
Entwicklung eines Modells zur kurvenabhängigen Trajektorienprädiktion von Motorradfahrern

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

Dissertation

vorgelegt von

Florian Felix Scherer, M.Sc.
aus München

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Steven Peters
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Tag der Einreichung: 17.01.2024
Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.2024

Darmstadt 2024

D 17

Scherer, Florian: Entwicklung eines Modells zur kurvenabhängigen Trajektorienprädiktion von Motorradfahrern

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf Tuprints: 2024

Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.2024

Dieses Dokument wird bereitgestellt von TUprints – Publikationsservice der TU Darmstadt.

<https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/>

Bitte verweisen Sie auf:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-270318

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/27031>

Lizenz: CC BY-NC-ND 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt sowie meiner Teilzeitbeschäftigung als Chief Research Officer bei der Firma RideLink. Die Inhalte der Dissertation wurden im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte, unter anderem durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast) finanziert, erarbeitet. Zudem wurde sie in vollem Maße durch die Firma RideLink unterstützt, ein Teil dieser Arbeit ist in durch RideLink finanzierter Arbeitszeit entstanden.

Ein besonderer Dank geht an beide mich während meiner Zeit bei FZD betreuenden Professoren, Prof. Dr.-Ing. Steven Peters und Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner. Die durch den Wechsel der Betreuung erlebten verschiedenen Sichtweisen der Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen, die großen Freiräume in der wissenschaftlichen Entwicklung und das Vertrauen in meine Person haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Darüber hinaus hat der fachliche Austausch, das stets positiv kritische Hinterfragen des eingeschlagenen Weges und die enorme Selbstbestimmtheit der Arbeitsplanung und -Durchführung meinen beruflichen Werdegang entscheidend geprägt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop, Leiter des Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik (LKT) der Technischen Universität Dresden, danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats und die persönliche Einladung zur Präsentation meiner Forschungsergebnisse im Rahmen des VDI/LKT-Kolloquiums.

Bei der Firma RideLink, insbesondere Stephan Kaufmann möchte ich mich für die Unterstützung durch das Schaffen von Freiräumen, die Bereitstellung der Messtechnik und die moralische Unterstützung bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, einschließlich der Werkstatt und dem Sekretariat. Die Zeit bei FZD hat nicht nur in meinem Leben neue Freundschaften und Beziehungen fest verankert, sondern auch beim Rest meiner Familie.

Ganz besonders danken möchte ich meinen Eltern Thomas und Heike die mich während meiner gesamten universitären Laufbahn stets unterstützt haben. Angefangen von der Studienplatzwahl, die räumliche Entfernung bedeutete, über Zeiten des Zweifels, bis heute.

Meiner Frau Marion und meinem im Zuge der Familienerweiterung während der Zeit bei FZD hinzugekommenen Sohn Felix (und Mr. X im Bauch) danke ich von Herzen für Eure Liebe, das unendliche Verständnis und die seelische Unterstützung der letzten Jahre. Der Glaube von Marion, all meiner Freunde und der Familie an mich war stets die Motivation nicht aufzugeben und am Ende die Welt ein Stück besser machen zu können.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungen	V
Formelzeichen und Indizes	VI
Abbildungen und Tabellen	IX
Kurzzusammenfassung	XIV
Abstract	XV
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Forschungsfragen.....	4
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen	7
2.1 Koordinatensysteme	7
2.2 Fahrdynamik Motorradkurvenfahrt	9
2.3 Motorrad-Fahrdynamikmodellierung	13
2.4 Motorradunfallkurven.....	19
3 Stand der Forschung	22
3.1 Segmentierung und Klassifizierung der Motorradkurvenfahrt.....	22
3.1.1 Segmentierung in Kurvenfahrt und Geradeausfahrt.....	23
3.1.2 Segmentierung einer Kurvenfahrt in Manöverprimitive	24
3.1.3 Klassifizierung von Kurvenfahrten anhand der Kurvigkeit	25
3.2 Fahrerspezifität	27
3.2.1 Selbsteinschätzung des Fahrertyps	28
3.2.2 Fahrerspezifität anhand der Quer- und Längsbeschleunigung	30
3.2.3 Statistische Einteilung in Fahrfertigkeitsniveaus	32
3.3 Motorrad-Trajektorienprädiktion	34
3.3.1 Tajektorienprädiktion mit Machine Learning.....	34
3.3.2 Trajektorienprädiktion mittels Regelabweichung	36
3.4 Durchfahrbarkeit einer Kurve.....	38
3.5 Zielsetzung der Dissertation	40
4 Methodik und Datenerhebung	42
4.1 Herleitung der Systemgrenzen.....	43
4.2 Messkonzepte	49

4.2.1	Für Datenerhebung genutzte Messtechnik.....	50
4.2.2	Methodik zur Bewertung der Güte der Positionsmessung.....	52
4.3	Datenerhebung	55
4.3.1	Definition der Bewertungskurve.....	55
4.3.2	Versuchsgelände Studie	58
4.3.3	Definition eines Anomalie-Ereignisses.....	61
4.3.4	Probandenauswahl für Teststrecken- und Straßenverkehrs-Untersuchung	63
4.3.5	Zusammenfassung der Datenerhebung und Messkampagnen	65
4.4	Datenvorverarbeitung.....	66
4.4.1	Segmentierung in Kurvensegmente	66
4.4.2	Metrik zur Eingliederung und Auswahl geeigneter Kurvensegment.....	70
4.4.3	Normierung der Kurvensegmente.....	73
5	Modellbildung	79
5.1	Allgemeiner Ansatz der Modellbildung	80
5.2	Modellanforderungen aus Schwellwertuntersuchungen	81
5.3	Modellanforderungen aus der Wiederholbarkeit.....	85
5.4	Auswahl mathematischer Ansatzfunktionen	95
5.5	Positionsschätzung	102
5.6	Interpretierbare Zusatzgrößen aus Modell	110
5.7	Modellgrenzen.....	113
6	Verifikation und Validierung	115
6.1	Verifikationsansatz mittels Parameteranalyse	116
6.1.1	Instationäre Kurvenfahrt - Parameteranalyse	117
6.1.2	Stationäre Kurvenfahrt.....	128
6.1.3	Übertragbarkeit in Straßenverkehr.....	134
6.2	Validierungsansatz der Trajektorienprädiktion.....	143
6.3	Zusammenfassung der Verifikation und Validierung	150
7	Ausblick und Diskussion	152
7.1	Prototypische Erprobung im Straßenverkehr	152
7.2	Diskussion	156
8	Zusammenfassung	159
A	Anhang.....	162
A.1	Honda NC 700.....	162
A.2	Kurven Bewertungsmetrik	163
A.2.1	Tabelle Übersicht der Kurvenparameter der Validierungsstrecke.....	163
A.2.2	Herleitung des Grenzwerts für Dynamik Bewertung.....	164
A.3	Reifenkräfte aus Korrekturfaktoren	165
A.3.1	Kurvenfahrt ohne Längsdynamik	165

A.3.2 Kurvenfahrt mit Längsdynamik	171
A.4 Fahrerkoefizienten Randbedingungen	174
A.5 Verifizierung	178
A.5.1 Zweite überlagerte Schwingung RE-90-30	178
A.5.2 Rollwinkel Kurvenausleitung RE-90-30	178
A.5.3 Geschwindigkeit Kurvenausleitung RE-90-30	179
A.6 Anforderungen an Modell und Datenbasis	180
Literaturverzeichnis.....	182
Eigene Veröffentlichungen	190
Betreute studentische Arbeiten	191

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
<i>ABS</i>	Anti-Blockier-System
<i>ADMA</i>	Automotive Dynamic Motion Analyzer
<i>BMW</i>	Bayerische Motorenwerke
<i>CDF</i>	Cumulative Distribution Function
<i>DGPS</i>	Differential Global Position System
<i>EKF</i>	Extended Kalman Filter
<i>FF</i>	Festforderung
<i>FZD</i>	Fahrzeugtechnik Darmstadt
<i>GNSS</i>	Global Navigation Sattelite System
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>GSM</i>	Global System for Mobile Communications
<i>HMM</i>	Hidden Markov Modell
<i>IMU</i>	Inertial Measuring Unit
<i>KS</i>	Koordinatensystem
<i>LI</i>	Left in (Einleitung Links)
<i>LO</i>	Left Out (Ausleitung Links)
<i>MEMS</i>	Micro-Electro-Mechanical-Systems
<i>MPC</i>	Model-Predictive-Controller (Modellprädiktiver Regler)
<i>OSM</i>	Open-Street-Map
<i>PB</i>	Positionsberechnung
<i>PTW</i>	Powered-Two-Wheelers
<i>RI</i>	Right In (Einleitung Rechts)
<i>RO</i>	Right out (Ausleitung Rechts)
<i>SBAS</i>	Satellite Based Augmentation System
<i>SL</i>	Stationary-Left (Stationärphase Links)
<i>SP</i>	Schwerpunkt
<i>SR</i>	Stationary-Right (Stationärphase Rechts)
<i>RMSE</i>	Root Mean Square Error
<i>RTK</i>	Real Time Kinematik
<i>WAAS</i>	Wide Area Augmentation System
<i>ZF</i>	Zielvorderung

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	m/s ²	Beschleunigung
\tilde{a}	° m/s	Amplitude der überlagerten Schwingung für Rollwinkel / Geschwindigkeit
A	m ²	Fahrzeugstirnfläche
A	m	Klothoidenparameter
$base$	° m/s	Basiswert der linearen Regression für Rollwinkel / Geschwindigkeit
c	-	Kurvigkeit
C	-	Auf einen km Strecke normierte Kurvigkeit
d	m	Reifendurchmesser
e	m	Nachlauf
\tilde{f}	1/1	Frequenz (rel. ortsbezogenes Signal)
F	N	Kraft
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
$grad$	°/1 m/s/1	Gradient der linearen Regression für Rollwinkel/ Geschwindigkeit
h	m	Schwerpunkthöhe im aufrechten Zustand ($\varphi = 0^\circ$)
I	kg m ²	Trägheitsmoment
J	m/s ³	Ruck
k	-	Beiwert
K	-	Kennwert
l	m	Radstand, Länge
\tilde{l}	1/1	Phasenverschiebung (rel. ortsbezogenes Signal)
L	-	Lagrange Funktion
m	kg	Masse
n	n	Anzahl
o	m	Schwerpunkt Abstand zur Streckenmitte
q	m	Querablage
r	m	Reifenradius
\underline{r}	m	Ortsvektor
R	m	Kurvenradius
S	-	Spline-Regressionsmodell
s	° m/s	Schranke der Wachstumsfunktion für Rollwinkel / Geschwindigkeit
\underline{s}	m	Bahnkoordinate
t	s	Zeit
T	s	Abtastrate
v	m/s	Geschwindigkeit
W	-	Einhüllende

Symbol	Einheit	Beschreibung
α	°, rad	Schräglaufwinkel
δ	°, rad	Lenkwinkel
Δ	°, rad	Kinematischer Lenkwinkel, Differenz
ε	°, rad	Lenkkopfwinkel
ζ	-	Längsschlupf
η	°, rad	Lenkkopfwinkel, entspricht $\frac{\pi}{2} - \varepsilon$
θ	°, rad	Nickwinkel
ϑ	°, rad	Winkel zw. Geschwindigkeitsvektor und Abszisse
κ	1/m	Krümmung
κ_{\pm}	-	Vorzeichen der Wachstumsfunktion
μ	-	Reibwertkoeffizient
ρ	kg/m ³	Luftdichte
τ	-	Bremskraftverteilung Vorder-/Hinterrad
φ	°, rad	Rollwinkel
ψ	°, rad	Gierwinkel
ω	°/s, rad/s, 1/min	Raddrehzahl

Index	Beschreibung
abtast	Abtastung
BP	Bandpass gefiltert
c	Kurve
corr	korrigiert
e	erdfest
erf	erforderlich
F	Flieh (-kraft)
Freq	frequenzbasiert
ft	front (vorne)
ges	gesamt
G	Gewicht
hor	horizontiert
L	Längs (-kraft)
lat	Latitude
lon	Longitude
max	maximal
meas	gemessen
min	minimal
norm	normiert
N	Normal (-kraft)
pos	Position
roll	Rollwinkel
R	Reifen
RB	Rollbewegung
Reg	regressionsbasiert
res	resultierend
rr	rear (hinten)
seq	Sequenz
S	Seite, Seiten- /Querkraft
SP	Schwerpunkt
stat	stationär
th	theoretisch
v	fahrzeugfest
vel	Fahrzeuglängsgeschwindigkeit
W	Widerstand
x	x-Richtung des Koordinatensystems
y	y-Richtung des Koordinatensystems
z	z-Richtung des Koordinatensystems
Zug	Zug (-kraft)

Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1-1 Verkehrstote der Jahre 2000-2022, Vergleich PKW und Krafträder ³	1
Abbildung 1-2 Aufbau der Arbeit, Vorgehen nach V-Modell	5
Abbildung 2-1 Koordinatensystem (KS), (1) erdfestes und horizontiertes KS, (2) Zwischen-KS, (3) fahrzeugfestes KS	8
Abbildung 2-2 Schematische Darstellung des Gesamtrollwinkels auf Basis der Annahme der stationären Kurvenfahrt	9
Abbildung 2-3 Beispiel Ablauf einer Kurveneinleitung und Kurvenausleitung, nachgezeichnet nach Cossalter et. al.	11
Abbildung 2-4 Kammscher Kreis zur Darstellung der übertragbaren Reifenkräfte in Abhängigkeit des Reibbeiwertes, nachgezeichnet nach Schütz	12
Abbildung 2-5 Stark vereinfachtes Einspur-Fahrdynamikmodell, nachgezeichnet nach Limebeer und Sharp.....	14
Abbildung 2-6 Links: Bezeichnung und Kopplung der vier Massekörper Vorderrad, Gabel und Lenksystem, Rahmen und Hinterrad, nachgezeichnet nach Cossalter et. al. ³⁶ , Rechts geometrische Größen Radstand l , Schwerpunkthöhe h und Lenkkopfwinkel ε	16
Abbildung 2-7 Verteilung der Kurvenradien bei schweren Motorradunfällen auf ausgewählten Streckenabschnitten, nachgezeichnet nach Hegewald ⁴⁷	20
Abbildung 3-1 Segmentierung einer Motorradkurvenfahrt in Manöverprimitive nach Magiera ⁵⁸	24
Abbildung 3-2 Geometrische Beziehung zur Berechnung der Kurvigkeit, nachgezeichnet nach Gorges et. al.	26
Abbildung 3-3 Beispielhafter Streckenabschnitt, klassifiziert nach der Kurvigkeit C , nachgezeichnet nach Gorges et. al. ^{62b}	27
Abbildung 3-4: Beispielhaftes Vorgehen zur Erfassung des Fahrertyps, nachgezeichnet nach Scherer et. al. ⁶³	28
Abbildung 3-5: Zusammenhang zwischen Selbstschemätzung der Affinität zur Schräglage in Kurvenfahrt und gemessenen Rollwinkeln in zwei Realfahrtstudien in Anlehnung an Scherer et. al. ⁶⁴	29
Abbildung 3-6 Vergleich eines professionellen (links) und eines Hobby Motorradfahrers (rechts) über g-g Diagramme, nachgezeichnet nach Will et. al. ⁶⁶	30
Abbildung 3-7 Klassifizierung in drei Fahrertypengruppen anhand der lateralen und longitudinalen Beschleunigung, nachgezeichnet nach Will et. al.	31
Abbildung 3-8 Abweichung zwischen geplantem und tatsächlichem dynamischem Zustand der Bahnführungsebenen-Regelung, nachgezeichnet nach Hans	37
Abbildung 4-1 Kapitel 4, Messgrößenidentifikation und Genauigkeit	42
Abbildung 4-2 Umgebungseinflüsse auf Fahrer und Fahrzeug.....	43
Abbildung 4-3 Teilsystem Fahrer mit Situationsbewusstsein, Entscheidung und Fahrereingriff	44
Abbildung 4-4: Interaktion und Messbarkeit der Zustände der Teilsysteme Umwelt, Fahrer und Motorrad	46
Abbildung 4-5: Datengrundlagen und Untersuchungsmethoden nach Granularität im Verkehr und zeitlichem Ablauf, nachgezeichnet nach Prokop ⁹⁴	49
Abbildung 4-6 Messfahrzeug Honda NC700X inklusive Messtechnik	51
Abbildung 4-7 Methodik zur Bewertung der Güte der Positionsmessung.....	53
Abbildung 4-8 Ergebnisse der Positionsmessungsgüte, Vergleich der drei Messkonzepte, Mittelwerte und Einzelmessungen am End Tor.....	54
Abbildung 4-9 Untersuchungskurven der Fahrversuche auf abgesperrtem Testgelände, Kartendaten © Google Earth	58

Abbildung 4-10 RE/LI Kurvenkombination zur Untersuchung dynamischer Kurvenübergänge	60
Abbildung 4-11 Anomalie-Ereignis zur Untersuchung der Veränderung des Fahrerhaltens	62
Abbildung 4-12 Kurvensegmentierung anhand der Ein- und Ausfahrtposition einer Kurve, Beispieldatensatz, Fahrer 4, transformiertes GNSS-Positionssignal, Kartendaten © Google Earth ◇	67
Abbildung 4-13 Latitude, Longitude, exportiert aus OSM Datenquelle (links), Spline interpolierte und auf $ds = 1$ m normierte Daten (rechts), Kartendatenlizenz: dl-de/by-2-0, www.govdata.de/dl-de/by-2-0.....	68
Abbildung 4-14 Segmentierte Streckenabschnitte über der zurückgelegten Strecke, insgesamt 31 Segmente, je Segment unterschiedlich eingefärbt.	69
Abbildung 4-15 Eignung der Streckenabschnitte zur Anwendung der Methodik auf der Straßenverkehrserprobungsstrecke.....	70
Abbildung 4-16 Ergebnis der Anwendung der Metrik zur Auswahl von Bewertungskurven je Kurvensegment, gelb: Dynamik, blau: Symmetrie Bewertung.....	72
Abbildung 4-17 Für die prototypische Erprobung im Straßenverkehr ausgewählte Kurvensegmente, in Rot umrandet.....	73
Abbildung 4-18 Zeitlicher Verlauf von (links) Rollwinkel und (rechts) Geschwindigkeitsverlauf bei fünf Durchfahrten durch die LI-180-12 Bewertungskurve von Fahrer 1 ◇	74
Abbildung 4-19 Streckung und Stauchung der Zeitsignale bei der Transformation in den Streckenfortschrittsbereich.....	75
Abbildung 4-20 Beispielhafte Transformation in den streckenbezogenen Kurvenfortschritt ◇	77
Abbildung 5-1 Methodisches Vorgehen der Modellbildung mit der Designphase und Implementierungsphase.....	79
Abbildung 5-2 Kurvenprimitive als Darstellung von Rollwinkel und Rollrate, angelehnt an Magiera ¹⁰⁹	80
Abbildung 5-3 Rollwinkel Verteilung aller Durchfahrten der Bewertungskurven RE-180-12 und LI-180-12, aller 10 Fahrer, farblich getrennt nach Kurvenrichtung nach Scherer et. al. ◇	82
Abbildung 5-4 Boxplots, Bewertungskurve RE-180-12, Links Rollwinkel, rechts Lenkmoment, Je Fahrer $nc = 6$ Kurvendurchfahrten nach Pleß et. al. ◇	83
Abbildung 5-5 Boxplots, Bewertungskurve RE-180-12, Links Bremsdruck, rechts Geschwindigkeit, Je Fahrer $nc = 6$ Kurvendurchfahrten ◇	84
Abbildung 5-6 Rollwinkel-, Geschwindigkeits- und Gierratenverläufe von Fahrer 4,8,9 im Vergleich der RE-180-12 und LI-180-12 Kurven nach Scherer und Basten ◇	86
Abbildung 5-7 Kurven-Primitivübergänge, Wiederholbarkeit aller 10 Fahrer ◇.....	87
Abbildung 5-8 Beispieldarstellung für die Beschreibung von Vertrauensellipsen nach Birolini	89
Abbildung 5-9 Vertrauensellipsen aller LI-180-12 und RE-180-12 Kurvendurchfahrten von Fahrer 4 und Fahrer 8 mit 63 % Konfidenzintervall nach Scherer und Basten ◇	90
Abbildung 5-10 Hervorgehobene Bereiche der Korrekturamplituden in den Vertrauensellipsen von Fahrer 4 und Fahrer 8 bei allen RE-180-12 und LI-180-12 Kurvendurchfahrten nach Scherer und Basten ◇.....	91
Abbildung 5-11 Rollwinkel (links oben) und Geschwindigkeitsverläufe im streckenbezogenen Kurvenfortschritt, Fahrer 4,6,8 Vertrauensellipsen Fahrer 4 und 8 (rechts) Untersuchung Kurvenübergang ◇	92

Abbildung 5-12 Wiederholbarkeit von Rollwinkel, Geschwindigkeit (Fahrer 4,8 und 9 - links) und Primitivübergänge aller Fahrer der RE-90-30 Kurve \diamond	93
Abbildung 5-13 Beispielhaftes Anomalieereignis mit verdeckter Kurve, Rollrate über Rollwinkel, Fahrer 4 nach Scherer et. al. ¹¹⁹ \diamond	94
Abbildung 5-14 Darstellung des Parametereinflusses während der Kurveneinleitungsphase nach Scherer und Basten	98
Abbildung 5-15 RMSE und maximaler Fehler der Approximation von Geschwindigkeit und Rollwinkel \diamond	100
Abbildung 5-16 Verschiebung der Kurvenprimitive in den Ursprung	101
Abbildung 5-17 Tiefpassfilterung der Primitivübergänge der approximierten Signalverläufe LI-180-12 \diamond	101
Abbildung 5-18 Schematisches Vorgehen zur Berechnung der zukünftigen Position	103
Abbildung 5-19 Abweichung zwischen gemessenem und mittels stationärer Kurvenfahrt berechnetem horizontiertem Gierratenverlauf nach Scherer und Basten \circ	106
Abbildung 5-20 Beschreibung des Vorgehens zur Korrektur des Gierratenschätzwertes nach Scherer und Basten \circ	109
Abbildung 5-21 Oberkörperhaltung (links), Dämpfung (Mitte), Trägheit und Offset (rechts) aus den Gierraten-Korrekturfaktoren \diamond	111
Abbildung 5-22 Vergleich der Oberkörperposition aller zehn Fahrer und jeweils sieben Durchfahrten der LI-180-12 Bewertungskurve, ermittelt aus den Korrekturparametern der Gierratenschätzung \diamond	112
Abbildung 5-23 Vergleich der Oberkörperposition aller 10 Fahrer und jeweils 6 Durchfahrten der RE-180-12 Bewertungskurve, ermittelt aus den Korrekturparametern der Gierratenschätzung \diamond	113
Abbildung 6-1 Methodisches Vorgehen der Modellentwicklung, Kapitel 6, Verifikation und Validierung	115
Abbildung 6-2 Schwellwerte der logistischen Wachstumsfunktion aller zehn Fahrer (links), Schrankenwerte der Basiswerte des Stationärteils Fahrer 4 und 10 nach Scherer und Basten \diamond	117
Abbildung 6-3 links und Mitte: Exponentenkoeffizienten der Kurveneinleitungsphase, rechts Verteilung der Werte in Abhängigkeit der Durchfahrt nach Scherer und Basten \diamond ...	119
Abbildung 6-4 links: Exponentenkoeffizienten des dynamischen Übergangs, rechts: normierter Rollwinkel der Fahrer 1 und 4 nach Scherer und Basten \diamond	120
Abbildung 6-5 Überlagerte Schwingungen des Kurveneinleitungsprimitivs \diamond	121
Abbildung 6-6 Fahrer 4, 6, 8 Geschwindigkeits-Schranken, Vorzeichen und überlagerte Schwingungen \diamond	122
Abbildung 6-7 Exponentenkoeffizienten, Schranken der Kurvenausleitungsphase aller 10 Fahrer \diamond	123
Abbildung 6-8: Überlagerte Schwingungen in der Kurvenausleitungsphase, Frequenz über Amplitude, Maximalfehler rechts \diamond	124
Abbildung 6-9 Wachstumsfunktionsparameter der Kurvenausleitung \diamond	125
Abbildung 6-10 Koeffizienten der Kurvenüberleitung \diamond	126
Abbildung 6-11 Gradient der Stationären RE-180-12 und LI-180-12 Kurven nach Scherer und Basten \diamond	128
Abbildung 6-12 Basiswerte der linearen Regression in der stationären Kurvenfahrt nach Scherer und Basten \diamond	129
Abbildung 6-13 Überlagerte Schwingungen, Frequenz und Amplitude in der Stationärphase nach Scherer und Basten \diamond	130
Abbildung 6-14 Phasenverschiebung während der stationären Kurvenfahrt, Streuung bei wiederholter Durchfahrt \diamond	131

