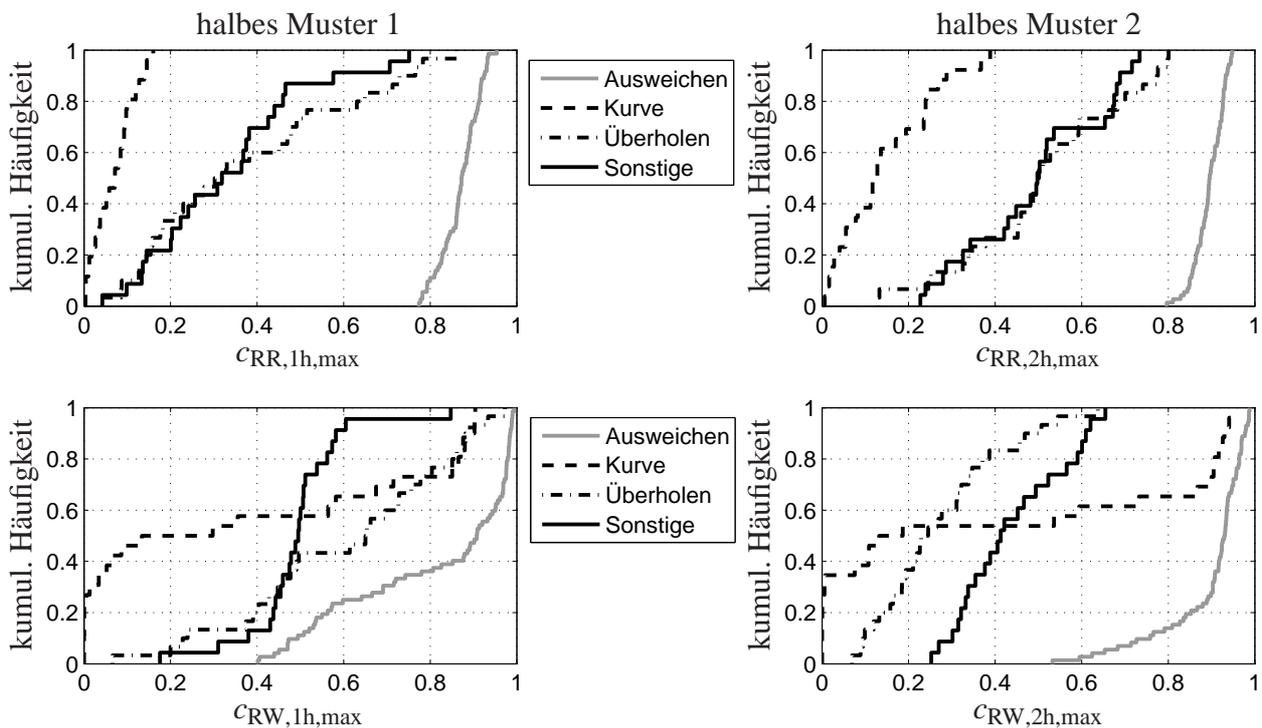


Abbildung 3.5: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Maximalwerte der Korrelationsfaktoren $c_{RR,1h,max}$ (Rollrate, halbes Muster 1), $c_{RR,2h,max}$ (Rollrate, halbes Muster 2), $c_{RW,1h,max}$ (Rollwinkel, halbes Muster 1) und $c_{RW,2h,max}$ (Rollwinkel, halbes Muster 2)

Das Kriteriums zur Erkennung von Ausweichmanövern ist nach Gleichung (3.7) wie folgt definiert:

$$(c_{RR} \geq c_{RR,grenz}) \cap (c_{RW} \geq c_{RW,grenz}) \rightarrow \text{Ausweichen} \quad (3.10)$$

Die mindestens aufgetretenen Maximalwerte der Korrelationsfaktoren (siehe Abbildung 3.5) führen zu den in Tabelle 3.1 aufgeführten Grenzwerten $c_{RR,grenz}$ und $c_{RW,grenz}$, die für eine Anwendung von Gleichung (3.10) mit den halben Mustern 1 und 2 erforderlich sind.

	halbes Muster 1	halbes Muster 2
$c_{RR,grenz}$	0,77	0,80
$c_{RW,grenz}$	0,40	0,53

Tabelle 3.1: Grenzwerte $c_{RR,grenz}$ und $c_{RW,grenz}$ unter Verwendung halber Muster

3.3.3 Ergebnisauswertung

Nachfolgende Ergebnisse basieren auf folgenden Definitionen:

- Eine Manövererkennung gilt für die Untersuchung mit halben Mustern als *True Positive (TP)*, wenn bei einem Ausweichmanöver (Versuch-Nr. 1 bis 180) die durch Gleichung (3.10) definierte Bedingung für mindestens ein Muster unter Verwendung der Grenzwerte nach Tabelle 3.1 erfüllt ist.
- 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 halben Mustern während eines Ausweichmanövers die Bedingung nach Gleichung (3.10) unter Verwendung der Grenzwerte nach Tabelle 3.1 für kein Muster erfüllt, so wird dies als Fehlerkennung bzw. *False Negative (FN)* gewertet.
- Ist die Bedingung, wie oben genannt, während eines sonstigen Manövers für kein Muster erfüllt, so ist dies ein *True Negative (TN)*.

3.3.3.1 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 bedingt durch die entsprechende Auswahl der Grenzwerte nicht zu beobachten. Falscherkennungen bzw. FPs treten bei den Versuchen Nr. 222 und Nr. 226 auf, die alle aus der Kategorie „Überholmanöver nach Folgefahrt mit vorherigem Wedeln“ kommen. Die ermittelten Korrelationsfaktoren sind in Tabelle 3.2 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.

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

Tabelle 3.2: Bei Falscherkennungen ermittelte Korrelationsfaktoren unter Verwendung halber Muster (Überschreitungen beider Grenzwerte grau hervorgehoben)

3.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Nach den Ergebnissen aus Abschnitt 3.3.3.1 gibt es keine FNs. 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 (3.7) beschriebenen Kriterium allerdings zu FPs. Mit insgesamt zwei FPs ist die Anzahl der Fehler gering.

Alle FPs entstehen bei Fahrversuchen der Kategorie „Überholmanöver nach Folgefahrt mit vorherigem Wedeln“. Werden diese Manöver vernachlässigt, so **bewährt sich das Kriterium zur Erkennung von Ausweichmanövern**. Eine Vernachlässigung ist dann gerechtfertigt, wenn solche Manöver im realen Verkehr „selten“ auftreten und 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 Fahrzeuginnenbeschleunigung 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.

4 Fazit und Ausblick

Ausgehend von der Identifikation relevanter Gefahrstellen wurden basierend auf Fahrdynamikuntersuchungen Kriterien zur Erkennung dieser abgeleitet und validiert. Dabei wurde die gesamte Kette der Gefahrstellenerkennung entwickelt. Die Kriterien haben sich in Versuchen bewährt und ermöglichen die Erkennung bzw. Bewertung von einzelnen Fahrbahnschäden und Ausweichmanövern. Die vorliegende Arbeit gibt somit Antworten auf die Abschnitt 1.4 gestellten Fragestellungen.

Wesentlich für die spätere Realisierung kommunikationsbasierter Fahrerassistenzsysteme in Serienfahrzeugen sind Konzepte für die Markteinführung. Das Gruppenfahrverhalten von Motorradfahrern 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“.

Literaturverzeichnis

BMW (2009): BMW Motorrad ConnectedRide

Bayerische Motoren Werke AG: *BMW: ConnectedRide, 2009*. Pressemitteilung von Honda Motor Co., Ltd. am 25. Juni 2009, 2009

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

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

Hohm (2010): Überholassistentensystem

Hohm, A.: *Umfeldklassifikation und Identifikation von Überholzielen für ein Überholassistentensystem*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 727, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2010

Lattke et al. (2011): A New Cooperative Driver Assistance System for Motorcycles

Lattke, B.; Hanßmann, D.; Müller, T.; Winner, H.; Eberlein, R.; Hoffman, R.: *Basic Science for a New Cooperative Driver Assistance System for Motorcycles (MoLife)*. Proceedings of the First International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident, Tokyo, 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

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
- Naab (2009): simTD - Beschreibung der C2X-Funktionen
Naab, K.: *Deliverable D11.1 - Beschreibung der C2X-Funktionen*. simTD Konsortium, 2009
- 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
- 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
- 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
- Roadconsult (2011): Straßenzustand - Schadenbilder
Roadconsult AG: *Straßenzustand - Schadenbilder*. Internetquelle:
<http://www.roadconsult.ch/schadenbilder.html>, Zugriff: 21.09.2011, 2011
- SNV (2003): Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen
Schweizerische Normen-Vereinigung: *Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF)*. Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 2003
- Spiegel (2006): Die obere Hälfte des Motorrads
Spiegel, B.: *Die obere Hälfte des Motorrads - Über die Einheit von Fahrer und Maschine*. Motorbuchverlag, Stuttgart, 2006
- 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
- 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