Abbildung 6-15 Überlagerte Schwingungen im Vergleich zur Phasenverschiebung der zweiten überlagerten Schwingung in der Stationärphase ◇	131
Abbildung 6-16 Geschwindigkeitsgradienten Fahrer 5 und 6 ◇	132
Abbildung 6-17 Frequenz und Amplitude der Hauptschwingungen und linearen Regression im Stationärteil ◇	133
Abbildung 6-18 Amplitude der überlagerten Schwingung des Geschwindigkeitssignals über dem Basiswert der Regression, Stationärteil ◇	134
Abbildung 6-19 Schranken der Kurveneinleitung, Übertragbarkeit Straßenverkehr und Anomalie ◇	135
Abbildung 6-20 Schranken, überlagerte Schwingungen Geschwindigkeit, Übertragbarkeit in Straßenverkehr ◇	136
Abbildung 6-21 Zusammenhang zwischen den Frequenzen und Amplituden in der stationären Kurvenfahrt mit der Führerscheinalterdauer und der jährlichen km-Fahrleistung ◇	138
Abbildung 6-22 Überlagerte Schwingungen, Übertragbarkeit in Straßenverkehr, Frequenz und Amplitude, Anomalie ◇	139
Abbildung 6-23 Rollwinkelgradient und Basiswert der linearen Regression, Übertragbarkeit in Straßenverkehr und Anomalie ◇	140
Abbildung 6-24 Geschwindigkeits-Basiswert und -Gradient der linearen Regression, Übertragbarkeit in Straßenverkehr und Anomalie ◇	140
Abbildung 6-25 Kurvenausleitung, Rollwinkel Frequenz und Amplitude ◇	141
Abbildung 6-26 Rollwinkelschranken in Kurvenausleitung ◇	142
Abbildung 6-27 Schematisches Vorgehen zur Validierung der Trajektorienprädiktion	143
Abbildung 6-28 Lateraler Fehler aller Durchfahrten der LI-180-12 Kurven (oben) und RE-180-12 Kurven (unten) von Fahrer 1 und Fahrer 2 der Validierungsfahrten, 10 Durchfahrten je Fahrer und Richtung, jede Farbe stellt eine Kurvendurchfahrt dar ○	144
Abbildung 6-29 Detaildarstellung des Maximalfehlers der Trajektorien von Fahrer 2, RE-180-12 Kurven links Rollwinkel, Geschwindigkeit und Gierrate, rechts Positionsberechnung und lateraler Fehler ○	145
Abbildung 6-30 Lateraler Fehler aller Durchfahrten der RE/LI-180/90-12/18 Kurven von Fahrer 2 und Fahrer 3 der Validierungsfahrten, 5 Durchfahrten je Fahrer, jede Farbe stellt eine Kurvendurchfahrt dar ○	146
Abbildung 6-31 Detaildarstellung des Maximalfehlers der Trajektorien von Fahrer 3, RE/LI-180/90-12/18 Kurven links Rollwinkel, Geschwindigkeit und Gierrate, rechts Positionsberechnung und lateraler Fehler ○	147
Abbildung 6-32 Laterale Abweichung der gemessenen und berechneten Trajektorien, RE-90-30 Kurve, Fahrer 2 (links) und Fahrer 3 (Mitte) ○	148
Abbildung 6-33 Zusammenfassung lateraler Abweichungen der Testgelände-Validierung ○	149
Abbildung 7-1 Laterale Abweichung gemessener und geschätzter Trajektorie der prototypischen Erprobung im Straßenverkehr aller drei Fahrer, Einzelbetrachtung des ersten Rechtskurvensegmentes □	153
Abbildung 7-2 Laterale Abweichung gemessener und geschätzter Trajektorie der prototypischen Erprobung im Straßenverkehr aller drei Fahrer, Gesamtbetrachtung der RE/LI-135/110-63/50 Kurve □	153
Abbildung 7-3: Beispieltrajektorie, Fahrer 3, Durchfahrt 5 mit zugehörigem Rollwinkel-, Geschwindigkeits-, Gierraten-Signal, lateraler Fehler, nach Scherer und Eschinger □	154
Abbildung A-1: Motorrad als inverses Pendel nach Seiniger ¹⁴⁵	165
Abbildung A-2 Reibwertbedingte Rollratengrenzen	170
Abbildung A-3 Reibwertabhängige Rollwinkel/-raten/-beschleunigungsgrenzen	171
Abbildung A-4 Ergebnis der Reifenkraftberechnung	173

Abbildung A-5 Amplitude einzeln aller 10 Fahrer (links), Frequenz über Amplitude (Mitte), Phasenverschiebung (Rechts) der zweiten überlagerten Schwingung.....	178
Abbildung A-6 Frequenz über Amplitude (Links), Frequenz je Fahrer, Exponentenkoeffizient der Kurvenausleitung RO in der RE-90-30 Kurve	178
Abbildung A-7 Geschwindigkeitskoeffizienten Amplitude Kurvenausleitung der RE-90-30 Kurve	179
Tabelle 2-1 Einfluss der Oberkörperhaltung auf den Fahrzeuggesamtrollwinkel ²⁶	13
Tabelle 2-2: Aufstellung der Eingangsgrößen, Hilfsgleichungen und Unbekannten Größen zur Berechnung der stationären Kurvenfahrt mit dem Modell nach Cossalter.....	17
Tabelle 4-1 Vergleichswerte der Referenzkurven	56
Tabelle 4-2: Kurvenöffnungswinkel und Radien	59
Tabelle 4-3 Ergebnis des Paarvergleichs zwischen verschiedenen potentiellen Gefahren und die daraus resultierende Rangfolge für die Umsetzung von Fahrversuchen.	61
Tabelle 4-4 Übersicht des Probandenkollektivs der Teststreckenuntersuchung	64
Tabelle 4-5 Probandenauswahl für die prototypische Erprobung im Straßenverkehr.....	64
Tabelle 4-6 Zusammenfassung der Messkampagnen	65
Tabelle 6-1 Erklärung der verwendeten Indizes zur Verifikation der mathematischen Ansatzfunktionen nach Scherer und Basten	116
Tabelle A-1: Technische Daten der Honda NC 700 X.....	162
Tabelle A-2: Übersicht der Kurvenparameter der Validierungsstrecke	163
Tabelle A-3 Einschränkung des Lösungsraum der Koeffizienten der LI/RI Primitive, Rollwinkel.....	174
Tabelle A-4 Einschränkung des Lösungsraum der Koeffizienten der LI/RI Primitive, Geschwindigkeit	175
Tabelle A-5 Einschränkung des Lösungsraum der Koeffizienten der LO/RO Primitive, Rollwinkel.....	175
Tabelle A-6 Einschränkung des Lösungsraum der Koeffizienten der LO/RO Primitive, Geschwindigkeit	176
Tabelle A-7 Einschränkung des Lösungsraum der Koeffizienten Kurvenübergang, Rollwinkel	176
Tabelle A-8: Übersicht der Anforderungen an die Modellentwicklung und Datenerfassung	180

Kurzzusammenfassung

Im Bereich der Unfallforschung zeigen sich unverändert hohe Zahlen schwer oder tödlich verunglückter Motorradfahrer in den letzten Jahren, insbesondere in kurvigen Streckenabschnitten ohne Einwirkung anderer Verkehrsteilnehmer. Diese Unfälle sind häufig auf ein der Situation oder Umgebung unangepasstes Handeln des Fahrers zurückzuführen. Statistische Ansätze zur Beschreibung fahrerspezifischen Verhaltens über einen längeren Beobachtungszeitraum hinweg sind im Stand der Forschung zu finden. Eine kurvenbasierte, bzw. manöverabhängige Beschreibung eines fahrertypischen Verhaltens existiert bisher nicht.

In dieser Arbeit wird mittels eines methodischen Vorgehens eine datengetriebene Fahrermodellentwicklung präsentiert. Das Ziel dieses Modells ist eine fahrer- und kurvenspezifische Vorhersage einer erfolgreichen Durchfahrbarkeit einer vorausliegenden Kurve. Die hierfür notwendige Beschreibung einer zukünftigen Position und des zukünftigen dynamischen Verhaltens (Trajektorie) sind ebenfalls Teil dieser Zielanforderung. Die für die Modellentwicklung notwendigen Anforderungen für eine Verifikation und Validierung des Modells werden systematisch erarbeitet. Im Stand der Forschung werden existierende Methoden zur Segmentierung von Motorradfahrdynamikdaten, bekannte Klassifizierungsmethoden fahrerspezifischen Verhaltens und aktuelle Ansätze zur Vorhersage einer Trajektorie erarbeitet. Bekannte Arbeiten zur Warnung vor möglicherweise zu schnell angefahrenen Kurven auf Basis statistischer Fahrerdaten werden präsentiert.

Über eine Herleitung der Systemgrenzen der Teilsysteme Fahrer, Fahrzeug und Umgebung werden essentielle für die Modellentwicklung notwendige Messgrößen erarbeitet. Eine Methodik zur Genauigkeitsbewertung der für die Datenerfassung genutzten Messsysteme wird vorgestellt. Die Datenerfassungsphase mit der Definition der zu untersuchenden Manöver und der Auswahl der Probanden wird präsentiert. Die Manöver werden methodisch erarbeitet, insbesondere bezogen auf typische Unfallkurvenparameter deutscher Landstraßen. Hieraus werden sogenannte Bewertungskurven zur Untersuchung der Einleitung, dem Stationärteil und der Ausleitung einer Kurvenfahrt erarbeitet. Ein Manöver zur Untersuchung dynamischer Kurvenübergänge und ein weiteres zur Analyse der Übertragbarkeit des Modells in den Realverkehr werden beschrieben. Hierin wird zusätzlich ein Anomalieereignis integriert. Dieses dient der Untersuchbarkeit sich wiederholenden Fahrerverhaltens und der entsprechenden Abweichung hierzu bei veränderten Umweltbedingungen.

Aus den vorverarbeiteten Daten werden über eine Schwellwert- und Wiederholbarkeitsuntersuchungen Anforderungen an das Modell abgeleitet. Mit einer Parameteranalyse der einzelnen Kurvenphasen wird das Modell verifiziert. Über eine Bewertung der lateralen Abweichung zwischen Modelltrajektorie und gemessenem Verhalten wird eine Validierung des Modells durchgeführt. Abschließend wird als Ausblick eine prototypische Erprobung des Modells im Straßenverkehr vorgestellt.

Abstract

Accident research shows the number of serious or fatal accidents involving motorcyclists has remained high in recent years, particularly on curvy sections of roads without the influence of other road users. These accidents are often due to the rider's inappropriate behaviour in relation to the situation or surrounding area. Statistical approaches for describing rider-specific behaviour over a longer observation period can be found in the state of research. A curve-based or manoeuvre-dependent description of rider-specific behaviour does not yet exist.

In this work, a data-driven rider model development is presented by means of a methodical approach. The aim of this model is a rider- and curve-specific prediction of a successful passage of a preceding curve. The necessary description of a future position and the future dynamic behaviour (trajectory) are also part of this target requirement. The requirements for verification and validation of the model necessary for model development are systematically developed. Existing methods for the segmentation of motorbike dynamics data, known classification methods of rider-specific behaviour and current approaches for the prediction of a trajectory are developed in the state of research. Known work on the warning of possibly too fast approaching bends based on statistical rider data is presented.

By deriving the system boundaries of the rider, vehicle and environment subsystems, essential measurement variables required for model development are developed. A methodology for assessing the accuracy of the measurement systems used for data acquisition is presented. The data acquisition phase with the definition of the manoeuvres to be investigated and the selection of test participants is presented. The manoeuvres are developed methodically, in particular in relation to typical accident curve parameters of German rural roads. From this, so-called evaluation curves are developed for the investigation of the initiation, the stationary part and the exit of a cornering manoeuvre. A manoeuvre for investigating dynamic curve transitions and another for analysing the transferability of the model to real traffic are described. In addition, an anomaly feature is integrated. This is used to investigate repetitive rider behaviour and the corresponding deviation from this under changed environmental conditions.

Requirements for the model are derived from the pre-processed data via a threshold value and repeatability analysis. The model is verified by analysing the parameters of the individual curve phases. Validation of the model is carried out by evaluating the lateral deviation between the model trajectory and the measured behaviour. Finally, a prototypical evaluation of the model in road traffic is presented as an outlook.

1 Einleitung und Motivation

Die Neuzulassungszahlen von Krafträdern in Deutschland der Jahre 2018 bis 2022 zeigen im Gegensatz zu den Zulassungszahlen von Personenkraftwagen einen ansteigenden Trend.¹ Während die Neuzulassungen von PKW in dem Zeitraum um 22,8 % zurückgegangen sind, stiegen die Zulassungszahlen von Krafträdern um 29,3 % an. Der Trend steigender Zulassungszahlen bei Krafträdern lässt sich ebenfalls bei der Betrachtung eines längeren Zeitraums beobachten. Im Zeitraum der Jahre 2013 bis 2022 sind die Zulassungszahlen bei Krafträdern im Mittel um 6,4 % gestiegen während sie bei PKW um 0,9 % zurückgingen.²

Gleichzeitig ist bei einem längeren Betrachtungszeitraum ein Stagnieren der Unfallzahlen bei schweren Unfällen mit Motorradbeteiligung beobachtbar. Wie in Abbildung 1-1 auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes dargestellt, ist der Anteil der bei Unfällen mit PKW-Beteiligung getöteten Personen zwischen den Jahren 2000 bis 2022 um 70 % zurückgegangen, während beim Kraftrad nur ein Rückgang um 42 % zu beobachten ist. Im Mittel ist in den letzten 10 Jahren im Bereich der getöteten Kraftradfahrer kein Rückgang der Zahlen ersichtlich.³

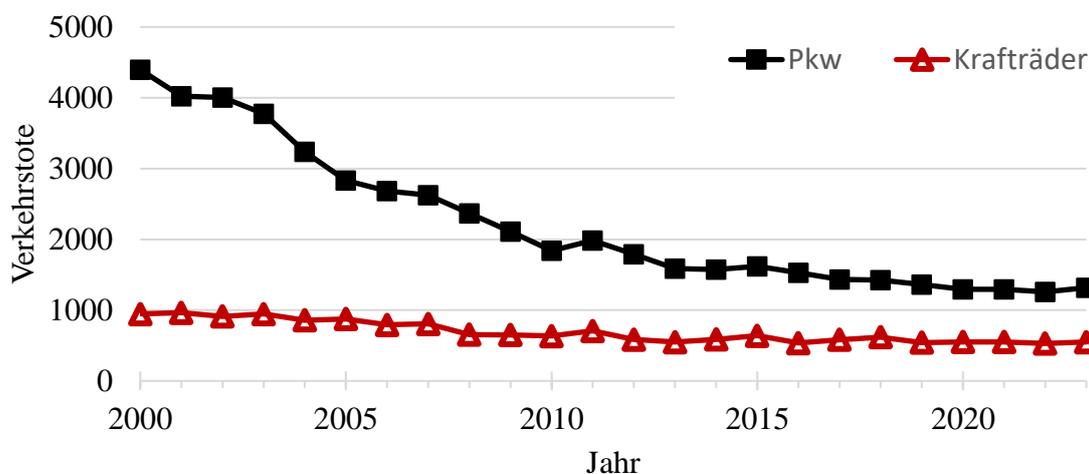


Abbildung 1-1 Verkehrstote der Jahre 2000-2022, Vergleich PKW und Krafträder³

Bei einer Analyse der Unfallursache von Unfällen mit Personenschaden und dem beteiligten Kraftradfahrer als Hauptverursacher zeigt sich, dass 45,3 % dieser Unfälle aus dem beispielhaft gewählten Jahr 2021 der Kategorie Fahrnunfall zuordbar sind. Ein Fahrnunfall liegt vor, wenn der Auslöser des Unfalls auf einen Kontrollverlust zum Beispiel aufgrund einer nicht

¹ Destatis: Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen in Deutschland (2023).

² Kraftfahrtbundesamt: Neuzulassungen nach Fahrzeugklassen und Aufbauarten (2024).

³ Destatis: Verkehrsunfälle (2023).

angepassten Geschwindigkeit oder einer Fehleinschätzung des Straßenverlaufs, bzw. des Straßenzustands zurückzuführen ist.³

Besonders erschreckend ist die Altersverteilung in der Statistik der verunglückten Kraftfahrer. Im Jahr 2021 sind 37,2 % der verunfallten sowie 20,0 % der getöteten Aufsassen der Altersgruppe von 15-24 Jahren zuzuordnen. Im Bericht des statistischen Bundesamtes zu diesen Zahlen stellt man einen Zusammenhang zwischen der Fahrpraxis und den Unfallzahlen her: „*Junge Fahrer haben oft noch wenig Fahrpraxis (Einstiegsrisiko) und neigen dazu, eigene Grenzen zu überschreiten.*“⁴

Der hier eingeführte Zusammenhang lässt sowohl eine Korrelation zwischen der Fahrerfahrung und dem sicheren Kontrollieren eines Motorrades, wie auch der Existenz spezifischer Grenzwerte und einem steigenden Unfallrisiko bei der Überschreitung dieser vermuten. Zudem zeigt sich aus der Anzahl der Fahrunfälle ein erhöhtes Unfallrisiko aufgrund einer Fehleinschätzung der Gesamtsituation.

Weiterhin ist eine statistische Häufung von Motorradunfällen in Kurven beobachtbar.⁵ Somit ist die Kurvenfahrt als besonders kritischer, oder sensibler Teil des Motorradfahrens zu betrachten, wenn auch gleichzeitig aufgrund der spezifischen Einspurdynamik als besonders herausfordernd für den Fahrer.

Technologisch hängen Motorräder in der Anzahl verfügbarer Assistenzsysteme hinter dem PKW hinterher. Beispielhaft ist die gesetzlich verpflichtende Einführung des Antiblockiersystems (ABS) für Krafträder mit einem Hubraum $> 125 \text{ cm}^3$. Während erste ABS für Motorräder bereits 1988 erhältlich waren hat es weitere 27 Jahre gedauert, bis diese flächendeckend in größeren Krafträdern serienmäßig verbaut wurden.⁶ Fahrdynamisch - explizit in die laterale Dynamik - eingreifende Systeme, sind derzeit noch als Stand der Forschung zu bezeichnen. Ein Nachweis der technischen Umsetzbarkeit ist erbracht,^{7, 8} jedoch ist für den Einsatz solcher Systeme eine Bekanntheit der fahrerischen Grenzen notwendig.

Statistisch sind diese Grenzen in den vergangenen Jahren wiederholt untersucht worden.^{9, 10} Hierbei war der Ansatz stets eine statistische Beschreibbarkeit der Grenzen über einen längeren Beobachtungszeitraum zu erzeugen oder einzelne Fahrer einer bestimmten Vergleichsgruppe zuordnen zu können.

⁴ Destatis: Verkehrsunfälle (2023), S. 7.

⁵ Hegewald, A.: Motorradunfälle - Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur (2015).

⁶ Stoffregen, J.: Regelungssysteme für Bremsen und Antriebsschlupf (2018).

⁷ Hans, S.: Störgrößenkompensation und Trajektorienfolgeregelung Motorrad (2022).

⁸ Köbe, M.: Fahrdynamisch-eingreifende Fahrerassistenzsysteme Motorräder (2023).

⁹ Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020).

¹⁰ Will, S. et al.: Fahrerbeschreibung mit g-g Diagrammen (2020).

Ergänzend zu der Fahrzeugentwicklung sind aktuelle Smartphones heutzutage in der Lage fahrdynamische Größen auch auf einem Motorrad zuverlässig messbar zu machen.¹¹ Insbesondere die Weiterentwicklung moderner Global-Navigation-Satellite-Systems (GNSS) Technik ermöglicht so eine präzise Messung der aktuellen Position und die parallele Aufnahme fahrdynamischer Messdaten. Smartphone Sensorik wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Low Cost Messtechnik bezeichnet. Hierzu zählen ebenfalls weitreichend erhältliche und preisgünstig verfügbare Messkonzepte.¹²

Die Verfügbarkeit von Smartphones in der Altersgruppe der besonders gefährdeten jungen Fahrer ist hoch. Hieraus resultiert die Möglichkeit der Entwicklung eines Analysesystems zur Messung und Bewertung des individuellen Fahrverhaltens und der Nutzung dieses Wissens zum Beispiel zur gezielten Warnung vor zu schnell angefahrenen Kurven oder dem Überschreiten des eigenen Grenzbereichs. Ein solches System muss zuverlässig das typische Verhalten eines Fahrers abbilden können, um im richtigen Moment entscheidend warnen zu können. Daher liegt der Fokus dieser Arbeit auf der detaillierten Analyse des typischen Verhaltens von Motorradfahrern in Kurvensituationen.

Somit ergeben sich zwei Anwendungsfälle für ein Fahrermodell, welches auf Basis eines sich wiederholenden Verhaltens beim Durchfahren von Kurven eine Vorhersage der Trajektorie trifft und bei ausreichendem Vorhersagehorizont auch das erfolgreiche Beenden einer Kurvenfahrt präzisieren kann. Eine Trajektorie ist die Beschreibung einer Bahnkurve im Zeitbezug, also vorstellbar als die Position eines Objektes mit zugehöriger Information über die Geschwindigkeit.

¹¹ Stanglmayr, M. et al.: Messung Motorradfahrdynamik mit Smartphones (2020).

¹² In dieser Arbeit wird Low Cost Messtechnik definiert mit einem Anschaffungspreis < 1000 €

1.1 Forschungsfragen

Aus den in Kapitel 1 genannten Motivationsgründen ergibt sich die nachfolgende Forschungsfrage:

Ist es möglich, die zukünftige Position eines Motorrads in typischen Unfallkurven auf der Grundlage aufgezeichneter Fahrdynamikdaten unter Berücksichtigung spezifischer Fahrereinflüsse zu modellieren und vorherzusagen, ohne die Kenntnis fester Fahrzeugparameter vorauszusetzen und somit die erfolgreiche Durchfahrbarkeit einer Kurve schon zu Beginn einer Kurvenfahrt nachzuweisen?

Zur Untersuchung dieser Fragestellung werden die nachfolgenden verfeinerten Forschungsfragen definiert, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden.

Forschungsfragen

- Existieren fahrertypische Schwellwerte in fahrdynamischen Parametern beim Durchfahren von Kurven?
- Wird eine (selbe) Kurve bei gleichen Randbedingungen immer wieder anders durchfahren?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen fahrerspezifischem Verhalten, also der fahrerindividuellen Fahrweise und dem Muster beim wiederholten Durchfahren von Kurven?
- Lässt sich eine solche Mustererkennung zur Prädiktion von Kurvenfahrten nutzen?

1.2 Aufbau der Arbeit

Die in dieser Arbeit vorgestellte Entwicklung eines Modells zur kurvenabhängigen Trajektorienprädiktion orientiert sich beim Vorgehen an der methodischen Entwicklung nach dem V-Modell. Ziel des methodischen Vorgehens ist die Übertragbarkeit auf ähnliche Fragestellungen bei der Entwicklung fahrerspezifischer Modelle zu gewährleisten.

In Kapitel 1 der Arbeit wird nach der Einleitung und Motivation die hieraus resultierende Forschungsfrage abgeleitet, welche sich in vier weitere Detailfragen untergliedert.

In Kapitel 2 werden die für das Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen vorgestellt. Hierbei werden zunächst die genutzten Koordinatensysteme (KS) eingeführt. Nach einer Beschreibung der Motorradkurvenfahrt aus fahrdynamischer Sicht mit dynamischen und quasistationären Anteilen wird in die Motorradfahrdynamikmodellierung übergeleitet. Hier

werden beispielhaft das grundlegende Modell von Whipple¹³, sowie zwei weitere Beispiele zur Modellierung der stationären Kurvenfahrt¹⁴ oder der Modellierung der Motorradfahrtdynamik mit einem Ein-Massenansatz¹⁵ vorgestellt.

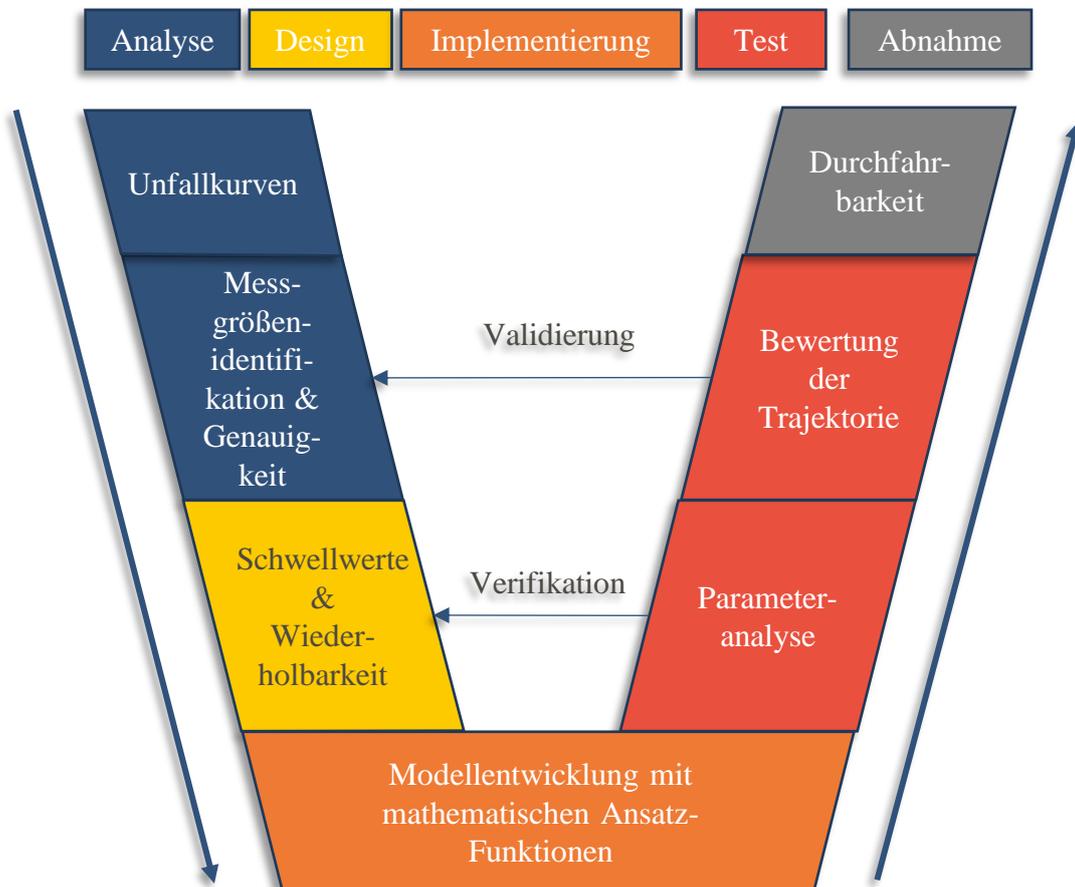


Abbildung 1-2 Aufbau der Arbeit, Vorgehen nach V-Modell

Wie in Abbildung 1-2 dargestellt, sind die ersten Kapitel dem Bereich der Analyse zuzuordnen. Hierzu zählt ebenfalls die in Kapitel 2 vorgestellte Definition einer typischen Motorradunfallkurve. Diese wird methodisch in Kapitel 4 noch einmal aufgegriffen und dort hinsichtlich einer allgemeinen Anwendbarkeit auf beliebige Streckenabschnitte untersucht.

In Kapitel 3 wird der Stand der Forschung erörtert. Hierzu zählen die bekannten Methoden der Segmentierung und Klassifizierung einer Motorradkurvenfahrt. Im Weiteren wird die bisher bekannte Analysierbarkeit der Fahrerspezifität vorgestellt, gefolgt von der Vorstellung verschiedener Trajektorienprädiktionsmethoden. Anschließend werden bekannte Systeme

¹³ Whipple, F. J.: The stability of the motion of a bicycle (1899).

¹⁴ Cossalter, V. et al.: Steady turning of motorcycles (2007).

¹⁵ Hans, S.: Störgrößenkompensation und Trajektorienfolgeregelung Motorrad (2022).

oder Ergebnisse zur Bewertung der Durchfahrbarkeit einer Kurve präsentiert. Aus dem Stand der Forschung ergibt sich das definierte Ziel dieser Dissertation.

Kapitel 4 beinhaltet die Erklärung der Methodik des Vorgehens, sowie eine Systemabgrenzung zur Messgrößenidentifikation. Anschließend werden die für die Arbeit eingesetzten Messkonzepte vorgestellt und hinsichtlich der damit erreichbaren Datenqualität untersucht. Hierfür wird eine allgemein anwendbare Bewertungsmethodik vorgestellt, aus der die Anforderung an die Validierung hervorgeht. Im weiteren Verlauf wird auf die Datenerhebungsphase eingegangen. In einem ersten Schritt werden sogenannte Bewertungskurven eingeführt, sowie die Versuchsgeländestudie näher erläutert. Hierfür wird ein Anomalieereignis definiert sowie die Probandenauswahl für die Teststreckenstudie und die Validierung vorgestellt. Im Abschnitt der Datenvorverarbeitung liegt der Fokus auf der Methodik zur Segmentierung und Normierung der Daten, ergänzend wird eine Metrik zur Eingliederung beliebiger Kurvenabschnitte für eine spätere Anwendung des Modells auf beliebige Streckenabschnitte vorgestellt.

Damit ist nach Abbildung 1-2 der Abschnitt der Analyse abgeschlossen und in Kapitel 5 beginnt die Designphase der Modellentwicklung. Diese unterteilt sich in die Vorstellung des allgemeinen Entwicklungsansatzes sowie die Anforderungsableitung an das Modell aus einer Schwellwert- und Wiederholbarkeitsuntersuchung. Nachfolgend wird nach Abbildung 1-2 unten in den Schritt der Implementierung mittels der Beschreibung der Kurvenfahrt mit mathematischen Ansatzfunktionen übergeleitet. Hierauf aufbauend wird der gewählte Ansatz zur Berechnung der zukünftigen Position in der Kurve präsentiert. Den Abschluss von Kapitel 5 bildet die Vorstellung der interpretierbaren Zusatzgrößen des Modells sowie der Modellgrenzen hinsichtlich der allgemeinen Anwendbarkeit.

Mit Kapitel 6 beginnt in Abbildung 1-2 rechts die Testphase der Modellentwicklung mit abbauender Detailtiefe. Im ersten Schritt erfolgt die Verifikation der Modellanforderungen mittels einer Parameteranalyse. Hierfür werden die einzelnen Kurvenprimitive analysiert und hinsichtlich des Erreichens der Anforderungen aus den vorherigen Kapiteln untersucht. Im zweiten Teil des Kapitels wird über den Ansatz des Vergleichs der berechneten und gemessenen Trajektorie die Validierung des Modells beschrieben. Diese wird auf einer Teststrecke unter optimalen Bedingungen auf abgesperrtem Gelände durchgeführt.

Abschließend wird nach Abbildung 1-2 oben rechts in Kapitel 7 eine Ersterprobung des Modells im Straßenverkehr inklusive der Diskussion der Ergebnisse und dem Ausblick vorgestellt. Kapitel 8 bildet mit der Zusammenfassung den Abschluss dieser Arbeit.

2 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die als Basis für das Verständnis der nachfolgenden Abschnitte dienenden Grundlagen behandelt. Im ersten Schritt werden die in der Arbeit genutzten Koordinatensystemen definiert. Diese sind für die Interpretation der Fahrzeugdynamik von zentraler Bedeutung und bilden die Grundlage für die Analyse von Bewegungen im Raum.

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der Fahrdynamik der Motorradkurvenfahrt. Sowohl stationäre als auch instationäre Aspekte werden beleuchtet, um ein umfassendes Verständnis der Bewegungsabläufe zu gewährleisten. Dabei werden insbesondere die Grenzen für den Fahrzeugrollwinkel erörtert, die sich aus den dynamischen und quasistationären Fahrsituationen ergeben.

Die Fahrdynamikmodellierung wird im anschließenden Abschnitt behandelt, wobei auf bewährte Modelle zurückgegriffen wird. Hierzu zählen die Erweiterung des Urmodells von Whipple sowie die Vorstellung exemplarischer Modelle von Cossalter¹⁶ und Hans¹⁷. Diese Modelle bieten die Grundlagen zur Beschreibung der Kurvenfahrt zum Beispiel mittels eines Einmassen-Modells mit der Randbedingung des rollenden, nicht rutschenden Rades.

In Ergänzung zu den vorangegangenen Abschnitten befasst sich das darauffolgende Kapitel mit der Beschreibung typischer Motorrad-Unfallkurven. Durch die Analyse dieser Szenarien entsteht ein Verständnis für die Randbedingungen und die Fahrdynamik unter kritischen Bedingungen. Es werden charakteristische Kurvenmerkmale herausgearbeitet, die bei der Entstehung von Kurvenunfällen eine Rolle spielen.

Die Erkenntnisse aus der Untersuchung typischer Unfallkurven tragen dazu bei, das Verständnis für potenziell gefährliche Fahrsituationen zu vertiefen. Dieser Aspekt ist von besonderer Relevanz für die Entwicklung von Sicherheitsmaßnahmen und des in dieser Arbeit vorgestellten Modells.

2.1 Koordinatensysteme

In dieser Arbeit werden Daten verschiedener Quellen miteinander verglichen. Messdaten aus fahrzeugfest verbauter Messtechnik, Daten ermittelt mit GNSS oder Kartendaten mit Angaben von Längen und Breitengrad. Zur Einordnung des Bezugs zueinander im Hinblick auf die genutzten Koordinatensysteme (KS) orientiert sich das Vorgehen an der DIN ISO 8855¹⁸. Insbesondere geht es bei dem Bezug um die Vergleichbarkeit oder Interpretierbarkeit von

¹⁶ Cossalter, V. et al.: Steady turning of motorcycles (2007).

¹⁷ Hans, S.: Störgrößenkompensation und Trajektorienfolgeregelung Motorrad (2022).

¹⁸ Vgl. ISO, DIN: Normung Koordinatensysteme Fahrzeuge (2016), 5ff.

Daten aus einem erdfesten, nordweisenden KS, gekennzeichnet mit dem Index e und dem fahrzeugfesten Koordinatensystem, gekennzeichnet durch den Index v.

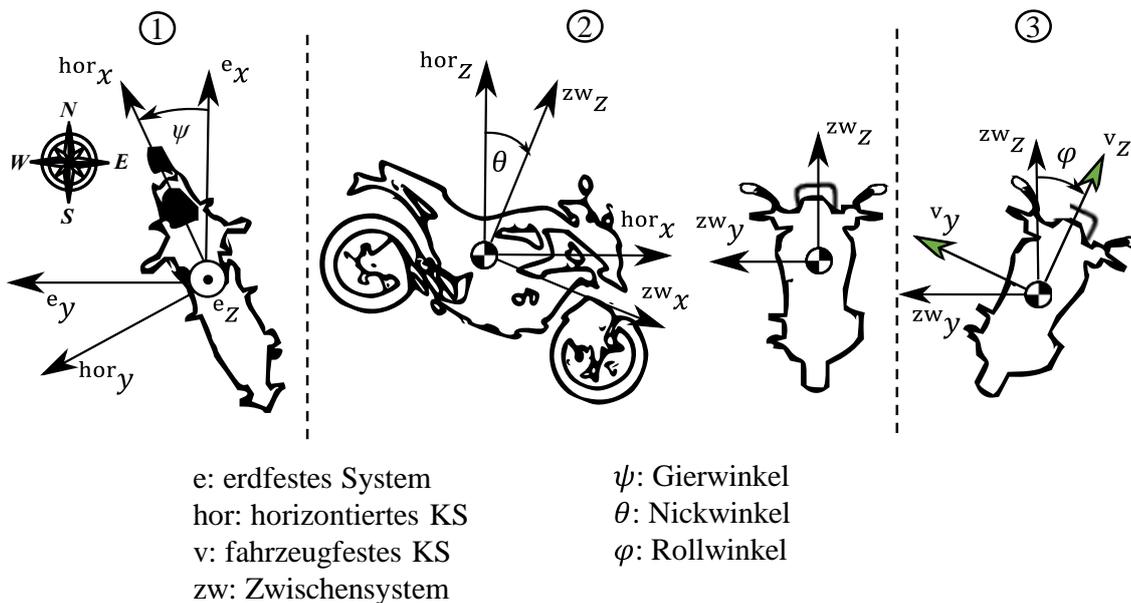


Abbildung 2-1 Koordinatensystem (KS), (1) erdfestes und horizontiertes KS, (2) Zwischen-KS, (3) fahrzeugfestes KS

Abbildung 2-1 verdeutlicht das Vorgehen der Transformation der verschiedenen KS. Vom erdfesten KS wird in einer ersten Drehung (1) mit dem Gierwinkel ψ um die erdfeste z-Achse e_z (in der Abbildung 2-1 links um die Achse durch den Schwerpunkt aus der Bildebene heraus) in das horizontierte KS, gekennzeichnet mit „hor“ gedreht. In einer zweiten Drehung, wie in Abbildung 2-1 Mitte (2) dargestellt, wird um die horizontierte y-Achse hor_y mit dem Nickwinkel θ in ein - in der Arbeit nicht weiter genutztes - Zwischen-KS („zw“) transformiert. Im letzten Schritt mit Abbildung 2-1 rechts (3) wird mit dem Rollwinkel φ um die zw_x -Achse in das fahrzeugfeste KS, mit Index „v“ gekennzeichnet transformiert. Alle Angaben beziehen sich auf den Fahrzeugschwerpunkt. Bei fahrzeugfesten Angaben zeigt die v_x -Achse in Fahrzeugrichtung und die v_z -Achse in der Symmetrieebene des Fahrzeuges senkrecht nach oben. Die v_y -Achse steht senkrecht auf beiden anderen Achsen und zeigt somit in Fahrtrichtung schauend nach links aus der v_x - v_z Symmetrieebene heraus.

In dieser Arbeit wird die folgende Nomenklatur zur Beschreibung des Bezugssystems und der Achsenrichtung für dargestellte Messgrößen verwendet:

$${}^{j_2}k_{j_1} \quad (2.1)$$

Hierbei steht k für die betrachtete physikalische Größe, der Index j_1 referenziert auf die betrachtete Koordinatenachse x -, y - oder z -Achse und j_2 beschreibt das genutzte Referenzsystem.

2.2 Fahrdynamik Motorradkurvenfahrt

Motorräder unterliegen prinzipiell denselben physikalischen Zusammenhängen und Einflüssen wie jedes sich bewegende massebehaftete Objekt. In diesem Abschnitt werden die Besonderheiten der Motorradkurvenfahrt, insbesondere aus fahrdynamischer Sicht betrachtet. Die Kurvenfahrt lässt sich dabei in die zwei Zustände, stationäre Kurvenfahrt und instationäre oder dynamische Kurvenfahrt unterteilen.

Die Stationärannahme ist eine rein theoretische Betrachtung, da das Motorrad aufgrund der einspurbedingten Bauweise keine Stabilität über den gesamten Dynamikbereich aufweist.¹⁹ Vielmehr existiert eine Vielzahl destabilisierender und stabilisierender Effekte, die zusammen einen quasistabilen Zustand ergeben. Für tieferegehende Informationen zu Instabilitäten wird auf Fachliteratur wie Stoffregen²⁰ verwiesen.

In dieser Arbeit wird die theoretische Stationärannahme auf Basis des Kräftegleichgewichts in Kurvenfahrt verwendet.

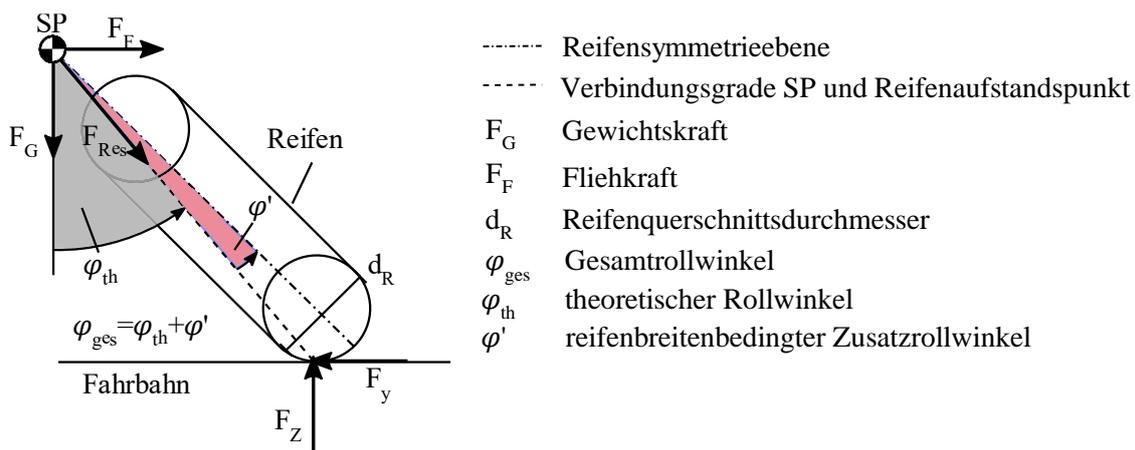


Abbildung 2-2 Schematische Darstellung des Gesamtrollwinkels auf Basis der Annahme der stationären Kurvenfahrt

Der in Abbildung 2-2 dargestellte Zusammenhang beschreibt die Notwendigkeit eines Rollwinkels bei der Kurvenfahrt des Motorrades zum Ausgleich der am Schwerpunkt angreifenden Fliehkräfte. Dargestellt ist die schematische Ansicht eines von hinten in Fahrtrichtung betrachteten, geschnittenen Reifens. Die hier gezeigte Situation ist stabil, wenn die am Schwerpunkt herrschende Fliehkraft und Gewichtskraft mit der am Reifenaufstandspunkt angreifenden Aufstandskraft und Seitenkraft ausgeglichen ist und somit ein Kräftegleichgewicht herrscht. In diesem Fall und unter der Annahme konstanter Geschwindigkeit und

¹⁹ Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 768.

²⁰ Stoffregen, J.: Motorradtechnik (2010).

zustandsänderungsfreier Fahrt ($\dot{\varphi} = 0, \ddot{\varphi} = 0, {}^v a_x = 0$) gilt der folgende Zusammenhang aus Formel (2.2) für den theoretischen Rollwinkel φ_{th} .

$$\varphi_{th} = \arctan\left(\frac{F_F}{F_G}\right) = \arctan\left(\frac{{}^v v_x^2}{g \cdot R}\right) \quad (2.2)$$

Hierbei steht ${}^v v_x$ für die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit, g für die konstante Erdbeschleunigung und R für den aktuellen Kurvenradius. Diese Beziehung stellt den Zusammenhang zwischen dem notwendigen Rollwinkel zum Durchfahren einer Kurve mit definiertem Radius bei der gewählten Fahrzeuggeschwindigkeit dar. Der theoretische Rollwinkel wird wie in Abbildung 2-2 dargestellt durch einen reifenbreitenbedingten Zusatzrollwinkel φ' ergänzt. Durch diesen Zusammenhang weicht der fahrzeugfest gemessene Rollwinkel um den Anteil des Zusatzrollwinkels vom physikalisch wirksamen Rollwinkel φ_{th} ab. Die Literatur gibt für die Abweichung Werte von 10 %²¹ bis 11.5 %²² an. In dieser Arbeit wird aufgrund der Nutzung des gleichen Versuchsfahrzeuges für die Erzeugung der Messdaten wie bei Magiera der dementsprechende Wert $\varphi_{ges} = 1,115 \cdot \varphi_{th}$ verwendet.²²

Sobald das Kräftegleichgewicht verletzt ist, geht die stationäre Kurvenfahrt in die instationäre oder dynamische Kurvenfahrt über. Hier sind Rollrate $\dot{\varphi}$ oder auch die Rollbeschleunigung $\ddot{\varphi}$ sowie die Fahrzeuglängsbeschleunigung ${}^v a_x$ ungleich 0. Dieser instationäre Zustand ist zum Beispiel während der Kurveneinleitung gegeben. Durch das sogenannte „Countersteering“ zum Beginn einer Kurvenfahrt - dem Lenken entgegen der eigentlichen Kurvenrichtung - wird eine Schräglaufseitenkraft am Reifen aufgebracht, die eine einrollende Fliehkraft zur Folge hat. Im weiteren Verlauf der Einrollphase steigt mit der zunehmenden Fliehkraft auch die Sturzseitenkraft am Reifen durch den zunehmenden Rollwinkel weiter an. Durch ein erneutes Aufbringen einer Schräglaufseitenkraft in Richtung der Kurve wird im Verhältnis die Gesamtseitenkraft am Radaufstand geschwächt, wodurch die Rollbewegung gestoppt werden kann. Ab dann herrscht wieder ein quasistationärer Zustand der Kurvenfahrt, das Ausleiten der Kurve geschieht genau umgekehrt.

²¹ Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 769.

²² Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020), S. 7.

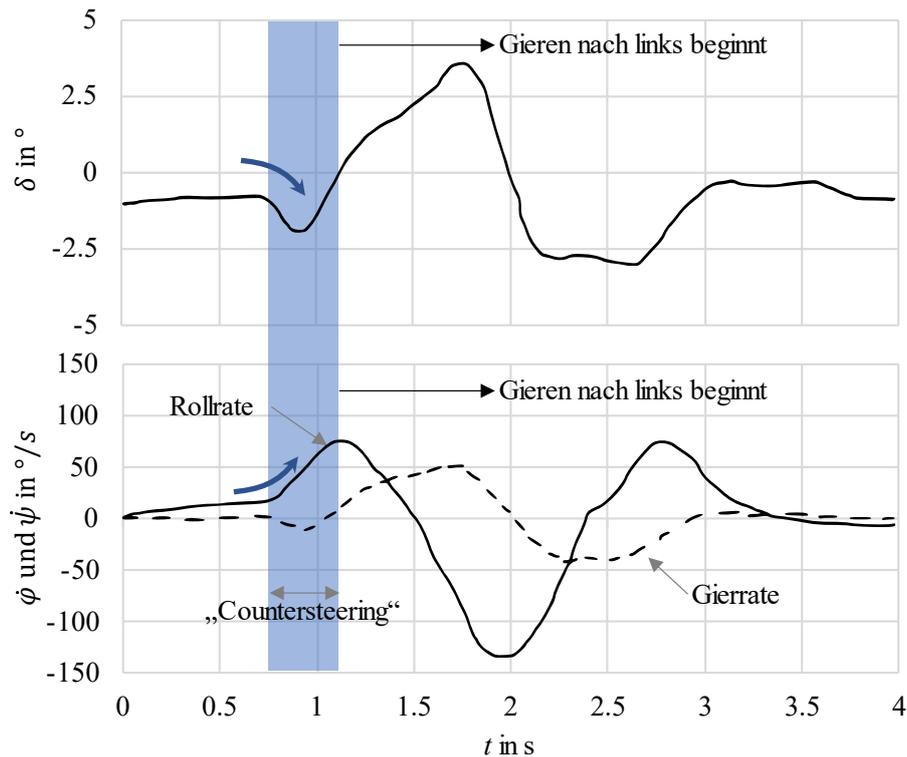


Abbildung 2-3 Beispiel Ablauf einer Kurveneinleitung und Kurvenausleitung, nachgezeichnet nach Cossalter et. al.²³

Abbildung 2-3 stellt anhand einer Messung eines Fahrstreifenwechsel das beschriebene Verhalten der dynamischen Kurveneinleitung und Kurvenausleitung dar. Aus der Geradeausfahrt wird bei ca. $t = 0,75 \text{ s}$ die Kurvenfahrt mit einem Lenken entgegen der gewünschten Bewegungsrichtung begonnen („Countersteering“). Die der Kurvenrichtung entgegengesetzte Bewegung lässt sich auch im Gierratensignal (Abbildung 2-3 unten, gestrichelt) und in der Rollrate (Abbildung 2-3 unten, fett) erkennen.

Die Geschwindigkeit der Kurvenfahrt, und somit der notwendige Rollwinkel zum Durchfahren einer Kurve mit vorgegebenem Radius lässt sich nicht unendlich steigern. Ein begrenzender Faktor hierfür ist der Reifen, der die aus der Fliehkraft und Gewichtskraft resultierenden Kräfte, sowie zusätzliche dynamische Kräfte durch Bremsen und Beschleunigen übertragen muss. Eine Kenngröße für die durch den Reifen übertragbaren Kräfte ist der Reibbeiwert μ . Dieser Wert definiert das maximal übertragbare Verhältnis zwischen der Seitenkraft und der Aufstandskraft vor Verlassen der Haftbedingung.

$$F_y \leq \mu \cdot F_z \quad (2.3)$$

²³ Cossalter, V. et al.: Rider Assistance Systems Testing on Motorcycle Simulators (2006).

Der in Formel (2.3) dargestellte Fall für die Querkraft gilt ebenso für die Längskraft F_x . Wird die Seiten- oder Längskraft über den Grenzwert hinaus gesteigert tritt Gleiten an der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn auf.

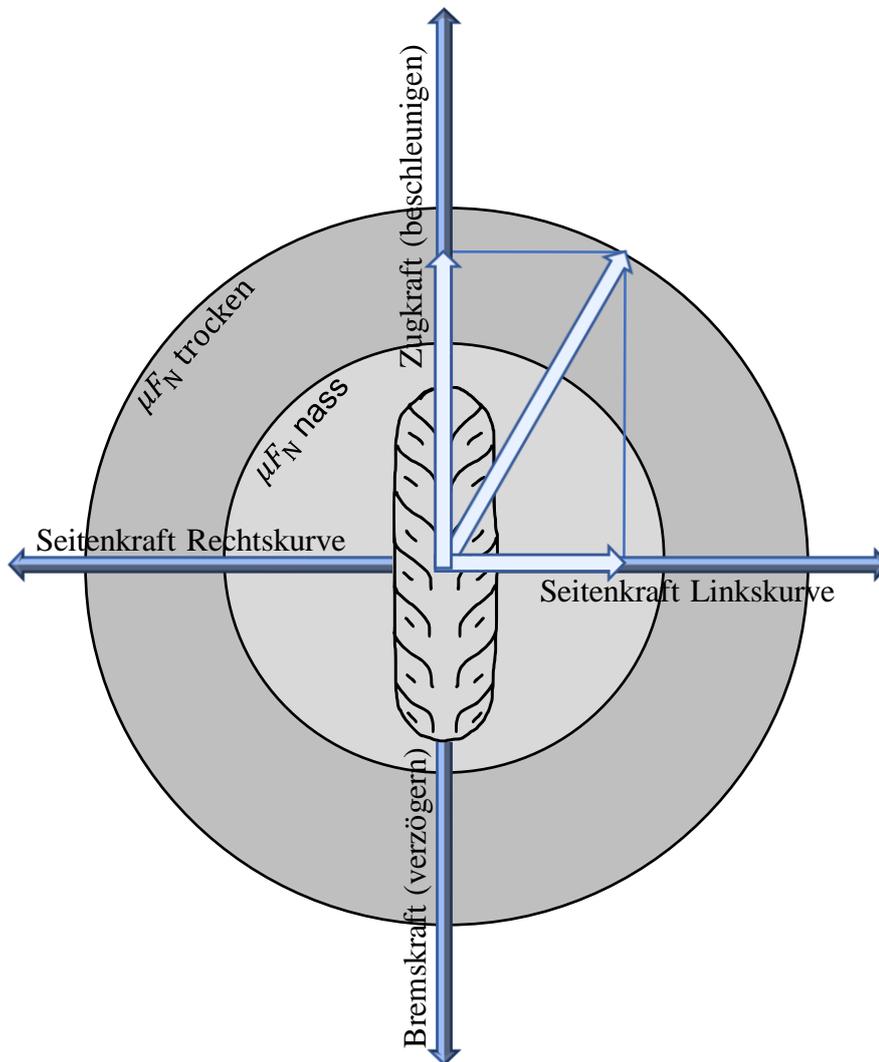


Abbildung 2-4 Kammscher Kreis zur Darstellung der übertragbaren Reifenkräfte in Abhängigkeit des Reibkoeffizienten, nachgezeichnet nach Schütz²⁴

Abbildung 2-4 ist die Darstellungsform des Kammschen Kreises. Diese verbildlicht vereinfacht die übertragbaren Kräfte bei überlagerten Seiten- und Längskräften in Form einer vektoriellen Addition. Die hierfür getroffene Vereinfachung ist die Annahme eines identischen Reifenverhaltens in Längs- und Querrichtung, was aufgrund der nichtlinearen Elastomereigenschaften des Reifens nicht der Realität entspricht.

Der Radius des Kreises ist äquivalent dem Reibkoeffizient μ zu sehen. Moderne Motorradreifen können bei trockenen Bedingungen Reibkoeffizienten bis $\mu = 1,2$ übertragen²⁵, womit

²⁴ Schütz, T.: Aerodynamik des Automobils (2023), S. 912.

²⁵ Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 769.

rechnerisch ein theoretischer Rollwinkel von $\varphi_{th} = 50^\circ$ möglich ist. Aufgrund des Einflusses durch die Reifenbreite wird dieser Werte außer bei Rennstreckenfahrzeugen nicht erreicht.²⁵

Typischerweise tritt vor dem Verlassen der Reifenhaftreibung der Bodenkontakt von Fahrzeugteilen auf. Fußrasten, Auspuffanlagen oder Ähnliches sind meist an Motorrädern so konstruiert, dass diese durch das Aufsetzen den Aufbau weiterer Schräglagen verhindern. Dies kann bauartbedingt auch schon bei Rollwinkelwerten deutlich unter $\varphi_{th} = 50^\circ$ passieren.

Eine Möglichkeit zur Veränderung des tatsächlichen Gesamtrollwinkels während der Kurvenfahrt ist die Verlagerung der Fahrer-Oberkörperneigung in Richtung Kurveninnen- (lean in) oder Kurvenaußenseite (lean out). Im Gegensatz zur Oberkörperposition in der Symmetrieebene des Fahrzeuges (lean with) wird über die Veränderung des Fahrers der Gesamtschwerpunkt aus Fahrer und Fahrzeug verschoben. Der Einfluss der Oberkörperposition auf dem Gesamtrollwinkel des Fahrzeuges ist in der nachfolgenden Tabelle 2-1 dargestellt.

Tabelle 2-1 Einfluss der Oberkörperhaltung auf den Fahrzeugesamtrollwinkel²⁶

Ergebnisse entnommen aus: <i>PS – Das Magazin für sportliche Motorradfahrer</i> ²⁶		Rollwinkel								
		lean in			lean out			lean with		
		Fzg.	Ges.	Δ	Fzg.	Ges.	Δ	Fzg.	Ges.	Δ
Fahrzeug	Honda Fireblade	48°	51°	-3°	46°	43°	3°	45°	45°	0°
	BMW S1000 R	47°	50°	-3°	47°	44°	3°	46°	46°	0°
	Ducati Diavel	41°	44°	-3°	41°	38°	3°	41°	41°	0°
	Husqvarna 701	46°	51°	-5°	57°	51°	5°	47°	47°	0°

Entnommen sind die Werte aus einer empirischen Fahrstudie mit konstanter Kreisfahrt und Kreisradius $R = 55 \text{ m}$.²⁶ Insgesamt werden 4 verschiedene Fahrzeuge eingesetzt, das Ziel der Untersuchung ist das Befahren der Kreisbahn mit größtmöglicher Geschwindigkeit. Die Differenz nach Körperhaltung variiert je nach Fahrzeugmodell, ist aber in keinem Fall größer als $|\Delta\varphi| = 5^\circ$.²⁶

2.3 Motorrad-Fahrdynamikmodellierung

Eines der ältesten bekannten, aber nach wie vor relevanten Modelle zur Beschreibung der Einspurfahrdynamik von Fahrrädern oder Motorrädern ist das Modell von Whipple.²⁷ Die Grundidee ist die Darstellbarkeit eines Motorrades mit einer Anzahl massebehafteter, gekoppelter Körper, zum Beispiel dem an das Lenksystem gekoppelten Vorderrad. Das

²⁶ Jacob, V.; Schwers, K.: Alles über Schräglage (2016).

²⁷ Whipple, F. J.: The stability of the motion of a bicycle (1899).

Lenksystem ist über den Drehfreiheitsgrad um die Lenkachse an den Rahmen gekoppelt. An den Rahmen ist zusätzlich das Hinterrad mit einem rotatorischen Drehfreiheitsgrad gekoppelt.

Im Laufe der Jahre sind verschiedene Variationen auf Basis der Grundidee von Whipple entstanden. Sie lassen sich prinzipiell nach der Menge der Massen sowie getroffener Vereinfachungen hinsichtlich der Kontaktpunkte zwischen Reifen und Straße unterscheiden. Zudem ist eine Unterteilung in lineare oder nicht lineare Modelle möglich. Ein Beispiel einer solchen Anwendung des Modells von Whipple ist in Timoshenko and Young²⁸ zu finden. Die Dynamik des Einspurfahrzeugs wird hier als ein Punktmassmodell beschrieben. Somit werden alle Massenkräfte in einem Schwerpunkt zentriert betrachtet. Die Reifen bzw. Räder werden als masselos und unendlich schmal betrachtet und als Punktkontakt mit der Fahrbahn dargestellt.

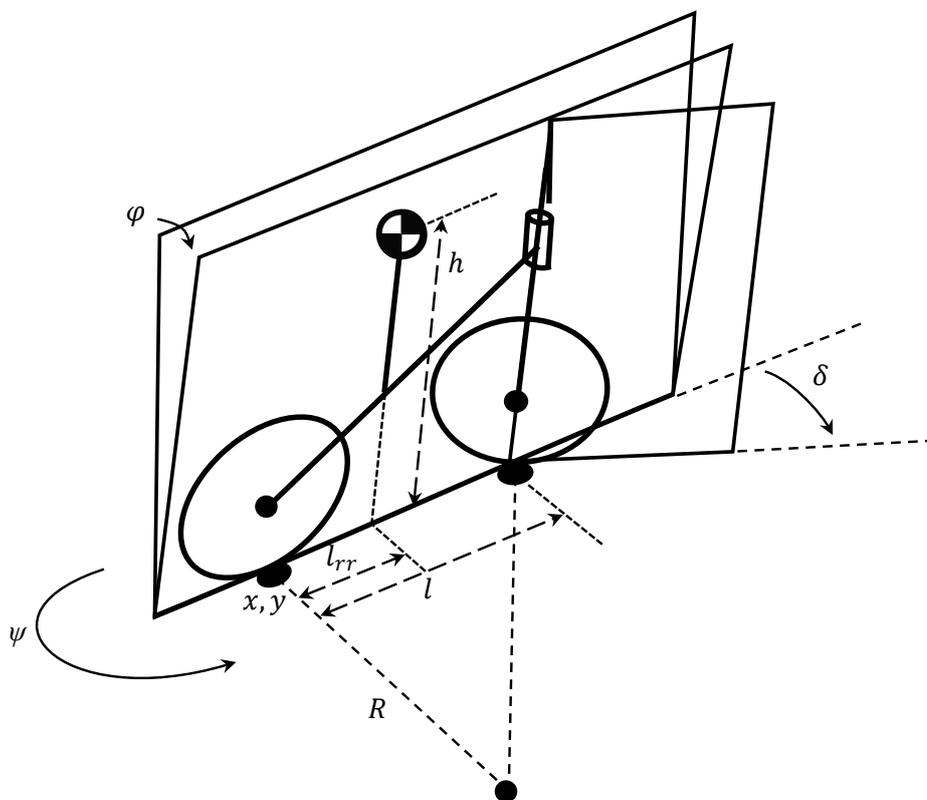


Abbildung 2-5 Stark vereinfachtes Einspur-Fahrdynamikmodell, nachgezeichnet nach Limebeer und Sharp²⁹

Abbildung 2-5 stellt dieses vereinfachte Punktmassmodell mit zugehöriger Schwerpunkthöhe h , dem Abstand des Schwerpunkts zum Hinterrad b und dem Radstand w dar. Zudem

²⁸ Timoshenko, Stephen P., Young, D. H.: Dynamics of a Particle (1948).

²⁹ Limebeer, D. J.; Sharp, R. S.: Bicycles, motorcycles, and models (2006), S. 40.

ist der Rollwinkel φ und der Lenkwinkel δ dargestellt. Beschrieben wird dieses Modell in Letov.³⁰

Ein weiteres Beispiel für ein einfaches, nichtholonomes Modell im Kontext von Regelungssystemen findet sich in Letov, ursprünglich 1961 veröffentlicht. Nichtholonome Modelle, bzw. Bindungsstellen zeichnen sich durch eine Beschränkung der Geschwindigkeit ohne Einschränkung der Lagefreiheitsgrade aus.³¹ Dies findet zum Beispiel Anwendung bei der Modellierung eines schlupffrei rollenden Rades, dessen örtliche Geschwindigkeit am Kontaktpunkt zwischen Reifen und Straße gleich null gesetzt wird.

In Letov wird die Optimierung des Modells zur Interpretation des Selbstlenkphänomens durchgeführt. Ein zeitgemäßer nichtholonomes Modell, ähnlich dem bereits vorgestellten Modell von Timoshenko,²⁸ wird in Getz³² und Getz et. al.³³ eingeführt. Dieses Modell wird von Getz et. al.³³ und Hauser et. al.³⁴ weiterverwendet und zur Übernahme der Bahnverfolgungsaufgabe eingesetzt.

Somit wird deutlich, dass die Grundform des von Whipple eingeführten Modells vielfach weiterentwickelt und insbesondere zur Untersuchung von Stabilitätsfragen genutzt wird. Eine direkte Abbildbarkeit der unterschiedlichen Effekte aus der stationären Kurvenfahrt ist auch durch das erweiterte Modell nicht möglich. In linearisierter Form eignet sich das Modell zur Untersuchung eines Gleichgewichtszustandes, wie der Geradeausfahrt bei konstanter Geschwindigkeit v . Auf den Schwerpunkt wirkende Seitenkräfte oder Fliehkräfte werden vernachlässigt, Reifenkräfte ebenso. Die Grundbedingung des Modells ist das rutschfreie Rollen des Rades auf der Fahrbahn.

Eine Erweiterung des durch Timoshenko und Young³⁵ gezeigten Modells zur Darstellung und Berechnung der stationären Kurvenfahrt wird durch Cossalter et. al.³⁶ eingeführt. Die Anzahl der Massekörper ist ebenfalls gleich vier, in diesem Fall werden alle vier Körper mit eigenen Massen und Schwerpunkten angenommen.

³⁰ Letov, A. M.: Stability in Nonlinear Control Systems (2015).

³¹ Wörnle, C.: Mehrkörpersysteme (2011), S. 241.

³² Getz, N.: Control Balance of Nonlinear, Nonholonomic Bike Model (1994).

³³ Getz, N. H.; Marsden, J. E.: Control for an autonomous bicycle (1995).

³⁴ Hauser, J. et al.: Achievable motorcycle trajectories (2004).

³⁵ Timoshenko, Stephen P., Young, D. H.: Dynamics of a Particle (1948).

³⁶ Cossalter, V. et al.: Steady turning of motorcycles (2007).

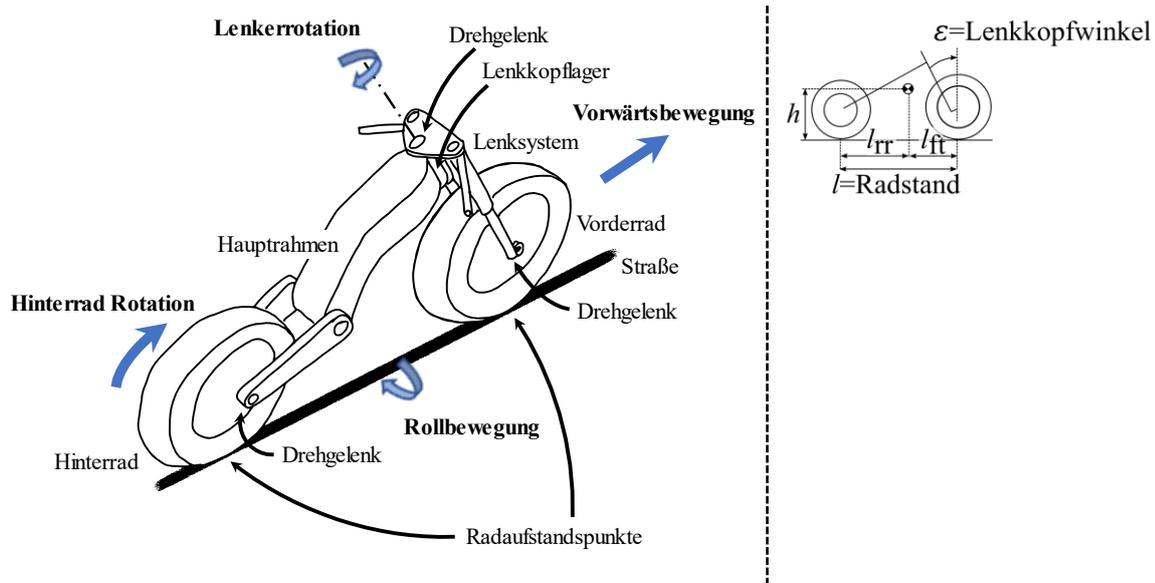


Abbildung 2-6 Links: Bezeichnung und Kopplung der vier Massekörper Vorderrad, Gabel und Lenksystem, Rahmen und Hinterrad, nachgezeichnet nach Cossalter et. al.³⁶, Rechts geometrische Größen Radstand l , Schwerpunkthöhe h und Lenkkopfwinkel ε

Abbildung 2-6 links stellt die vier Körper inklusive Koppelstellen, sowie die Kontaktpunkte der Räder zur Fahrbahn dar. Die Ähnlichkeit zu dem Modell aus Timoshenko und Young ist ersichtlich, zusätzlich wird der Lenkkopfwinkel ε berücksichtigt und der Radstand l in die Anteile Hinterrad l_{rr} bis Schwerpunkt und Schwerpunkt bis Vorderrad l_{ft} aufgeteilt. Durch die Einführung des Lenkkopfwinkels wird in diesem Modell die Darstellung des physikalisch wirksamen Gesamtlenkwinkels, auch kinematischer Lenkwinkel Δ genannt, möglich. Dieser kombiniert den Lenkwinkel δ , den Lenkkopfwinkel ε , den Rollwinkel φ und den Fahrzeugnickwinkel θ zur nachfolgenden Darstellbarkeit des kinematischen Lenkwinkels Δ .

$$\Delta = \arctan \left(\frac{\sin(\delta) \cos(\varepsilon + \theta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) - \sin(\varphi) \sin(\delta) \sin(\varepsilon + \theta)} \right) \quad (2.4)$$

$$\approx \arctan \left(\frac{\cos(\varepsilon)}{\cos(\varphi)} \tan(\delta) \right)$$

Mit dem vorgestellten Modell lässt sich bei bekannter Zugkraft F_{zug} z.B. aufgrund des Motorantriebs die maximale Beschleunigung, unter Berücksichtigung des Reibwertkoeffizienten der Längskraft μ , berechnen.

$${}^v a_x \leq \frac{\mu \cdot g \cdot \frac{(l - l_{rr})}{l}}{1 - \mu \frac{h}{l}} - \frac{F_{zug}}{m} \quad (2.5)$$

Hierbei steht μ für den Reibwertkoeffizienten, l für den Radstand, l_{rr} für den Abstand zwischen Schwerpunkt und Hinterradaufstandspunkt, h für die Schwerpunkthöhe, m für die Fahrzeugmasse und F_{zug} für die Zugkraft. Die Grenzbeschleunigung, bei der das Vorderrad abhebt, ergibt sich entsprechend nach Formel (2.6).

$$v a_{x,\max} = g \frac{l_{ft}}{h} - \frac{F_{zug}}{m} \quad (2.6)$$

Die Berechnung der dynamischen Kräfte mittels linearisierter und vereinfachter Bewegungsgleichungen nach Cossalter³⁷ ist nachfolgend in Formel (2.7) bis Formel (2.12) aufgestellt. Zur Lösung des Gleichungssystems werden acht weitere Hilfsgleichungen, wie in Tabelle 2-2 aufgeführt, benötigt.

$$F_{zug} - F_{S_{ft}} \sin(\Delta) + m \cdot X_{SP} \text{hor} \dot{\psi}^2 - F_W = 0 \quad (2.7)$$

$$F_{S_{ft}} \cos(\Delta) + F_{S_{rr}} + m \cdot Y_{SP} \text{hor} \dot{\psi}^2 = 0 \quad (2.8)$$

$$-F_{N_{ft}} - F_{N_{rr}} + mg = 0 \quad (2.9)$$

$$-I_{YZ} \text{hor} \dot{\psi}^2 - (F_{N_{rr}} + F_{N_{ft}}) Y_{rr} + mg \cdot Y_{SP} + (I_{R_{ft}} \omega_{ft} + I_{R_{rr}} \omega_{rr}) \text{hor} \dot{\psi}^2 \cos(\varphi) = 0 \quad (2.10)$$

$$-I_{XZ} \text{hor} \dot{\psi}^2 - F_{N_{ft}} (l + X_{rr}) + mg \cdot X_{SP} - F_{N_{rr}} X_{rr} + F_W Z_G = 0 \quad (2.11)$$

$$F_{S_{ft}} \cos(\Delta) (l + X_{rr}) + Y_{rr} F_{S_{ft}} \sin(\Delta) + F_{S_{rr}} X_{rr} - F_{zug} Y_{rr} + F_W Y_G = 0 \quad (2.12)$$

Tabelle 2-2: Aufstellung der Eingangsgrößen, Hilfsgleichungen und Unbekannten Größen zur Berechnung der stationären Kurvenfahrt mit dem Modell nach Cossalter.

Bekannte Größen	Hilfsgleichungen	Unbekannte			
Unveränderliche Größen <ul style="list-style-type: none"> $I_{YZ}, I_{XZ}, I_{R_{ft}}, I_{R_{rr}}$ m, l, A $k_{\alpha_{ft}}, k_{\alpha_{rr}}, k_{\varphi_{ft}}, k_{\varphi_{rr}}$ c_W Messgrößen <ul style="list-style-type: none"> $\omega_{ft}, \omega_{rr}, v, \dot{\psi}, \varphi, \delta$ $\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_G$ 	VII $X_{rr} = R \sin(\alpha_{rr})$ VIII $Y_{rr} = R \cos(\alpha_{rr})$ IX $\Delta = \arctan\left(\frac{\cos(\varepsilon)}{\cos(\varphi)} \tan(\delta)\right)$ X $F_{S_{ft}} = (k_{\alpha_{ft}} \alpha_{ft} + k_{\varphi_{ft}} \varphi_{ft}) F_{N_{ft}}$ XI $F_{S_{rr}} = (k_{\alpha_{rr}} \alpha_{rr} + k_{\varphi_{rr}} \varphi_{rr}) F_{N_{rr}}$ XII $\varphi_{ft} = \arcsin(\cos(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\varphi) \sin(\delta) \sin(\varepsilon))$ XIII $\varphi_{rr} = \varphi$ XIV $F_W = \frac{1}{2} \rho \cdot c_W \cdot A \cdot v^2$	α_{ft}, α_{rr} R $F_{N_{ft}}, F_{N_{rr}}$ X_{rr}, Y_{rr} Δ $\varphi_{ft}, \varphi_{rr}$ $F_{S_{ft}}, F_{S_{rr}}$ F_W F_{zug}			
Legende					
I	Fahrzeugträgheitsmoment	$\dot{\psi}, \omega$	Gierrate, Raddrehzahl	R	Kurvenradius
I_R	Radträgheitsmomente	$\varphi, \delta, \varepsilon$	Rollwinkel, Lenk-, Lenk- kopfwinkel	α	Schräglauf
m, l, A	Masse, Radstand, Stirnfläche	k_{α}, k_{φ}	Schräglauf-, Sturz-Seitenkraftbeiwert	F_S, F_N	Seiten-, Normalkraft

³⁷ Cossalter, V. et al.: Steady turning of motorcycles (2007).

v	Längsgeschwindigkeit	c_w	Strömungswiderstand	F_w	Luftwiderstand
$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{SP}$	SP-Lage im Referenzsystem	X_{rr}, Y_{rr}	Hinterradaufstandspunkt	F_{zug}	Benötigte Zugkraft

Alle genutzten geometrischen Fahrzeuggrößen, die Schwerpunktposition, die Trägheit des Fahrzeuges um alle Achsen, die Raddrehzahlen, sowie die Reifenparameter werden als bekannt vorausgesetzt.

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der Fahrdynamik während der Kurvenfahrt eines Motorrades auf Basis der vorgestellten Modelle ist durch Hans et. al.³⁸ vorgestellt. Hier wird das Einmassenmodell wie bei Timoshenko und Young³⁹ um geometrische Größen zur konstruktiven Schrägstellung der Lenkachse erweitert.

Hans et. al. führen zusätzliche Parameter, den Winkel η , der nach der Definition durch Cossalter⁴⁰ $\eta = \frac{\pi}{2} - \varepsilon$ entspricht, sowie die Länge e , die dem Nachlauf entspricht, ein. Hans et. al. nutzen die gleichen Vereinfachungen wie bereits Whipple⁴¹, die Vernachlässigung der Reifenbreite sowie das rutschfrei rollende Rad. Die Dynamik des Fahrzeuges wird über die Beziehung der Bedingung des Gleichgewichtes aus kinetischer Energie und potentieller Energie als Lagrange Funktion in Formel (2.13) dargestellt.

$$L = E_{kin} - E_{pot} \tag{2.13}$$

$$L = \frac{1}{2} J_{\kappa} \dot{\kappa}^2 + \frac{1}{2} m \underline{v}_{SP}^2 - mg[h \cos(\varphi) + \Delta h_G]$$

Hierin stellt J_{κ} das virtuelle Trägheitsmoment der Kurvenfahrt bezüglich der Krümmung κ dar, m die Fahrzeugmasse und \underline{v}_{SP} die Fahrzeuggeschwindigkeit. Die geometrischen Größen sind der Abbildung 2-5 zu entnehmen. Die ersten beiden Summanden der rechten Seite von Gleichung (2.13) repräsentieren die kinetische Energie des Vorderradsystems und des Heckrahmens, der negativ eingehende Anteil ist als die potentielle Energie in Abhängigkeit des Rollwinkels und der Schwerpunkt Lage zu interpretieren.

Mit der zusätzlichen Zwangsbedingung des rollenden Rades, ohne Gleiten bzw. dem rutschfreien Rollen ergibt sich die Zwangsbedingung in Formel (2.14).

³⁸ Hans, S. et al.: A Cascaded Model-Predictive Approach To Motorcycle Safety (2016).

³⁹ Timoshenko, Stephen P., Young, D. H.: Dynamics of a Particle (1948).

⁴⁰ Cossalter, V. et al.: Steady turning of motorcycles (2007).

⁴¹ Whipple, F. J.: The stability of the motion of a bicycle (1899).

$$\dot{\underline{\psi}}_{\substack{\in \mathbb{R}^{m \times 1}}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\kappa & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}(\underline{r}, \underline{s}) \in \mathbb{R}^{m \times n}} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ v_{rx} \\ v_{ry} \\ \dot{\kappa} \end{bmatrix}}_{\dot{\underline{k}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}} = 0 \quad (2.14)$$

Hierbei stehen v_{rx} und v_{ry} für die Radgeschwindigkeit in x - und y -Richtung, \underline{r} repräsentiert den aktuellen Ortsvektor in kartesischen Koordinaten und \underline{s} entspricht der aktuellen Bahnkoordinate, die beide in der Transitionsmatrix \mathbf{A} zusammengefasst werden. Zusammenfassend existiert eine Vielzahl unterschiedlich komplexer Fahrdynamikmodelle, die auch in stark vereinfachter Form die Bekanntheit typischer Fahrzeugparameter voraussetzen.

2.4 Motorradunfallkurven

Auf Basis der Daten der Unfallstatistik in Deutschland von 2020 mit verletztem oder getötetem Aufsassen lassen sich 34,6 % dieser Unfälle in die Kategorie Alleinunfälle einordnen.⁴² Dieser Anteil hat sich seit dem Jahr 2008 kontinuierlich gesteigert. Der Trend lässt sich bis Mitte der 1990er Jahre zurückverfolgen, hier betrug der Anteil der Alleinunfälle ca. 20 %.⁴³ Alleinunfälle sind Unfälle ohne Beteiligung weiterer Personen oder Fahrzeuge.⁴⁴ Der Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft definiert den Unfalltyp etwas anders. Der Unfalltyp Alleinunfall korreliert mit dem Typ Fahrnunfall, der wie folgt definiert ist:

Um einen Fahrnunfall handelt es sich, wenn ein Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug verliert, weil er die Geschwindigkeit nicht entsprechend dem Verlauf, dem Querschnitt, der Neigung oder dem Zustand der Straße gewählt hat.⁴⁵

In Hegewald⁴⁶ wird eine Abschätzung des Zusammenhangs der Streckenparameter mit der Anzahl von Fahrnunfällen gegeben. Hierfür werden 27 unsichere Streckenabschnitte hinsichtlich der sich dort ereigneten Motorradunfälle mit 32 sicheren Streckenabschnitten verglichen. Als unsicher wird definiert, wenn auf dem zu betrachtenden Streckenabschnitt innerhalb des Betrachtungszeitraums von den Jahren 2002-2007 mindestens drei Unfälle mit Motorradbeteiligung und Personenschaden nach Kontrollverlust aufgezeichnet wurden.

⁴² Destatis: Verkehrsunfälle (2023), S. 8.

⁴³ Pöppel-Decker, M.: Zum Unfallgeschehen von Motorrädern (2021), S. 22.

⁴⁴ Berg, F. A. et al.: Passive Sicherheit Zweirad Prüfverfahren (2011), S. 13.

⁴⁵ Ortlepp, J.; Butterwege, P.: Unfalltypen-Katalog (2016).

⁴⁶ Hegewald, A.: Motorradunfälle - Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur (2015).

Kontrollverlust ist in diesem Zusammenhang gleichzusetzen mit der Kategorie „Fahrerfall“⁴⁷

Im ersten Schritt wird auf Basis der vorangegangenen Untersuchungen von Spörner⁴⁸, und Gerlach et. al.⁴⁹ ein Zusammenhang zwischen den als gefährlich definierten Streckenabschnitten und der Kurvigkeit der Strecken betrachtet. Als Kurvigkeit ist die Gesamtwinkeländerung des Abschnitts über der Streckenlänge definiert. Die Kurvigkeit wird mit der Einheit gon/km angegeben, wobei $1 \text{ gon} = \frac{\pi}{200} \text{ rad}$ definiert ist. Die als unsicher definierten Streckenabschnitte weisen mit 316 gon/km im Mittel eine deutlich höhere Kurvigkeit auf als die sicheren Abschnitte mit einer mittleren Kurvigkeit von 87 gon/km. Somit ist ein erster Zusammenhang zwischen Streckenabschnitten mit hoher Kurvigkeit und der Unfallhäufigkeit durch Fahrerfälle von Motorrädern beobachtbar.

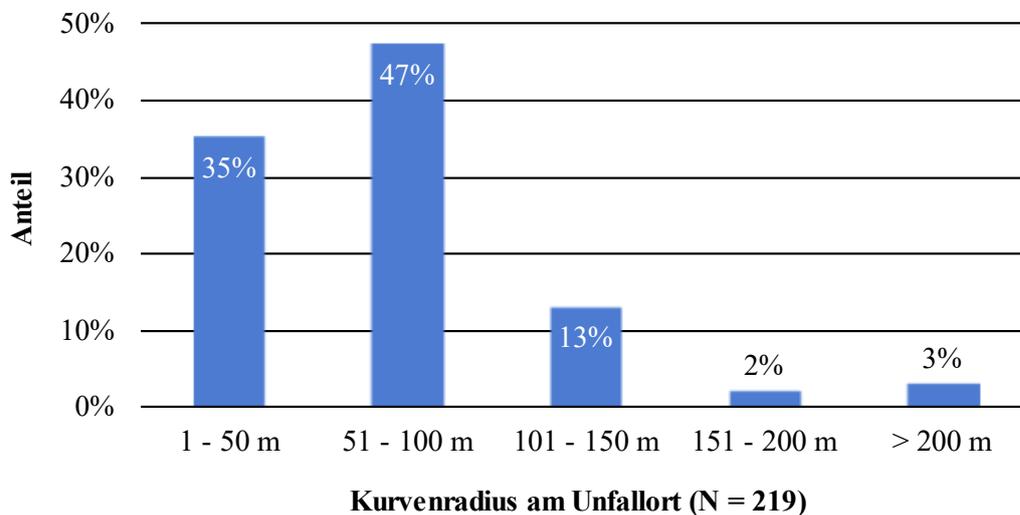


Abbildung 2-7 Verteilung der Kurvenradien bei schweren Motorradunfällen auf ausgewählten Streckenabschnitten, nachgezeichnet nach Hegewald⁴⁷

In einem zweiten Schritt wird in Hegewald⁴⁷ die genaue örtliche Lage der Motorradunfälle auf den als unsicher klassifizierten Strecken untersucht. Hierbei zeigt sich, dass 86 % der Unfälle (N = 219 von N = 254 gesamt) auf diesen Strecken Kurven zuzuordnen sind. Eine Analyse der zugehörigen Radien der Unfallkurven ist in Abbildung 2-7 dargestellt. Hieraus wird deutlich, dass wiederum 82 % der Kurvenunfälle in Kurven mit Radien von $R \leq 100 \text{ m}$ aufzufinden sind.

⁴⁷ Hegewald, A.: Motorradunfälle - Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur (2015), S. 10.

⁴⁸ Spörner, A.: Risiken beim Motorradfahren (2006).

⁴⁹ Gerlach, J.; Oderwald, K.: Fahrbahnrand-Schutzeinrichtungen für Motorräder (2011).

Eine detaillierte Analyse der Ursachen für 48 tödliche Unfälle im Straßenverkehr zwischen 2004 und 2007 durch Bauer 2014⁵⁰ kommt zu einem ähnlichen Ergebnis. 45 % der betrachteten Unfälle ereigneten sich in Kurven, davon 30 % in Linkskurven und 70 % in Rechtskurven. Der mittlere Kurvenradius der Unfallkurven wird durch Bauer et. al. mit $R = 60$ m beziffert. Durch die Analyse der Einzelfälle mit Einsicht in die jeweiligen Polizeiberichte, vorhandene Lichtbilder der Unfallstelle oder Fahrzeuge, der unfallanalytischen Gutachten und auch der Obduktionsberichte werden detaillierte Rekonstruktionen des möglichen Unfallhergangs erarbeitet.

Aus den Ergebnissen lässt sich das folgende typische Unfallgeschehen reproduzieren:

Nach einem Einfahren in die Kurven mit subjektiv zu hoch wahrgenommener Geschwindigkeit und nicht ausreichender Schräglage, teils mit überlagertem Bremsengriff wird der eigene Fahrstreifen tangential verlassen. Anschließend folgt eine Kollision. Der Kollisionspartner kann hierbei ein entgegenkommendes Fahrzeug oder ein anderer harter Gegenstand, wie ein Baum oder Verkehrsschild sein. In 30 % der Fälle wird zur Reduktion der Geschwindigkeit eine Bremsung eingeleitet, welche entweder aufgrund des schockartigen, starken Eingriffs zur Radblockade führt oder aufgrund der fehlenden Kompensation des Bremslenkmoments zu einem Aufstellen des Fahrzeuges führt. In 70 % der Fälle erfolgt kein Bremsengriff vor Verlassen des Fahrstreifens⁵⁰.

Bei den betrachteten Unfällen lässt sich über den gesamten Unfallverlauf hinweg keine Schräglage größer 20° nachweisen. Durch Formel (2.2) lässt sich aus dem Zusammenhang zwischen dem Kurvenradius von $R = 60$ m und dem Schräglagenwert von maximal 20° die maximale Kurvengeschwindigkeit mit $v = 53$ km/h abschätzen.

Zusammengefasst befindet sich die typische Unfallkurve mit schwerer Unfallfolge auf kurvigen deutschen Landstraßen in einem Radiusbereich von $R \leq 100$ m und wird mit Geschwindigkeiten von $v = 53$ km/h bis $v = 68$ km/h gefahren (extrapolierter Wert auf Basis einer Kurve mit Radius $R = 100$ m und einem Rollwinkel $\varphi = 20^\circ$)

⁵⁰ Bauer, K. et al.: Analyse tödlicher Motorradunfälle (2014).

3 Stand der Forschung

Im vorliegenden Kapitel zum Stand der Forschung werden Ergebnisse und Veröffentlichungen aus der aktuellen Forschung und Entwicklung im Bereich der Motorradfahrzeugdynamik vorgestellt.

Das erste Teilkapitel befasst sich mit der Segmentierung und Klassifizierung von Fahrsituationen. Ein möglicher Ansatz ist hier die Unterscheidung zwischen Kurven- und Geradeausfahrt mittels Schwellwerten. Alternativ wird die Segmentierung der Kurvenfahrt in Manöverprimitive präsentiert. Jede Phase einer Kurvendurchfahrt stellt hierbei ein eigenes Primitiv dar. Das Manöver ist in diesem Zusammenhang die jeweils untersuchte Kurve, oder ein entsprechender Streckenabschnitt. Nachfolgend wird eine Klassifizierung von Kurvenfahrten anhand charakteristischer Merkmale des Streckenverlaufs vorgestellt. Ein Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Beschreibung der Fahrerspezifität, wobei die Selbsteinschätzung des Fahrstils einen möglichen Ansatz aus der Literatur hierfür darstellt. Ein weiterer Ansatz im Stand der Forschung wird mit der Klassifizierung der Fahrerspezifität anhand der individuellen Ausnutzung des Quer- und Längsbeschleunigungspotenzials beschrieben. Zur differenzierten Erfassung der Fahrfähigkeit erfolgt zudem die Vorstellung einer Methode zur statistischen Einteilung der Motorradfahrer in Fahrfertigkeitsniveaus.

Im zweiten Teilkapitel liegt der Fokus auf den im Stand der Forschung genutzten Methoden zur Vorhersage oder Prädiktion einer Trajektorie. Hierbei werden sowohl Methoden des maschinellen Lernens als auch die Trajektorienprädiktion mittels Regelabweichung eingehend analysiert.

Im weiteren Verlauf wird der Stand der Forschung für die Bewertung der Durchfahrbarkeit einer Kurve und der Entwicklung von Warnsystemen aufgezeigt. Ziel solcher Systeme ist die frühzeitige Erkennung kritischer Fahrsituationen zur Reaktion mit geeigneten Warnungen im kritischen Fall.

Abschließend wird der sich aus dem Stand der Forschung ergebende Forschungsbedarf in Form der Zielsetzung dieser Dissertation abgeleitet.

3.1 Segmentierung und Klassifizierung der Motorradkurvenfahrt

Für die Analyse aufgezeichneter Fahrdynamikdaten ist zur Reduktion des Auswertungsaufwandes oder der Untersuchbarkeit einzelner Bestandteile der Aufzeichnung eine Segmentierung nach der Relevanz der Daten notwendig⁵¹. Auf Basis der im Kapitel 2.4 beschriebenen

⁵¹ Schellin, A.; Sklenak, S.: Erkennung dynamischer Streckenabschnitte (2020), S. 2.

Häufung von Kurvenunfällen bei Motorrädern ist eine Segmentierung oder Klassifizierung einer Fahrt in Geradeausfahrt und Kurvenfahrt notwendig. Zudem ist für die detaillierte Untersuchbarkeit von Einflüssen während der Kurvenfahrt eine weitere Segmentierung innerhalb einer segmentierten Kurve notwendig.⁵²

3.1.1 Segmentierung in Kurvenfahrt und Geradeausfahrt

Die Motivation eines durch die Bayerische Motorenwerke (BMW) AG angemeldeten und offengelegten Patents von Schellin⁵³ ist die Reduktion des Aufwandes einer manuellen Segmentierung aufgezeichneter Mess- oder Videodaten während der Motorradfahrt. Auf Basis vorangegangener Erfindungsmeldungen wie durch Wenzel⁵⁴ von der Robert Bosch GmbH wird eine Grenzwert- bzw. Schwellwertbetrachtung der Rollwinkelverläufe durchgeführt. Während Wenzel die Messgrößen Rollwinkel und Lenkwinkel betrachtet um eine reine Unterscheidbarkeit von Geradeausfahrt und Kurvenfahrt durchzuführen, wird von Schellin⁵³ hauptsächlich der Rollwinkel als Segmentierungsgrundlage verwendet.

Zitat:

„Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass bei einem Motorrad im Gegensatz zu einem Personenkraftwagen weniger eine Querbewegung als der Schräglagenwinkel einen Hinweis auf einen durchfahrenen dynamischen Streckenabschnitt geben kann.“⁵³

Durch die Hinzunahme der Information über die aktuelle Geschwindigkeit wird die Dynamik der Kurvenfahrt bewertet. Eine hohe Geschwindigkeit mit hohem Rollwinkel entspricht einer hohen Dynamik, während der gleiche Rollwinkel mit niedrigerer Geschwindigkeit einer niedrigeren Dynamik entspricht.^{53, 55} Zusätzlich kann durch die Hinzunahme der Information von Eingriffen durch Fahrdynamikregelsystemen wie dem Anti-Blockier-System (ABS), der darin integrierten Hinterradabhebeerkenkung oder dem Antriebs-Schlupf-Regelsystem (ASR) eine Bewertung der Dynamik der Kurvenfahrt erfolgen. Als dritte Bewertungsgröße der Dynamik wird bei Schellin⁵³ ein Quotient aus dem geschätzten Reibwert und der Schräglage vorgeschlagen.

Über die Fusion und Gewichtung der aufgezählten Bewertungsgrößen und einer Überlagerung mit der subjektiven Fahrerbewertung wird eine Möglichkeit zur Segmentierung aufgezeichneter Mess- und Videodaten vorgestellt.

⁵² Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020).

⁵³ Schellin, A.; Sklenak, S.: Erkennung dynamischer Streckenabschnitte (2020). S.2

⁵⁴ Wenzel, S.; Bari, M.: Kurvenfahrtermittlung Zweirad (2011).

⁵⁵ Anmerkung: Die in diesem Zusammenhang genutzte Definition der Dynamik entspricht nicht dem Verständnis des Autors dieser Arbeit, siehe Kapitel 4.4.2

Eine ähnliche Segmentierungsmethode wird bei Will et. al.⁵⁶ dargestellt. Das Überschreiten eines absoluten Rollwinkels von $\varphi_{th} > 10^\circ$ auf einer Streckenlänge von mindestens 50 m indiziert den Zustand einer Kurvenfahrt. Diese Grenzwertbetrachtung deckt sich mit den Beobachtungen bei Gorges.⁵⁷

3.1.2 Segmentierung einer Kurvenfahrt in Manöverprimitive

In Magiera⁵⁸ wird eine Methodik zur Segmentierung der Motorradkurvenfahrt in einzelne Manöverprimitive vorgestellt. Ist eine aufgezeichnete Fahrt bereits vorsegmentiert in Kurvenanteile und Geradeausfahrt, wird mit der durch Magiera verwendeten Methodik eine weitere Unterteilung jeder einzelnen Kurvenfahrt möglich.

Die Grundidee nach Magiera basiert auf einer Abfolge dynamischer und stationärer Phasen beim Durchfahren von Kurven. Die fahrdynamischen Grundlagen zum Verständnis der Phasen sind in Kapitel 2.3 dargestellt.

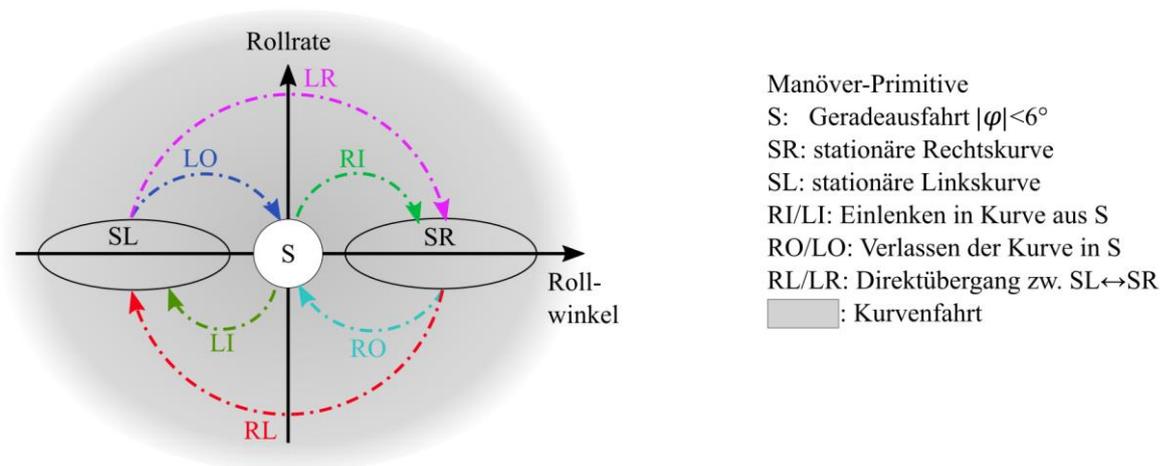


Abbildung 3-1 Segmentierung einer Motorradkurvenfahrt in Manöverprimitive nach Magiera⁵⁸

Abbildung 3-1 verdeutlicht das durch Magiera eingeführte Vorgehen, mit abgewandelter Bezeichnung in der dynamischen Phase der Kurvenausleitung (Original LO = Neu RO, Original RO = Neu LO). Die Änderung der Bezeichnung führt aus Sicht des Autors zur besseren Verständlichkeit der Phasenzusammenhänge. Die Bezeichnung S steht jeweils für stationär, also eine stationäre Geradeausfahrt oder stationäre Rechtskurve (SR), bzw. stationäre Linkskurve (SL). Hieraus ergibt sich die Bedeutung von R für Rechtskurve und L für eine Linkskurve. Eine Kombination von R und L steht dementsprechend für einen dynamischen Kurvenübergang. Die Bezeichnung I und O geben an, ob es sich bei einem dynamischen Primitiv

⁵⁶ Will, S. et al.: Fahrerbeschreibung mit g-g Diagrammen (2020).

⁵⁷ Gorges, C. et al.: Road classification for two-wheeled vehicles (2018).

⁵⁸ Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020).

um eine Kurveneinleitung (I für in) oder Kurvenausleitung (O für out) handelt. In Abbildung 3-1 sind alle möglichen Primitivübergänge einer Kurvenfahrt in einer Darstellung aus der Rollrate über dem Rollwinkel dargestellt.

Zur Segmentierung der Einzelprimitive aus einer zusammenhängenden Fahrt werden in Magiera zwei verschiedene Hidden Markov Modell (HMM) eingeführt. Diese probabilistischen Modelle sind besonders geeignet zur Segmentierung von Zeitreihen mit nicht direkt beobachtbaren Zuständen. Auf Basis beobachtbarer Messgrößen und deren zeitlich vorangegangenen Zuständen lässt sich der nicht direkt sichtbare Zustand modellieren. Im Vergleich eines hierarchischen HMM mit zusätzlichen Einschränkungen möglicher aufeinanderfolgender Primitivübergänge und eines schwellwertbasierten HMM kommt Magiera zu der Erkenntnis, dass beide Methoden ähnlich gute Segmentierungsergebnisse liefern. Aufgrund der geringeren Parameterzahl und der fehlenden Notwendigkeit einer Vorsegmentierung wird für die Zeitreihensegmentierung das hierarchische Modell durch Magiera empfohlen.

3.1.3 Klassifizierung von Kurvenfahrten anhand der Kurvigkeit

Ein weiterer Ansatz zur Segmentierung bzw. Klassifizierung von Motorradfahrdynamikdaten in Kurven wird in Gorges⁵⁹ vorgestellt. Das Ziel von Gorges ist eine Klassifizierung von Streckenabschnitten in besonders kurvige und weniger kurvige Segmente, bzw. der Bewertung der Kurvigkeit eines bestimmten Abschnitts. Hierfür wird - wie in Kapitel 2.2 vorgestellt - der physikalische Zusammenhang des Kräftegleichgewichts in der stationären Kurvenfahrt genutzt. Formel (2.2) aus Kapitel 2.2 aufgelöst nach dem Kurvenradius R bzw. der Kurvenkrümmung κ ergibt die in Gorges vorgestellte Formel:

$$R = \frac{v_x^2}{g \cdot \tan|\varphi_{th}|} \text{ bzw. } \kappa = \frac{g \cdot \tan|\varphi_{th}|}{v_x^2} \quad (3.1)$$

Hier steht v_x für die Fahrzeuggeschwindigkeit, φ_{th} für den theoretischen Rollwinkel und g für den Ortsfaktor. Gorges definiert die Kurvenkrümmung als stets positiv⁶⁰. Zur Segmentierung von Messdaten in Kurven und Geraden muss nach Gorges eine bestimmte Grenzggeschwindigkeit zum Aussortieren von Standphasen überschritten werden.

⁵⁹ Gorges, C. et al.: Road classification for two-wheeled vehicles (2018).

⁶⁰ Dies deckt sich nicht mit der Definition in dieser Arbeit. Negative Krümmung entspricht einer Rechtskurve, positives Vorzeichen der Krümmung einer Linkskurve.

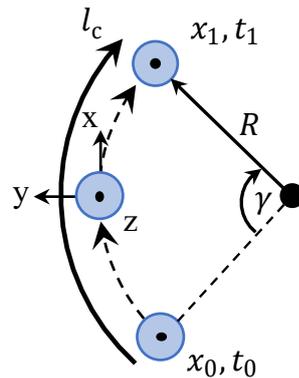


Abbildung 3-2 Geometrische Beziehung zur Berechnung der Kurvigkeit, nachgezeichnet nach Gorges et. al.⁶¹

Als Kurve wird ein mittlerer Kurvenwinkel $\bar{\gamma} > 60^\circ$ definiert. Der mittlere Kurvenwinkel $\bar{\gamma}$ lässt sich dabei über den Zusammenhang nach Formel (3.2) berechnen.

$$\bar{\gamma} = \frac{v_x \Delta t}{\bar{R}} \quad \text{mit } \Delta t = t_1 - t_0 \quad (3.2)$$

Hierbei stehen die Indizes 1 und 0 für das Ende, beziehungsweise den Beginn der Kurve, \bar{R} entspricht dem mittleren Kurvenradius. Abbildung 3-2 stellt die geometrischen Zusammenhänge der durch Gorges genutzten Nomenklatur einer Kurvenfahrt beginnend an Punkt x_0 und zum Zeitpunkt t_0 mit Kurvenradius R bis zum Punkt x_1 und Zeitpunkt t_1 dar. Der zurückgelegte Kreisbogen ist hierbei l_c .

Dieser Zusammenhang beschreibt die Kurvenfahrt als Kreisfahrt mit konstantem Radius. Aufgrund der real vorkommenden Kurven im Straßenverkehr in Klothoidenform zu Beginn und Ende der Kurve definiert Gorges den Parameter c als Kurvigkeit nach Formel (3.3).

$$c = \int_0^{l_c} \kappa(x) dx \quad \text{mit } l_c = x_1 - x_0 \quad (3.3)$$

Die Berechnung der Länge l_c erfolgt hierbei über die Fahrzeuggeschwindigkeit v_x , $\kappa(x)$ entspricht der Kurvenkrümmung in Abhängigkeit der Streckenvariable x . Die Kurvigkeit c wird mit der Einheit Radiant angegeben und entspricht bei einer ideal kreisrunden Kurve dem Kurvenwinkel γ aufgrund der Beziehung nach Formel (3.4):

$$\kappa = \left| \frac{d\gamma}{dx} \right| \quad (3.4)$$

Die Kurvigkeit c berücksichtigt im Gegensatz zur Berechnung mit Mittelwerten die tatsächliche Form einer Kurve. Zur Klassifikation von Kurven schlägt Gorges die Betrachtung des mittleren Kurvenradius \bar{R} , des mittleren Kurvenwinkels $\bar{\gamma}$ und der Kurvigkeit c vor. Um

⁶¹ Gorges, C. et al.: Road classification for two-wheeled vehicles (2018), S. 6.

Streckenabschnitte oder eine definierte Straße insgesamt besser klassifizieren zu können und anhand der Kurvigkeit unterscheidbar zu machen, wird in Gorges^{62a} die Straßenkurvigkeit C eingeführt.

$$C = \int_0^l \kappa(x) dx \text{ mit } l = 1 \text{ km} \quad (3.5)$$

Formel (3.5) zeigt diese auf $l = 1$ km Streckenlänge normierte Kurvigkeit c auf. Durch die Normierung auf die Streckenlänge wird eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Strecken möglich.

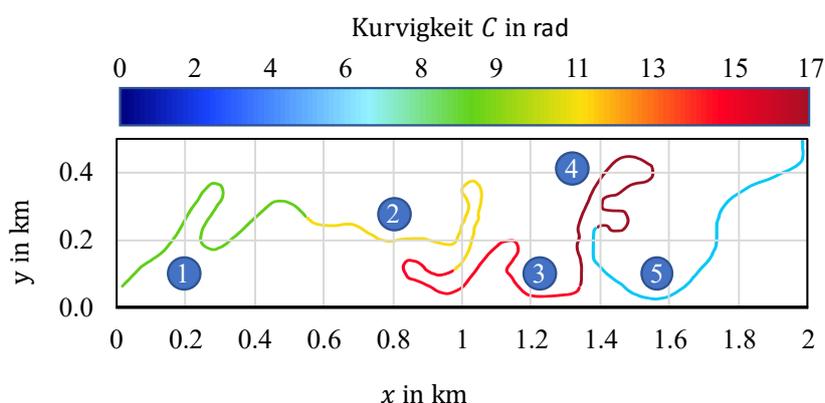


Abbildung 3-3 Beispielhafter Streckenabschnitt, klassifiziert nach der Kurvigkeit C , nachgezeichnet nach Gorges et. al.^{62b}

Abbildung 3-3 stellt einen beispielhaften Streckenabschnitt, klassifiziert nach der durch Gorges vorgestellten Methode dar. Hieraus wird ersichtlich, dass Streckenabschnitte mit geringeren Kurvenanteilen wie (5) mit einer niedrigeren Kurvigkeit C klassifiziert werden als zum Beispiel Abschnitt (4) mit einer hohen Anzahl und stark gekrümmten Kurven.

Zusammenfassend kann mit der in Gorges eingeführten Methode eine Strecke oder eine anhand von Schwellwerten vorsegmentierte Kurve über die Messgrößen des Rollwinkels φ_{th} und der Fahrzeuggeschwindigkeit v_x klassifiziert werden.

3.2 Fahrerspezifität

Der nachfolgende Teilabschnitt behandelt den Stand der Forschung zur Gruppierung oder Bewertung der Fahrerspezifität. Hierfür wird im ersten Teil eine Methodik zu Klassifizierung des Fahrertyps in drei Fahrertypengruppen mittels eines Fragebogens vorgestellt. Die zugehörigen Ergebnisse einer Realfahrtstudie werden aufgezeigt.

⁶² Gorges, C. et al.: Road classification for two-wheeled vehicles (2018). a: S.7; b: S.25

Anschließend wird eine Beschreibung der Fahrerspezifität durch die Analyse der Ausnutzung des Längs- und Querbeschleunigungspotentials präsentiert. Die sich hieraus ergebenden Darstellungen sind einem von drei typischen Mustern zuordenbar.

Im letzten Unterkapitel wird eine Methode zur statistischen Einteilung von Motorradfahrern in fünf Vergleichsgruppen zusammengefasst. Die hierfür notwendigen Kennwerte und deren Berechnungsgrundlagen werden beschrieben.

3.2.1 Selbsteinschätzung des Fahrertyps

Eine Möglichkeit zur Einschätzung der Fahrerspezifität, explizit des Fahrertyps, ist die Befragung der Fahrer selbst hinsichtlich der individuellen und subjektiven Selbsteinschätzung des eigenen Verhaltens. Eine in Scherer⁶³ vorgestellte Methodik zur Eingliederung der Fahrerspezifität in verschiedene Fahrertypengruppen ist die Anwendung eines Fragebogens: „Fragebogen zur Typisierung von Motorradfahrer*innen“. Der Fragebogen ist aufgeteilt in zwei Teilfragebögen, die insgesamt das Ziel der Unterscheidung zwischen sportlichem, konstantem und defensivem Fahrstil verfolgen. Hierbei enthält ein Teil grundlegende Fragen zu dieser Einschätzung, während der zweite Teil ergänzende Fragen hinsichtlich des Erlebens kritischer Fahrsituationen in Verbindung mit der Schräglage enthält.

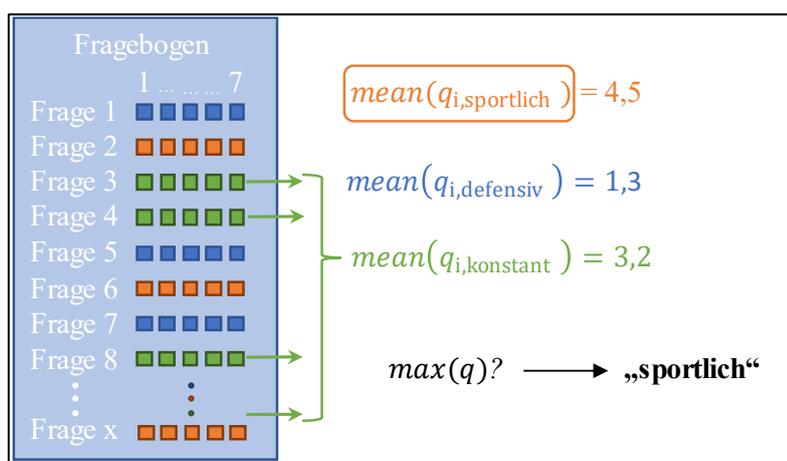


Abbildung 3-4: Beispielhaftes Vorgehen zur Erfassung des Fahrertyps, nachgezeichnet nach Scherer et. al.⁶³

Abbildung 3-4 stellt das Vorgehen zur Kategorisierung des Fahrertyps dar. Die Eingliederung in die drei Kategorien „sportlich“, „defensiv“ und „konstant“ wird durch die Beantwortung und Faktorisierung von insgesamt 24 Einzeleinschätzungen, sog. Items auf einer sieben-stufigen Skala (von 1 trifft nicht zu, bis 7 trifft zu, ohne weiteren verbalen Anker) getroffen. Das Vorgehen ist in Abbildung 3-4, links stilisiert dargestellt. Jedes Item lässt sich

⁶³ Scherer, F. et al.: Schräglagenangst (2021).

einem bestimmten Fahrertypen zuordnen. Beispielhaft ist die Zustimmung eines Fahrers zu dem Item „Ich versuche möglichst sparsam zu fahren“ der Kategorie „defensiv“ zuzuordnen, während die zustimmende Antwort auf das Item: „Nach Möglichkeit nutze ich die Gegenfahrbahn, um dynamischer fahren zu können“ auf einen sportlichen Fahrertyp schließen lässt. Jedes zufällig in der Reihenfolge der Befragung auftretende Item lässt sich gleichverteilt einer der drei Kategorien zuordnen, wodurch sich acht Fragen je Kategorie ergeben. Aus der Bildung des Mittelwertes der Höhe der Zustimmung aller Einzelantworten q_i ergibt sich pro Kategorie ein Wert. Der größte Mittelwert entspricht dem am besten zur befragten Person passenden Fahrertypus, wie am Beispiel in Abbildung 3-4 dargestellt „sportlich“.

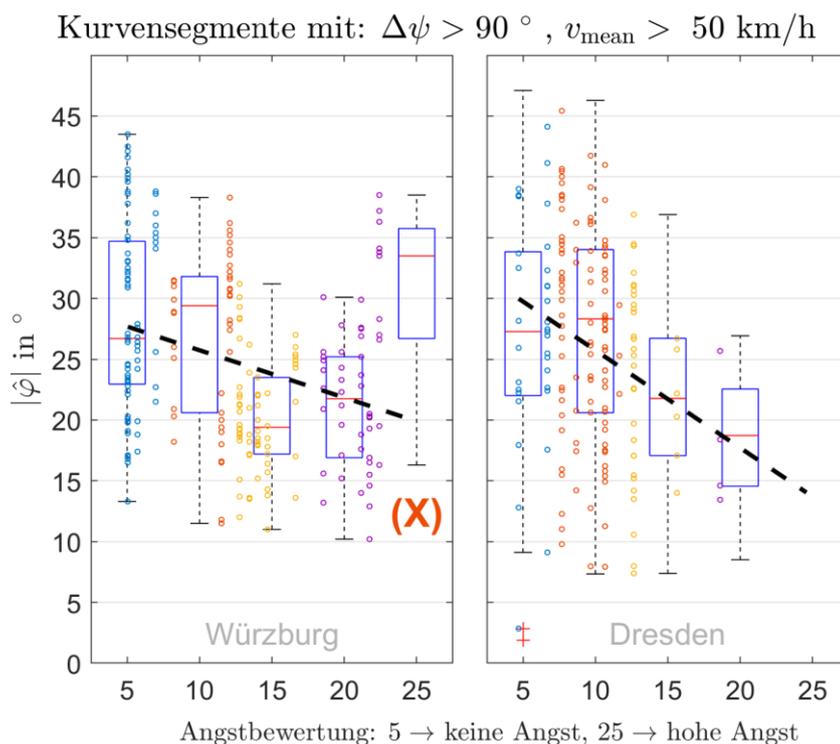


Abbildung 3-5: Zusammenhang zwischen Selbstscheinschätzung der Affinität zur Schräglage in Kurvenfahrt und gemessenen Rollwinkeln in zwei Realfahrtstudien in Anlehnung an Scherer et. al.⁶⁴

Zusätzlich zu den 24 Items zur Erfassung des Fahrertyps werden fünf Fragen zur Einschätzung der eigenen Affinität zur Einnahme von Schräglagen in Kurven in den Fragebogen integriert. Aufgrund der siebenstufigen Skala ergibt sich so ein Wert zwischen 5 ohne Anzeichen einer Angst vor Schräglage und 35 als Indikator für eine geringe Neigung zur Einnahme von Schräglage in der Kurvenfahrt. Die Werte werden anschließend von 35 maximal erreichbaren Punkten auf 25 Punkte normiert. Die Autoren in Scherer et. al.⁶⁴ und Pleß et. al.⁶⁵ führen explizit den Begriff eines schräglagenängstlichen Fahrertyps ein, der unabhängig von der aktuellen Situation das Überschreiten einer Schräglagenschwelle vermeidet.

⁶⁴ Scherer, F. et al.: Schräglagenangst (2021).

⁶⁵ Pleß, R. et al.: Schräglagenschwelle bei Motorradfahrern (2020).

Abbildung 3-5 stellt die Verteilung der gemessenen maximalen Rollwinkeln zweier Realfahrtstudien über die jeweilige Selbsteinschätzung der Schräglagenangst mittels der beschriebenen Methodik dar. Links in der Abbildung sind die Ergebnisse des Studienteils rund um Würzburg, rechts rund um Dresden dargestellt. Die Daten werden vorsegmentiert hinsichtlich des Kurvenwinkels und der mittleren Kurvengeschwindigkeit. Bis auf einen Fall, in Abbildung 3-4 links mit rotem X gekennzeichnet ist im Mittel mit der Zunahme der Angst vor Schräglage eine Abnahme der eingenommenen Schräglage erkennbar. Die dargestellte Ausnahme zeigt, dass eine subjektive Selbsteinschätzung - zum Beispiel aufgrund einer falschen Selbstwahrnehmung - nicht immer mit der Realität korreliert.

3.2.2 Fahrerspezifität anhand der Quer- und Längsbeschleunigung

Eine Alternative zur Selbsteinschätzung wird durch Will et. al.⁶⁶ vorgestellt. Im Rahmen einer Realfahrtstudie mit zwölf Fahrern werden die Fahrdynamikdaten einer achtfach wiederholt durchfahrenen Strecke mit einer Streckenlänge von 78 km statistisch untersucht. Eine Möglichkeit der Unterscheidbarkeit verschiedener Fahrertypen wird hier mittels der Betrachtung der Form sogenannter g-g Diagramme aufgezeigt.

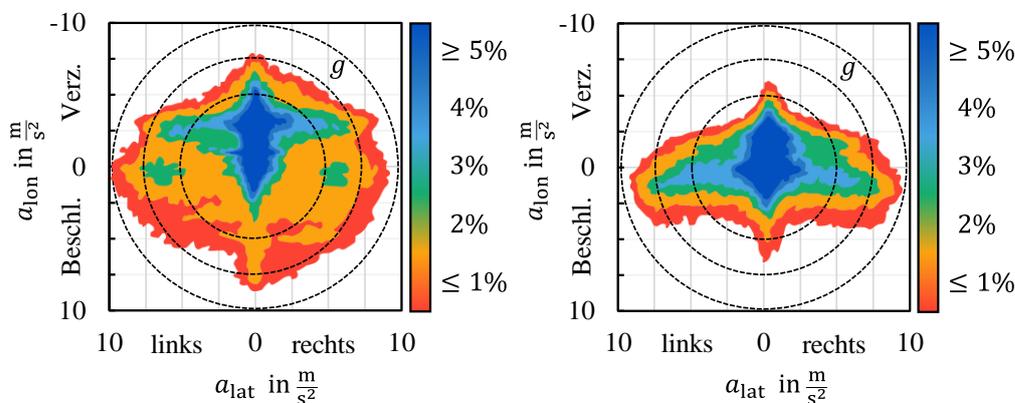


Abbildung 3-6 Vergleich eines professionellen (links) und eines Hobby Motorradfahrers (rechts) über g-g Diagramme, nachgezeichnet nach Will et. al.⁶⁶

Diese Art der Diagramme stellt die longitudinalen und lateralen Beschleunigungen im Verhältnis zueinander dar. In Abbildung 3-6 links dargestellt ist die prozentuale Verteilung der Längs- und Querbeschleunigungen eines professionellen Motorradfahrers im Vergleich zu einem Hobbyfahrer (rechts) bei ähnlichen Randbedingungen. Im dunkelblauen Bereich der Darstellung sind 95 % einer gesamten Messfahrt vorzufinden, der rote Bereich markiert die Anteile der Messfahrt mit maximal einem Prozent Anteil der gesamten Fahrt. Der

⁶⁶ Will, S. et al.: Fahrerbeschreibung mit g-g Diagrammen (2020).

dunkelblaue Bereich rund um 0 stellt die Geradeausfahrt mit leichter longitudinaler Beschleunigung und Verzögerung dar.

Hieraus wird ersichtlich, dass der Profifahrer einen weiteren Bereich des physikalisch verfügbaren Potentials ausnutzt, insgesamt der Anteil besonders großer lateraler, longitudinaler oder überlagerter Beschleunigungen klein ausfällt. Zur Orientierung eingezeichnet ist in diesen Darstellungen die Erdbeschleunigung g . Unter Annahme eines möglichen Reibwertes von $\mu = 1$ stellt das Erreichen dieses Grenzwertes das Annähern an ein rutschendes Rad dar. Der Hobbyfahrer auf der rechten Seite zeigt im Maximum der Querbeschleunigung ähnliche Grenzwerte wie der Profifahrer. Der größte Unterschied zwischen den beiden Fahrern besteht im Bereich der kombinierten Quer- und Längsbeschleunigung, also dem Bremsen oder Beschleunigen in Schräglage. Hier nutzt der professionelle Fahrer einen größeren Wertebereich aus als der Hobbyfahrer. Diese Abgrenzbarkeit zwischen Hobby und Profibereich deckt sich mit den Erkenntnissen aus Biral et al.⁶⁷ und Spiegel⁶⁸. Will definiert das Erscheinungsbild des g-g Diagramms als jeweils fahrertypisch und fahrerindividuell.

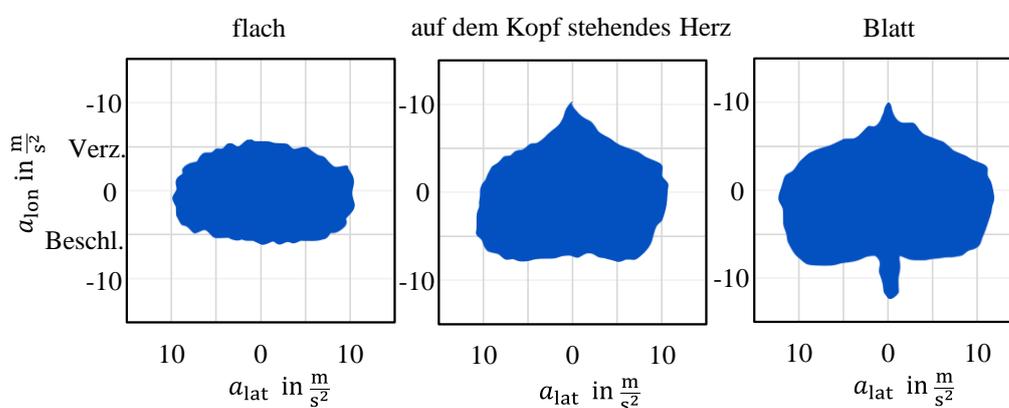


Abbildung 3-7 Klassifizierung in drei Fahrertypengruppen anhand der lateralen und longitudinalen Beschleunigung, nachgezeichnet nach Will et. al.⁶⁹

Weiter wird in Will et al. eine statistische Unterscheidbarkeit und Klassifizierbarkeit von Motorradfahrern in drei Gruppen anhand der Verteilung der longitudinalen und lateralen Beschleunigung⁷⁰ gezeigt. Hierfür wird eine weitere Realfahrtstudie mit weniger kontrollierten Bedingungen in Teneriffa im Rahmen eines Dauertests durchgeführt. Insgesamt 22 Hobbyfahrer werden mindestens einen halben Tag bis maximal 5 Fahrtage auf durchschnittlich geschätzten 650 km Fahrtstrecke pro Tag messtechnisch begleitet.

In

⁶⁷ Biral, F. et al.: Intelligent Curve Warning PTW (2010).

⁶⁸ Spiegel, B.: Die obere Hälfte des Motorrads (2003).

⁶⁹ Will, S. et al.: Fahrerbeschreibung mit g-g Diagrammen (2020), S. 9.

⁷⁰ Längs- und Querbeschleunigung

Abbildung 3-7 sind die drei Klassen flach (links), auf dem Kopf stehendes Herz (Mitte) und Blatt (rechts) dargestellt. Die Klasse „flach“ repräsentiert Fahrer, die im Verhältnis zur Querbeschleunigung insgesamt geringere Werte für die Längsbeschleunigung aufweisen. Die beiden anderen Klassen unterscheiden sich im Vergleich zur Klasse „flach“ durch eine größere Kombination von Längs- und Querbeschleunigung, die Klasse „Blatt“ zeigt zusätzlich noch sehr hohe Werte im Bereich der positiven Längsbeschleunigung.

Die 22 Fahrer werden jeweils nach einem halben Fahrtag einer der drei Gruppen zugeordnet. Bei 17 von 22 Fahrern ist die Zuteilung über den gesamten Messzeitraum eindeutig möglich. fünf Fahrer variieren im Verhalten zwischen zwei Klassen.

Will et al. kommen zu dem Schluss, dass ein g-g Diagramm wie eine Art „Fingerabdruck“ der Fahrerspezifität zu sehen sei.⁷¹ Aufgrund der Einteilung in die drei Klassen mittels visueller Klassifizierung empfehlen die Autoren folgendes Vorgehen für die Zukunft:

“further research is necessary to mathematically describe and separate the different rider profiles, as performed in a visual classification in the first approach.”⁷¹

3.2.3 Statistische Einteilung in Fahrfertigkeitsniveaus

Zusätzlich zur Beschreibung der Fahrerspezifität über die Selbsteinschätzung oder einer visuellen Klassifizierung mittels g-g Diagrammen wird in Magiera⁷² eine Methode zur Klassifizierung von Motorradfahrern in fünf Fahrfertigkeitsgruppen vorgestellt. Bei dem Vergleich der Kurvenfahrten von geübten und ungeübten Fahrern sind Unterschiede im Rollwinkelverlauf und zusätzlich dem Verlauf der Rollrate zu erkennen^{72a}. Zur Quantifizierung entsprechender Zusammenhänge werden durch Magiera statistische Kennwerte definiert. Anhand dieser erfolgt anschließend eine Betrachtung der unterschiedlichen Fahrertypen bei stationärer Kurvenfahrt. Magiera stellt fest, dass insbesondere in der Stationärphase der Kurvenfahrt eine Korrelation zwischen der Frequenz und Amplitude in Rollwinkel und Rollrate im Zeitbereich und der Fahrfähigkeit besteht. Der frequenzbasierte Kennwert des Rollwinkels wird gemäß Formel (3.6)^{72b} definiert.

$$K_{\text{Freq},\varphi} = \sqrt{\int_0^{t_{\text{seq}}} \check{\varphi}_{\text{BP}}(t)^2 dt} = \frac{1}{T_{\text{abta}} \text{st}} \sqrt{\sum_{i=1}^N \check{\varphi}_{\text{BP},i}^2} \quad (3.6)$$

Hierbei steht $K_{\text{Freq},\varphi}$ für den Kennwert (K) des Rollwinkels, berechnet über das zeitliche Integral mit der Sequenzdauer t_{seq} der bandpassgefilterten Messwerte⁷³ ($\check{\varphi}_{\text{BP}}$). Alternativ

⁷¹ Will, S. et al.: Fahrerbeschreibung mit g-g Diagrammen (2020), S. 9.

⁷² Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020). a: S.71, b: S.80

⁷³ Untere Grenzfrequenz: 0,7Hz; obere Grenzfrequenz: 2,2Hz.

lässt sich im diskreten Fall dieser Wert auch über die Summe der gefilterten Signale und der Abtastfrequenz des Messsignals T_{Abtast} berechnen.

Neben dem frequenzbasierten Kennwert definiert Magiera regressionsbasierte Kennwerte. Diese Kennwerte basieren auf einer Regression der Rollraten und Rollwinkel-Messdatenverläufe mit kubischen Splines. Formel (3.7)^{72b} veranschaulicht die Definition der regressionsbasierten Kennwerte am Beispiel der Rollrate.

$$K_{\text{Reg},\varphi} = \sqrt{\int_0^{t_{\text{seq}}} (\dot{\varphi}(t) - S_{\varphi}(t))^2 dt} \cong \frac{1}{T_{\text{abtast}}} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\dot{\varphi}_i - S_{\varphi,i})^2} \quad (3.7)$$

Hierbei steht $K_{\text{RB,Reg},\varphi}$ für den regressionsbasierten Kennwert der Rollrate, $S_{\text{RB},\varphi}$ repräsentiert das Regressionsmodell und $\dot{\varphi}_i$ entspricht der Rollrate über der Sequenzdauer t_{seq} .

Für eine Vergleichbarkeit der Kennwerte unterschiedlicher Fahrer werden diese von nicht fahrerspezifischen Einflüssen bereinigt. Die zu bereinigenden Einflüsse sind die Kurvenlängen l_{Kurve} , der Kurvenwinkel $\Delta\psi$, die mittlere Krümmung $\bar{\kappa}$ und der maximale Rollwinkel φ_{max} des jeweiligen Manövers. Die Bereinigung der Umgebungseinflüsse geschieht in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird eine Korrektur der Kennwerte nach Formel (3.8) vorgenommen.⁷⁴

$$K_{i,\text{corr}} = K_i - c_{\text{corr},1,i} \cdot \varphi_{\text{max}} - c_{\text{corr},2,i} \cdot \bar{\kappa} \dots \\ - c_{\text{corr},3,i} \cdot l_{\text{Kurve}} - c_{\text{corr},4,i} \cdot \Delta\psi \quad (3.8)$$

Hierbei ist $K_{i,\text{corr}}$ der korrigierte Kennwert und K_i der Ausgangswert. Die Parameter $c_{\text{corr},1-4,i}$ stellen die mittels multivarianter Regression bestimmten Zusammenhänge der unkorrigierten Kennwerte mit den Umgebungseinflüssen dar. Im zweiten Schritt erfolgt eine Normierung der korrigierten Kennwerte mittels deren Standardabweichung gemäß Formel (3.9).⁷⁴

$$K_{i,\text{norm}} = \frac{K_{i,\text{corr}}}{c_{\text{corr},5,i}} \quad (3.9)$$

Anhand der eingeführten Kennwerte besteht die Möglichkeit, den Vielfahrer vom Fahranfänger zu unterscheiden. Weiterhin sind die Unterschiede zwischen Links- und Rechtskurven beim Vielfahrer verglichen mit dem Fahranfänger geringer. Dieses Phänomen ist sowohl beim Rollwinkel als auch bei der Rollrate beobachtbar.

Neben der stationären Kurvenfahrt erfolgt durch Magiera eine Untersuchung der dynamischen Anteile der Kurvenfahrt. Ideale Einlenkvorgänge sind als ballistische Bewegungen interpretierbar. Abhängig vom Fahrerfertigniveau sind unterschiedlich ausgeprägte

⁷⁴ Magiera, N.: Dissertation, Fahrertigniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020), S. 82.

Abweichungen von einem ballistischen Verlauf zu erwarten, welche sich in zusätzlichen Minima und Maxima widerspiegeln.^{75a}

Analog zur stationären Kurvenfahrt definiert Magiera frequenzbasierte und regressionsbasierte Kennwerte. Der Untersuchungsschwerpunkt liegt im dynamischen Primitiv der Kurvenein- und Kurvenausleitung auf der Rollrate. Die mathematische Berechnung der Kennwerte ist vergleichbar mit denen der stationären Kurvenfahrt. Insgesamt werden drei regressionsbasierte und ein frequenzbasierter Kennwert definiert.

Wie bei der stationären Kurvenfahrt sind die Vielfahrer von den anderen Gruppen unterscheidbar, eine Differenzierung zwischen den übrigen Gruppen ist hierbei wie bei der stationären Phase nicht möglich.

Eine Zuordnung der erkannten Unterschiede zu Clustern zeigt, dass die stationäre Kurvenfahrt in fünf unterschiedliche Fahrfertigkeitsniveaus einteilbar ist.^{75b}

Die unterschiedlichen Niveaus sind beim frequenzbasierten Kennwert, wie auch dem regressionsbasierten Kennwert eindeutig erkennbar und abgrenzbar. Insgesamt zeigt sich beim regressionsbasierten Ansatz eine stärkere Vermischung der mittleren Fähigkeitsniveaus Niveau zwei bis Niveau vier.^{75c}

Die dynamische Kurvenfahrt ist hinsichtlich der Fertigkeitsebenen in drei Stufen unterscheidbar.

3.3 Motorrad-Trajektorienprädiktion

Nachfolgend werden zwei verschiedene Ansätze zur Vorhersage bzw. Prädiktion einer Trajektorie präsentiert. Ein erster Ansatz nutzt hierfür moderne Methoden des maschinellen Lernens. Hierdurch wird ein kurvenunabhängiges Modell erzeugt, was einen zukünftigen Rollwinkelverlauf auf Basis von 16 Eingangsgrößen vorhersagen kann.

Der zweite Ansatz ist die modellprädiktive Regelung fahrdynamischer Zustände mittels der Minimierung von Kostenfunktionen. Dieser Ansatz ist als Kaskadenmodell auf Basis der drei Ebenen der Bahnplanung, Bahnführung und Stabilisierung nach Donges modelliert.

3.3.1 Tajektorienprädiktion mit Machine Learning

Ziel der Arbeit von Stolle⁷⁶ ist die Erkennung des Fahrerwunsches, als die in naher Zukunft geplante Handlung eines Fahrers. Hierauf aufbauend wird eine prädizierte Trajektorie

⁷⁵ Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020). a: S. 104, b.: S.122, c: 137

⁷⁶ Stolle, K. L. et al.: Trajektorienprädiktion über Rollwinkel mit LSTM Netzwerk (2023).

berechnet. Diese wird über eine Vorhersage der lateralen Dynamik in Form einer Rollwinkelvorschau erzeugt. Der Modellansatz von Stolle beruht auf einem Deep Learning Netzwerk mit Long-Short Term Memory, gefolgt von einem Multilayer-Perceptron-Modell. Stolle definiert dies als übliche neuronale Netzwerkarchitektur für Zeitreihenvorhersagen und beruft sich hierbei auf Altche und de La Fortelle⁷⁷. Der erste Teil des Modells erzeugt aus den 16 Eingangsgrößen des Modells einen nicht beobachtbaren „hidden state“. Das Ergebnis des ersten Modells wird als Eingang an das nachfolgende Multilayer Modell mit serieller und komplett vernetzter linearer Struktur übergeben. Über eine Optimierung der Hyperparameter der Modelle wird das sogenannte „optimale Modell“ erzeugt.

Die Eingangsgrößen umfassen hierbei zusätzlich zu den inertialen Messgrößen um die Roll-, Nick- und Gierachse eine Information über den Bremsdruck vorne, das Lenkmoment, den Lenkwinkel und die Lenkrate, drei Fahreroberkörperpositions-Informationen und die Beschleunigungsdaten in alle Raumrichtungen sowie die Fahrzeuggeschwindigkeit.

Die Prädiktion der Trajektorie benötigt zusätzlich zur Information des Rollwinkels als Modellausgang einen Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit. Für den Modellvergleich mit den gemessenen Ground-Truth Werten von Rollwinkel und Geschwindigkeit wird für die Modelltrajektorie eine konstante Geschwindigkeit angenommen. Über eine einfache Fahrdynamikmodellannahme, ähnlich der in Kapitel 2.3 vorgestellten, wird eine Kurvenkrümmung berechnet. Hieraus ergibt sich die prädierte Trajektorie, die Stolle mit einem Ansatz eines konstanten Rollwinkels und der gemessenen Trajektorie, bzw. den entsprechenden Rollwinkel vergleicht.

Stolle beschreibt, dass der Modellverlauf ungefähr dem realen Verlauf folgt. Die Gesamtdynamik der Ground Truth ist mit dem Modell nicht abbildbar. Der Verlauf des konstanten Rollwinkels zeigt die größte Abweichung zum Messsignal⁷⁸. Dieses Verhältnis ist in ähnlicher Form in der prädierten Trajektorie zu erkennen. Der laterale Fehler übersteigt ab einer Vorhersagedauer von $t = 1,8$ s den Zielwert einer Abweichung von weniger als 2 m zur Ground Truth.

Stolle zeigt weiterhin, dass bei einer Reduktion der Eingangsgrößen des Modells der Fehler zwischen vorhergesagtem und tatsächlichem Rollwinkel wächst. Insbesondere das Fehlen der Fahrerbewegungsinformation und der Größen des Lenksystems verschlechtern die Vorhersagequalität.

⁷⁷ Altche, F.; La Fortelle, A. de: LSTM Network Trajectory Prediction (2017).

⁷⁸ Anmerkung: Was bei einer Annahme eines konstanten Rollwinkels in einer dynamischen Kurvenphase auch wenig verwunderlich ist.

3.3.2 Trajektorienprädiktion mittels Regelabweichung

In Hans⁷⁹ wird ein Weg zur Vorhersage bzw. der Möglichkeit des Folgens einer vorgegebenen Trajektorie aufgezeigt. Das Vorgehen orientiert sich an dem drei Ebenen-Modell nach Donges⁸⁰, wodurch die Fahr-, bzw. Regelungsaufgabe in die nachfolgenden drei Ebenen aufgeteilt wird:

- High Level (Bahnplanung oder Navigation): Hier wird mit einem langen Zeithorizont eine Bahn geplant, zum Beispiel anhand von Navigationsdaten, die der allgemeinen Streckenvorgabe entspricht. Hans geht nicht näher auf diesen Schritt der Planung ein.
- Medium Level (Bahnführung): Durch die Berücksichtigung der aktuellen Verkehrssituation wird die Fahrzeugfahrtdynamik in die Zukunft prädiziert und die zum Folgen der Bahn notwendigen Stellgrößenverläufe des Systems werden generiert. Durch die Nutzung eines modellprädiktiven Ansatzes wird hierdurch für einen kurzen Zeithorizont ein optimales Manöver prädiziert. Basis für die Optimierung können verschiedene Größen wie Fahrkomfort oder Sicherheit sein.
- Low Level (Stabilisierung): Zum Ausgleich von Störungen oder Modellunsicherheiten wird auf dieser Ebene mit einfachen regelungstechnischen Werkzeugen, wie einem PID-Regler oder einem Sliding Mode, eine Rollwinkel- und Geschwindigkeitsfolgeregelung realisiert.

Auf der Stabilisierungsebene stellt Hans einen Ansatz mittels eines PI Reglers zum Folgen einer vorgegebenen Geschwindigkeit vor.

Die Bahnführungsaufgabe unterteilt Hans in zwei getrennte Regelsysteme. Hans führt einen Positionsregler ein, der eine aktuell vorhandene Abweichung der Position des Fahrzeuges von der vorgegebenen Position abbaut. Dieser Regler beachtet zusätzlich die Rolldynamik des Fahrzeuges über einen Sliding Mode Regler.

Der zweite Teil der Bahnführungsregelung wird über einen Modell-prädiktiven-Regler (MPC) realisiert.

⁷⁹ Hans, S.: Störgrößenkompensation und Trajektorienfolgeregelung Motorrad (2022).

⁸⁰ Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle (2009).

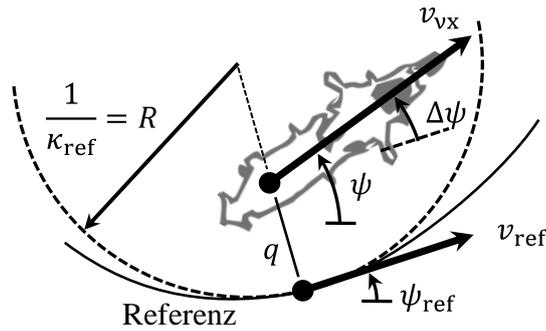


Abbildung 3-8 Abweichung zwischen geplantem und tatsächlichem dynamischem Zustand der Bahnführungsebenen-Regelung, nachgezeichnet nach Hans⁸¹

In Abbildung 3-8 sind die für die Regelung notwendigen Abweichungen zwischen dem geplanten Zustand des Fahrzeuges, der Referenz und dem tatsächlichen Verhalten dargestellt. Die Abweichung lässt sich durch die zwei Differentialgleichungen in Formel (3.10) beschreiben:

$$\dot{q} = v_{ref} \Delta\psi \quad (3.10)$$

$$\Delta\dot{\psi} = v_{ref} (\kappa - \kappa_{ref})$$

Zugrunde liegt dieser Formulierung die Annahme einer schnellen unterlagerten Geschwindigkeitsregelung. Mit der Berücksichtigung der Rolldynamik des Einspurfahrzeugs linearisiert Hans den Zustand um eine vorgegebene Referenz und erzeugt somit ein zeitvariantes, lineares System. Im weiteren Vorgehen wird hieraus ein zeitdiskretes System erzeugt, welches durch Linearkombinationen in beliebige Ausgangsgleichungen überführt werden kann.

$$\Delta\underline{x}_{k+1} = \mathbf{A}_k \Delta\underline{x}_k + \mathbf{B}_k \Delta\underline{u}_k \quad (3.11)$$

Formel (3.11) zeigt die Struktur der zeitdiskreten Darstellung. Hierbei repräsentiert $\Delta\underline{x}_{k+1}$ den zukünftigen Systemzustand, $\mathbf{A}(t)$ entspricht der Dynamikmatrix und $\mathbf{B}(t)$ der Eingangsmatrix der zugehörigen Eingangsgrößen u .

Hans wählt als Ausgangsgrößen die Querablage d ⁸², erweitert um zwei Koordinaten zur Berechnung der Radaufstandspunkte l_1 und l_2 . Diese werden zum Beispiel für eine Kollisionsberechnung benötigt. Weiterhin werden als Ausgangsgrößen der Ausrichtungsfehler $\Delta\psi$, die Krümmungsabweichung $\Delta\kappa$, die Abweichung des Rollwinkels $\Delta\varphi$ und der Rollrate $\Delta\dot{\varphi}$, sowie jeweils die Absolutwerte der drei Größen, Krümmung κ , Rollwinkel φ und Rollrate $\dot{\varphi}$ gewählt. Durch eine Überführung in eine quadratische Kostenfunktionsform und der Berechnung der Teilkosten je Einzelschritt des Vorhersagehorizonts kann in Abhängigkeit der

⁸¹ Hans, S.: Störgrößenkompensation und Trajektorienfolgeregelung Motorrad (2022), S. 40.

⁸² In dieser Arbeit als lateraler Fehler bezeichnet.

gewählten Gewichtungen eine Optimierung mit unterschiedlichem Ziel durchgeführt werden. Zum Beispiel kann hinsichtlich möglichst hoher Sicherheit oder hinsichtlich eines hohen Komforts optimiert werden.

Mit beispielhaft gewählten Gewichtungsgroßen zeigt Hans in seiner Arbeit für einen Vorhersagehorizont zwischen $t = 3$ s bis $t = 5$ s gute Ergebnisse.

Die Abweichungen zwischen berechnetem und gemessenem Rollwinkel sind in allen Phasen gering. Der laterale Fehler zwischen der berechneten und der durch den Regler erzeugten Trajektorie liegt über der gesamten Referenzstrecke bei weniger als $q = 1$ m.

Zusammenfassend zeigt Hans eine Möglichkeit der Trajektorienprädiktion in seiner Arbeit auf, mit der ein vorgegebener Geschwindigkeits- und Rollwinkelverlauf zuverlässig mittels der vorgestellten Reglerstruktur simuliert und mit einem tatsächlichen Fahrzeug abgefahren werden kann.

3.4 Durchfahrbarkeit einer Kurve

Im Bereich der Fahrzeugentwicklung ist die Funktion zur Warnung vor einer möglicherweise nicht mehr durchfahrbaren Kurve in verschiedenen Patentanmeldungen aufzufinden. Hier gibt es wie bei Vogt et. al.⁸³ generalisierte Ansätze einer Warnung vor zu schnell angefahrenen Kurven, aufgrund des Vergleichs einer digitalen Karte, der hieraus berechneten Kurvenkrümmung und der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit. In dieser Veröffentlichung wird die Warnung nur für Kurven ausgegeben, die keine zusätzliche Einschränkung der erlaubten Geschwindigkeit zum Beispiel aufgrund eines Geschwindigkeitslimits aufweisen. Vogt et. al. nutzt zur Warnung bei zu schnellem Anfahren ein Hervorheben der Kurve in einer Kartendarstellung. Lemejda und Niewels⁸⁴ wenden das Warnen vor zu schnell angefahrenen Kurven unter Berücksichtigung der Besonderheit der Motorradfahrtdynamik an. Hier wird ein Fahrer aufgrund des zu erwartenden Überschreitens eines entweder physikalisch grenzwertigen oder individuell zu hohen Rollwinkelwertes gewarnt. Wie eine entsprechende Schwelle vorab ermittelt wird, oder insbesondere das subjektive Verhalten des Fahrers messbar gemacht wird, ist nicht weiter detailliert.

Eine wissenschaftliche Veröffentlichung von Biral⁸⁵ präsentiert den Ansatz eines intelligenten Kurvenwarnsystems für Powered-Two-Wheelers (*PTW*). Biral modelliert hierfür die Fahrdynamik des Einspurfahrzeuges ähnlich der in Kapitel 2.3 vorgestellten Weise. Die Einflussgrößen durch den Fahrer werden in lateraler und longitudinaler Richtung aufgeteilt. Hieraus resultieren die Kontroll- bzw. Regelgrößen der Geschwindigkeit und der Gierrate,

⁸³ Vogt, W. et al.: Warnsystem für eine Kurve (2007).

⁸⁴ Lemejda, M.; Niewels, F.: Fahrassistenzsystem für ein Zweirad zur Schräglagenwarnung (2013).

⁸⁵ Biral, F. et al.: Intelligent Curve Warning PTW (2010).

mit einem Freiheitsgrad um die Rollachse. Zurückgeführt wird dies auf die Eingriffsmöglichkeit des Fahrers über Bremse und Gas auf die Geschwindigkeit und über Lenk-, bzw. überlagerte Lehnbewegung auf die Gierrate. Der Rollfreiheitsgrad resultiert aus der einspur-spezifischen Fahrdynamik. In Yamakado und Abe⁸⁶ sowie Hiraoka et. al.⁸⁷ wird das menschliche Verhalten zur Kontrolle eines Fahrzeuges typischerweise über den Ruck, also die Ableitung der Beschleunigung modelliert. Hierauf aufbauend führt Biral vier zusätzliche Bewertungsgrößen in Form der Ableitung der Gierbeschleunigung, der zugehörigen zweiten Ableitung und der longitudinalen Beschleunigung, sowie der zweiten Ableitung der Geschwindigkeit ein.

Als Lösungsansatz wird in Biral⁸⁵ ähnlich wie bei der Trajektorienprädiktion durch Hans⁸⁸ die Minimierung einer Kostenfunktion durchgeführt. Die Zustandsvariablen werden nach Formel (3.12) definiert,

$$\mathbf{x} = \{\varphi, \dot{\varphi}, \psi, \dot{\psi}, {}^v v_x, {}^v a_x, s, o, \Delta\psi\}^T \quad (3.12)$$

wobei s der Streckenlänge, o dem Schwerpunktabstand zur Streckenmitte und $\Delta\psi$ der Fahrzeugausrichtung relativ zur Straßenausrichtung entspricht. Die Eingangsgrößen des Modells sind $\mathbf{u} = \{{}^v \dot{a}_x, \ddot{\psi}\}^T$, also die Ableitung der Fahrzeug Längsbeschleunigung und die Ableitung der Gierbeschleunigung (Gierruck).

Die zu minimierende Kostenfunktion wird wie in der Formel (3.13) definiert⁸⁵.

$$J(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = W_a({}^v a_x, {}^v v_x, \psi) + W_j({}^v \dot{a}_x) + W_j(\ddot{\psi}) - {}^v v_x \quad (3.13)$$

Hierbei stellt W_a die Einhüllende der Beschleunigung dar. Hierdurch werden fahrerspezifische Grenzwerte, wie in Kapitel 3.2.2 vorgestellt, für longitudinale und laterale Beschleunigungsschwellen berücksichtigt. W_j berücksichtigt die Einflüsse durch die als menschliche Regelgröße bewertete Größe des Rucks. Der letzte Term $-{}^v v_x$ wird eingeführt um bei einer vollständigen Erfüllung der Anforderung eine Geschwindigkeitsinformation bereitzustellen.

Die Kurvenwarnung wird so eingesetzt, dass anhand des über die Optimierung berechneten Verlaufs ein Vergleich zwischen dem aktuellen Zustand und dem prädizierten maximal möglichen Zustand errechnet wird. Unterschreitet ab einem Punkt der Vorhersage der geschätzte zukünftige Wert den des aktuellen Zustands wird eine Warnung ausgegeben. Gut vorstellbar ist dieses Vorgehen über den in Verlauf des Gierrucks, der als Bewertungsgröße herangezogen wird. Liegt die berechnete Differenz im positiven Bereich (der Fahrer ist aktuell langsamer als aufgrund des Modells berechnet möglich) wird keine Warnung ausgegeben. Fällt der Differenzwert des Rucks in den negativen Bereich, wird eine zweistufige Warnung initiiert.

⁸⁶ Yamakado, M.; Abe, M.: Driving Operational Timing with Jerk Sensor (2006).

⁸⁷ Hiraoka, T. et al.: Modeling of driver following behavior based on minimum-jerk theory (2005).

⁸⁸ Hans, S.: Störgrößenkompensation und Trajektorienfolgeregelung Motorrad (2022).

In Huth et. al.⁸⁹ und Biral et. al.⁹⁰ wird durch die Autoren eine Umsetzung und Anwendbarkeit der Methodik auf einem Motorradfahrersimulator und einer Pilotstudie mit zehn Teilnehmern vorgestellt. Hierbei wird darauf hingewiesen, dass korrekte Warnungen ausgegeben werden können, diese jedoch teils zu spät erfolgen.

3.5 Zielsetzung der Dissertation

Aus dem Stand der Forschung ergeben sich vorhandene Methoden zur Segmentierung von Motorradfahrdynamikdaten auf Basis unterschiedlicher Ziele. Die vorgestellten Arbeiten beschreiben Segmentierungsmethoden zur Unterscheidung von Kurven und Geraden, der Aufteilung einer Kurvenfahrt in einzelne Primitive oder der Klassifizierung einer Strecke in besonders kurvige und weniger kurvige Abschnitte. Bekannte Segmentierungsmethoden sollen in dieser Arbeit erweitert werden, so dass typische Unfallkurven einer gesonderten Analyse unterzogen werden können.

Fahrerspezifität lässt sich im Stand der Forschung typischerweise in Form statistischer Kennwerte eines langen Beobachtungszeitraums darstellen. Eine Untersuchung von Zusammenhängen zwischen einzelnen, zum Beispiel möglicherweise kritischen Kurven und dem Verhalten über den Kurvenverlauf hinweg existiert nicht.

Im Bereich der Trajektorienprädiktion existieren Methoden zur Vorhersage des Rollwinkels auf Basis fahrdynamischer Eingangsgrößen. Eine Interpretation des jeweiligen Parametereinflusses ist mit diesem Vorgehen jedoch nicht möglich. Der Ansatz modellprädiktiver Regelung und der Optimierung von Kostenfunktionen sieht typischerweise eine bekannte Referenz als Vergleich oder Basis vor. Es existieren im Stand der Forschung keine Erkenntnisse, wie sich eine solche Referenz auf Basis eines vorausliegenden Manövers und des jeweiligen individuellen Musters beim Durchfahren von Vergleichsmanövern generieren lässt.

Zudem existieren Ansätze zum Warnen vor zu schnell angefahrenen Kurven, jedoch nur auf Basis der bereits genannten statistischen Kennwerte. Auch hier ist keine Berücksichtigung eines bestimmten Manövers im Zusammenhang mit dem typischen Fahrerverhalten bekannt.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die datengetriebene Entwicklung eines Motorradfahrermodells zur Abbildung manöverspezifischen und fahrerindividuellen Verhaltens beim Durchfahren von Landstraßenkurven. Dieses Modell soll in der Lage sein, unter Berücksichtigung der Bekanntheit einer vorausliegenden Kurve und unter Vernachlässigung fahrzeugspezifischer Größen eine Trajektorie zu präzisieren, die verglichen mit der Kurvengeometrie eine Vorhersage der erfolgreichen Durchfahrbarkeit ermöglicht.

⁸⁹ Huth, V. et al.: Comparison of two warning concepts of an intelligent Curve Warning system for motorcyclists in a simulator study (2012).

⁹⁰ Biral, F. et al.: Evaluation Assisting Motorcyclists Safe Bends (2014).

Hierfür werden im Rahmen dieser Arbeit alle notwendigen Anforderungen an die für die Entwicklung notwendige Datenbasis, die Notwendigkeit und Begründung abbildbarer Parameter der Fahrerspezifität und die Anforderung an die Güte der prädizierten Trajektorie hergeleitet. Anforderungen werden zur besseren Übersichtlichkeit unterteilt und über eine eindeutige Nomenklatur benannt in Modellanforderungen *Anf-Mod-...* und Anforderungen an die Datenbasis *Anf-Dat-...*. Die Modellanforderungen untergliedern sich in allgemeine Anforderungen *Anf-Dat-All-...*, Anforderungen an die Fahrerspezifität *Anf-Mod-Fah-...* und Anforderungen an die Trajektorie *Anf-Mod-Tra-...*. Für die Anforderungen an die Datenbasis wird unterschieden in Anforderungen an die (Bewertungs-)Kurven *Anf-Dat-Bew-...* und Anforderungen an die Datenerfassung *Anf-Dat-Erf-...*. Zusammengefasst sind alle Anforderungen noch einmal im Anhang A.6.

4 Methodik und Datenerhebung

Im folgenden Kapitel wird die allgemeine Methodik des Vorgehens erläutert, sowie die Art und Weise der Datenerhebung und Datenvorverarbeitung vorgestellt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden Anforderungen zum Erreichen des Ziels der Arbeit, der Entwicklung eines messdatengetriebenen Motorradfahrermodells hergeleitet. Hierbei wird nach Anforderungen an die Datenbasis, die Abbildbarkeit motorradfahrerspezifischer Größen und der Güte der prädierten Trajektorie unterschieden.

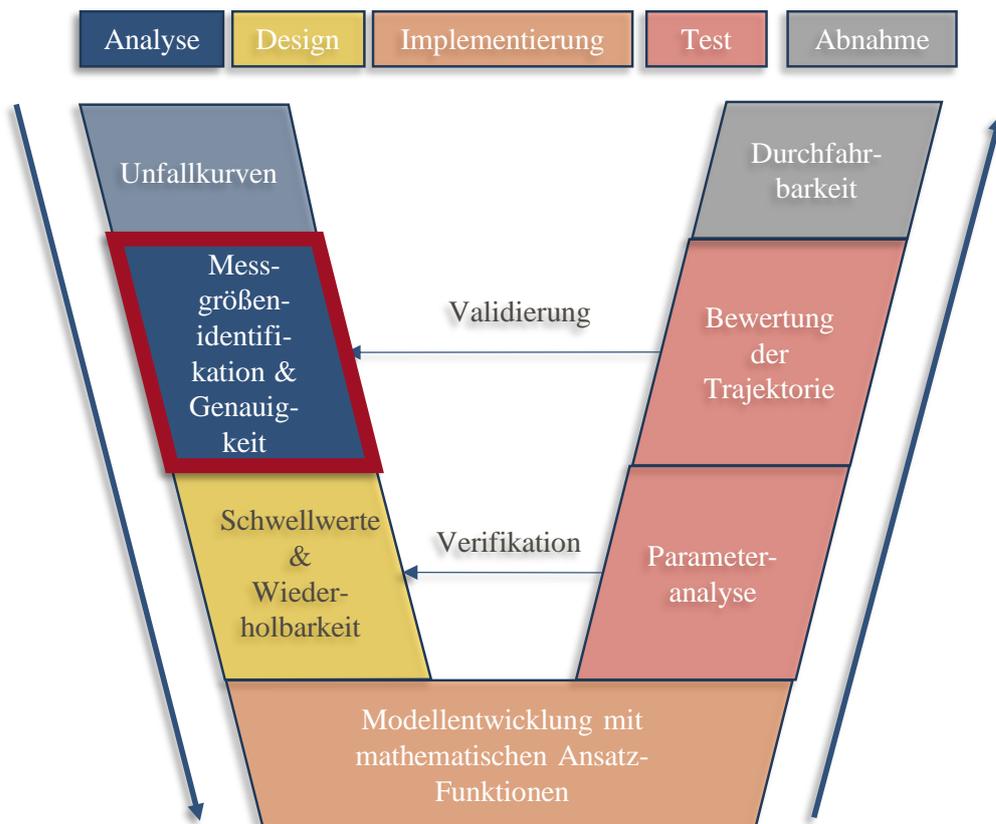


Abbildung 4-1 Kapitel 4, Messgrößenidentifikation und Genauigkeit

Wie in Abbildung 4-1 dargestellt, wird hierfür zunächst die Systemgrenze zur Abgrenzung des entwickelten Modells aufgezeigt. Anschließend werden die für diese Arbeit genutzten Messkonzepte zur Datenerhebung und Validierung vorgestellt, sowie eine Methodik zur Bewertung der Genauigkeit des Systems im Hinblick auf die Validierung erarbeitet. Im Weiteren wird das für die Datenerhebung genutzte Versuchsgelände vorgestellt, sowie die Definition eines Anomalieereignisses eingeführt. Es werden Bewertungskurven definiert, die für die Erarbeitung, Anwendung und Bewertung der Methodik geeignet sind. Zudem wird auf die Auswahl der Probanden für die Datenerhebung und Validierung eingegangen.

4.1 Herleitung der Systemgrenzen

Nachfolgend werden die Systemgrenzen des zu entwickelnden Modells gezogen und die Fahraufgabe wird systematisch in Teilsysteme und ihre Interaktion aufgeteilt. Auf Basis des Zusammenwirkens der verschiedenen Teilsysteme wird eine Struktur zur Messgrößenidentifikation definiert.

Während sich das Modell nach Donges und Rasmussen⁹¹ auf die Entscheidungsebenen einer Handlung konzentriert, ist dies kein zentraler Untersuchungsgegenstand dieser Dissertation. Der Fokus dieser Arbeit ist die Vertiefung des Verständnisses für die interagierenden Teilsysteme beim Motorradfahren, insbesondere der hieraus messbaren Reaktion des Fahrzeuges.

Fahrer und Fahrzeug sowie die Fahraufgabe befinden sich in einer ständigen Interaktion mit der Umwelt. Aufgrund sich ändernder Bedingungen ist der Fahrer gezwungen, Entscheidungen zu treffen. Diese Entscheidungen führen zu einem veränderten Fahrverhalten des Motorrads, was durch Sensorik messbar wird.

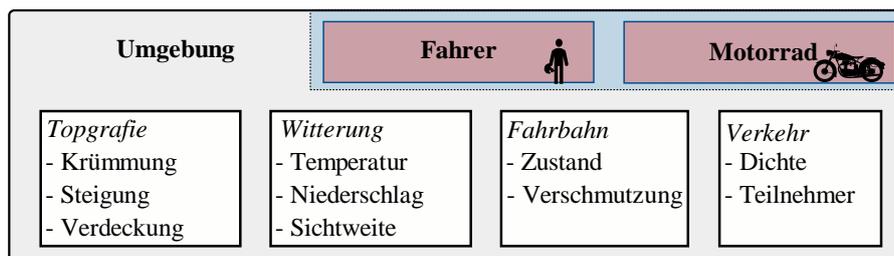


Abbildung 4-2 Umgebungseinflüsse auf Fahrer und Fahrzeug

In Abbildung 4-2 sind typische, beeinflussende Parameter der Umgebung dargestellt. Zu den topografischen Einflüssen zählen die Straßenführung, Steigungen und Kurvenkrümmungen. Innerhalb des topografischen Systems befindet sich das Fahrzeug in einer bestimmten Position und Ausrichtung. Neben den geografischen Gegebenheiten muss die Verkehrsdichte als Umwelteinfluss berücksichtigt werden. Darüber hinaus wirken Witterungseinflüsse auf das Fahrer-Fahrzeug-System. Dazu gehören die Umgebungstemperatur, Niederschlag und wetterabhängige Sichtverhältnisse. Die Art und Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche ist den Umgebungseinflüssen zuzuordnen, die eine Entscheidung des Fahrers beeinflussen. Neben der Beschaffenheit der Fahrbahn und des Belags wirken sich Schmutz und Feuchtigkeit auf den Reibungskoeffizienten aus. Nicht alle Umwelteinflüsse können qualitativ und quantitativ gemessen werden. Dennoch wirken sich die Einflüsse auf die Fahraufgabe aus und verändern in Kombination mit der persönlichen Erfahrung das Verhalten des Fahrers.

⁹¹ Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle (2009).

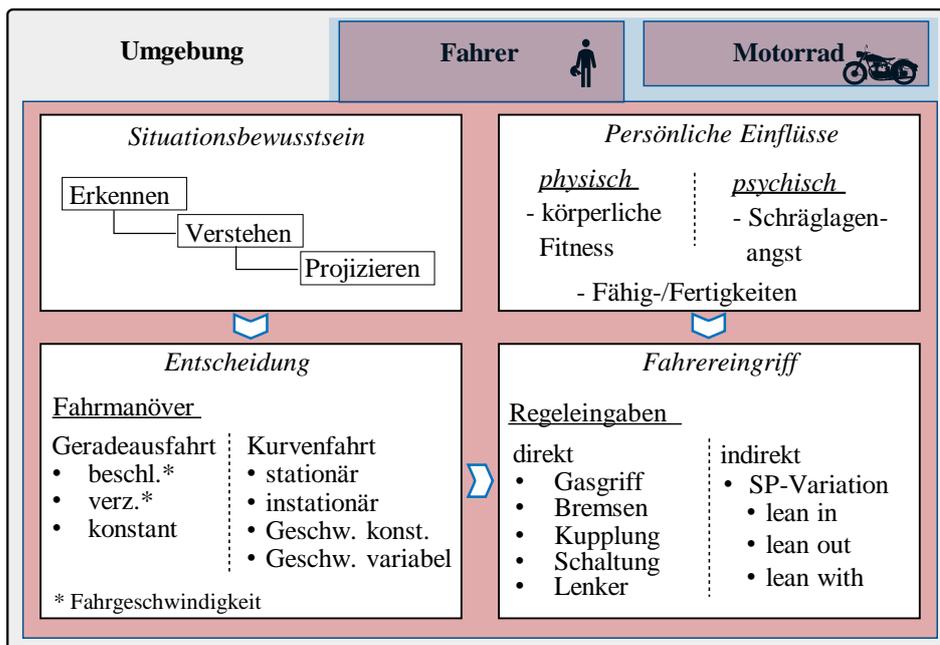


Abbildung 4-3 Teilsystem Fahrer mit Situationsbewusstsein, Entscheidung und Fahrereingriff

Das System des Fahrers ist in mehrere Ebenen und Teilsysteme unterteilt, die teils sequentiell und teilweise parallel laufen. Abbildung 4-3 zeigt das Teilsystem des Fahrers. Es basiert auf Endsleys Modell des Situationsbewusstseins in dynamischen Systemen.⁹²

Das erste Teilsystem für die Durchführung der Fahraufgabe umfasst den Bereich des Situationsbewusstseins. Der Fahrer nimmt die auf ihn einwirkenden Einflüsse der Umwelt und des Fahrzeugs wahr, interpretiert deren Bedeutung und projiziert auf der Grundlage der Eindrücke einen zukünftigen Zustand. Anschließend beginnt die zweite Phase der Entscheidung. Mögliche Handlungsoptionen sind verschiedene Fahrmanöver, aufgeteilt in die Geradeausfahrt und die Kurvenfahrt, jeweils stationärer und instationärer Art. Die Ausführung eines geplanten Fahrmanövers erfolgt über Regeleingaben, aufgeteilt in direkte und indirekte Regelgrößen. Zu den direkten Eingriffsmöglichkeiten zählen Regeleingaben, die über eine dafür vorgesehene Schnittstelle am Fahrzeug eingegeben werden und typischerweise mit geringem Aufwand messbar gemacht werden können. Beispiele hierfür sind der Gasgriff und der Kupplungshebel oder die Bremsbetätigungseinheiten. Zu den indirekten Steuereingaben gehören solche, die keine für diese Funktion vorgesehene Eingabeeinheit aufweisen. Ein Beispiel hierfür ist die Verlagerung des Fahrerschwerpunkts bei Kurvenfahrten. Lehnt sich der Fahrer mit dem Oberkörper in Richtung des Kurvenmittelpunktes spricht man von einem „lean in“, die entgegengesetzte Bewegung des Oberkörpers wird als „lean out“ bezeichnet. Bleibt der Fahrer mit dem Oberkörperschwerpunkt in der Achse aus Reifenaufstandspunkt und Fahrzeugschwerpunkt wird dies als „lean with“ bezeichnet.

Beeinflusst wird der Fahrer bei der Wahl und Größe des Regeleingriffs durch persönliche Einflüsse physischer und psychischer Natur. Die Durchführung der Aktion hängt von

⁹² Endsley, M. R.: Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems (1995).

mehreren Faktoren ab, so dass die Art der Durchführung berücksichtigt wird. Die Leistung, mit der der Fahrer die Steuerungseingaben vornimmt, hängt ebenfalls von physischen und psychologischen Faktoren ab. Zu den physischen Faktoren gehört in der Regel die körperliche Fitness, Motorradfahren erfordert eine gute körperliche Verfassung des Fahrers. Zu den psychologischen Faktoren gehört zum Beispiel ein individueller Schwellwert, der nicht überschritten werden soll (siehe Kapitel 3.2.2).

Neben den fahrerspezifischen Faktoren, die sich auf die Art der Umsetzung beziehen, wirken weitere fahrerspezifische kognitive Faktoren bzw. Einflüsse auf das gesamte Teilsystem des Fahrers ein. Hier ist zum Beispiel die aktuelle Aufmerksamkeit oder der vorherrschende Stresszustand zu nennen. Für eine vertiefte Betrachtung der kognitiven Einflussfaktoren sei auf Holte⁹³ verwiesen. Die Messbarkeit der kognitiven Einflüsse ist nur bedingt und typischerweise indirekt möglich.

Die Eingaben des Fahrers wirken auf das Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystem und lösen in Abhängigkeit der fahrzeugspezifischen Kinematik und der vorherrschenden Umwelteinflüsse eine Reaktion aus. Diese Reaktion äußert sich in Form einer Zustandsänderung des Fahrzeugs. Die veränderte Position und Orientierung im Raum bewirken eine Veränderung der Umweltbedingungen, zumindest in topographischer Hinsicht, so dass der Prozess erneut durchlaufen wird. Abbildung 4-4 zeigt weitere Zustandsgrößen, die sich in Abhängigkeit von den Steuereingaben ändern.

Nach der Definition der Teilsysteme wird deren Zusammenwirken betrachtet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf das Teilsystem beschreibende Zustände mit hieraus resultierenden Auswirkungen auf andere Teilsysteme.

Abbildung 4-4 zeigt die Interaktion der Teilsysteme Umwelt, Fahrer und Motorrad auf. Die Umweltmerkmale werden vom Fahrer erfasst und führen anschließend zu dem bereits beschriebenen Kreislaufprozess auf allen Teilebenen. Die Umgebungsinformationen sind ein wesentlicher Bestandteil für die Durchführung der Fahraufgabe. Für eine Vorhersage des Gesamtsystemzustandes sollten idealerweise alle vom Fahrer wahrnehmbaren Zustände gemessen werden. Dazu gehören zum Beispiel die Verwendung von Kartendaten zur Vorhersage des Straßenverlaufs, die Einbeziehung von Navigationsdiensten zur Erfassung der Verkehrsdichte oder die Verwendung von Daten einer Onboard-Kamera.

Die Kopplung von Fahrer und Fahrzeug, sowie die Lokalisation in derselben Umgebung führen zu den gleichen auf das Fahrzeug wirkenden Umwelteinflüssen wie beim Fahrer. Nicht alle Umwelteigenschaften haben einen direkten Einfluss auf das Fahrzeug selbst. Der wichtigste Einfluss ist der Reibungskoeffizient zwischen der Straßenoberfläche und den Reifen des Fahrzeugs. Dieser ist von den Faktoren Temperatur, Niederschlag, Straßenbelag und Straßenverschmutzung abhängig. Weitere Einflüsse auf das System Motorrad sind zum Beispiel die Umgebungstemperatur und die Steigung, da diese Bedingungen die Motorleistung

⁹³ Holte, H.: Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diss., 2012, Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten und Unfallrisiko junger Fahrerinnen und Fahrer (2012).

und das Beschleunigungspotenzial des Fahrzeugs begrenzen sowie zu einem zusätzlichen Ein- oder Ausfedern führen können.

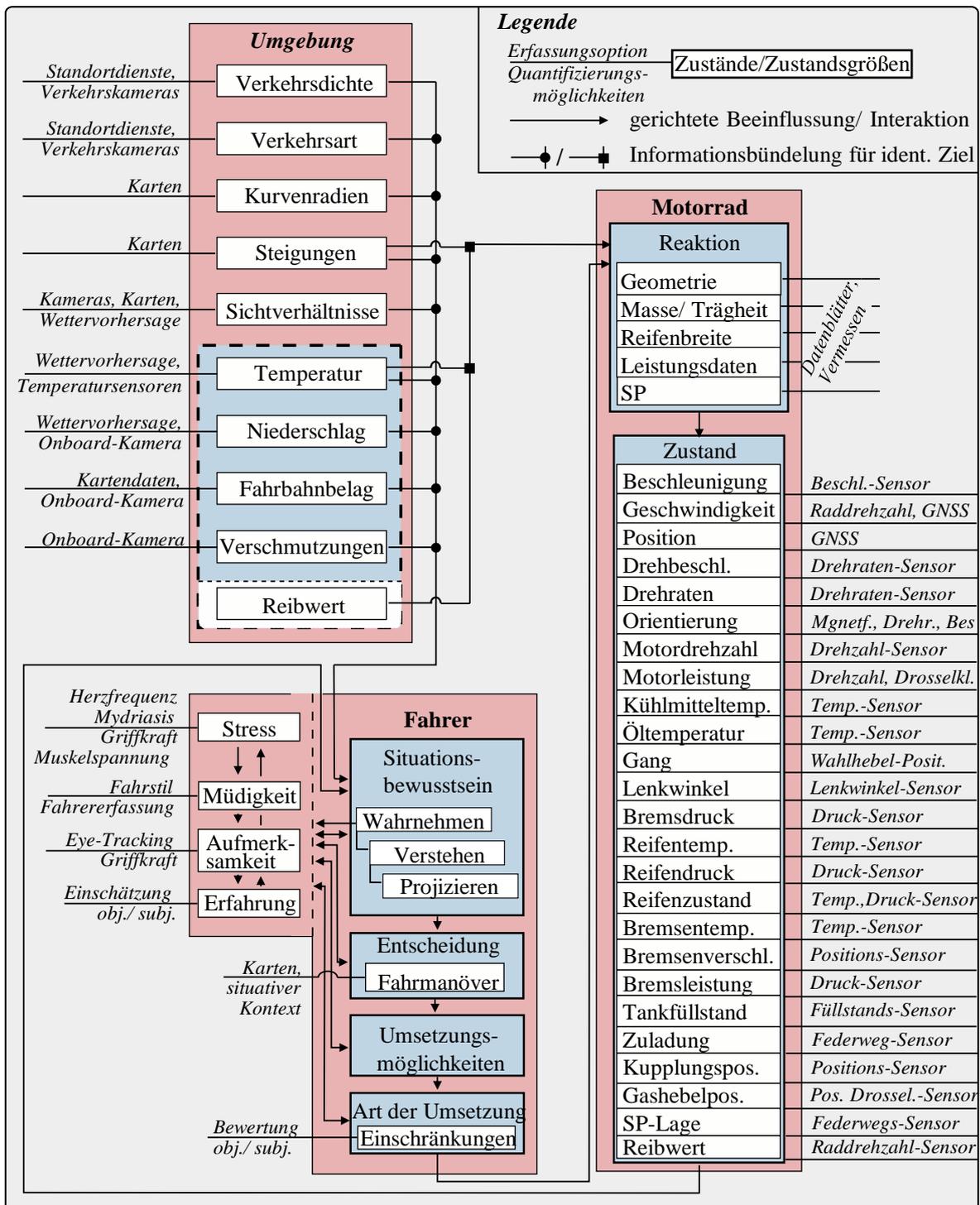


Abbildung 4-4: Interaktion und Messbarkeit der Zustände der Teilsysteme Umwelt, Fahrer und Motorrad

Der Fahrer gibt Regeleingaben an das Fahrzeug. Diese Eingaben verändern den Zustand des Fahrzeugs in Abhängigkeit motorradspezifischer Merkmale. Die Veränderungen des

Fahrzeugzustandes bewirkt wiederum eine Beeinflussung des an das Fahrzeug über Lenker und Sitz gekoppelten Fahrers, zum Beispiel in Form einer Beanspruchungserhöhung aufgrund wirkender Trägheitskräfte auf den Fahreroberkörper beim Beschleunigen. Der Fahrer nimmt die Zustände des Motorrades wahr und erfüllt in Kombination mit den Umgebungszuständen die Fahraufgabe.

Abbildung 4-4 offenbart die Komplexität und Vielzahl der Einflussfaktoren auf die gesamte Fahraufgabe sowie die gegenseitige Beeinflussung der Teilsysteme zur Bewältigung der Fahraufgabe. Da es nicht möglich ist, alle Zustände zu erfassen, erfolgt die nachfolgende Bewertung der Messgrößen/Zustandsgrößen im Hinblick auf die Relevanz für das zu entwickelnde Modell. Dabei wird die Einschränkung berücksichtigt, dass die Zustände auch mit Low Cost Messtechnik erfasst werden können.

Um die Forschungsfragen beantworten zu können, sind zwei Teilbereiche zu untersuchen. Zum einen ist zu ermitteln, welche Zustandsvariablen die Spezifität des Fahrers beinhalten und auf welche Weise diese Individualität abgebildet/berücksichtigt werden kann. Zum anderen muss die zukünftige Position des Fahrzeugs abgeschätzt werden. Im Folgenden wird eine Auswahl der definierten Zustandsgrößen im Hinblick auf die Erfassbarkeit getroffen, da die Möglichkeit der Erfassung eines Zustandes die Grundlage für die Beschreibbarkeit bildet.

Die Einschränkung der Zustandserfassung durch Low Cost Messtechnik bedeutet, dass On-board-Kameras nicht zur Verfügung stehen, um z.B. Reibungswerte zu schätzen oder Sichtverhältnisse zu beurteilen. Dennoch können die allgemein vorhandenen Sichtverhältnisse aufgrund des Straßenverlaufs aus Kartendaten abgeschätzt werden. Witterungsbedingte Sichtbehinderungen können zum Beispiel anhand von Wetterdaten abgeschätzt werden. Der Reibungskoeffizient hängt von mehreren Parametern ab und kann unter den gegebenen Umständen nicht gemessen werden. Daher wird er als bekannt oder gegeben vorausgesetzt. Die initiale Untersuchung ist eingeschränkt auf gute und trockene Straßenbedingungen, bei denen von einem Reibwert von mindestens $\mu = 1$ auszugehen ist.

Neben dem Reibungskoeffizienten stellt der Verlauf der Straße den wichtigsten Umwelteinfluss dar. Dieser kann mit Hilfe von Kartendaten erfasst werden, so dass auch das Fahrmanöver vor dem Fahrzeug als bekannt vorausgesetzt wird. Die Straßenneigung und ihr Einfluss auf das Beschleunigungspotenzial wird in dieser Arbeit vernachlässigt.

Auf Seite des Motorrades (Abbildung 4-4 rechts) und im Hinblick auf die Fahrdynamik ist es möglich, die Bewegung des Fahrzeugs durch die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade zu beschreiben (siehe Kapitel 2.3 Fahrdynamikmodellierung). Die Bewegungsgrößen des Fahrzeugs können mit Hilfe von Low Cost Messtechnik gemessen werden. Durch eine Kombination von Beschleunigungs- und Drehratensensoren lassen sich die Absolutwerte von Roll-, Nick-, oder auch Gierwinkel abschätzen.

Andere Zustandsgrößen zur Beschreibung fahrzeugspezifischer Parameter können mit einer solchen Lösung nicht erfasst werden. So können z.B. für die Reifenbreite oder das Fahrzeuggewicht nur allgemeine Richtwerte als Anhaltspunkte verwendet werden.

Massenträgheitsmomente oder Reifensteifigkeit sind nicht bekannt und daher nicht nutzbar. Darüber hinaus können z.B. Bremsdrücke, Lenkwinkel oder die Kupplungsstellung nicht mit Low Cost Messtechnik erfasst werden und sind daher als zu beschreibende Modellzustände ungeeignet.

Die Zustandsgrößen des Fahrers sind in ihrer Vielzahl derzeit nicht erfassbar oder messbar. Das Ergebnis dieser fahrerspezifischen Eigenschaften lässt sich jedoch in den dynamischen Zustandsgrößen des Fahrzeugs beobachten. So wirkt sich beispielsweise die Art und Weise, wie ein Fahrmanöver durchgeführt wird, auf den maximalen Rollwinkel des Fahrzeugs aus. Dabei ist zu beachten, dass für einen befahrbaren Kurvenradius nicht nur der theoretische Rollwinkel des Fahrzeugs entscheidend ist, sondern auch der Gesamtrollwinkel mit Berücksichtigung der SP-Position des Fahrers. Darüber hinaus ist auch die Fahrzeuggeschwindigkeit ein relevanter Parameter für die Fortbewegung. Rollwinkel und Geschwindigkeit werden vom Fahrer bewusst beeinflusst, um ein bestimmtes Fahrmanöver zu bewältigen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Spezifikation der Erfassbarkeit der Zustandsgrößen durch Low Cost Messtechnik in erster Linie eine Einschränkung der erfassbaren Zustände auf die dynamischen Bewegungsgrößen bewirkt. Die Erkennung vorausliegender Fahrmanöver ist mit Hilfe der Kombination von Kartendaten und der Positionserfassung des Fahrzeugs möglich. Somit werden die Größen Rollwinkel, Geschwindigkeit und Position als zu erfassende Parameter definiert.

4.2 Messkonzepte

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Messkonzepte eingesetzt, mit dem Ziel einer möglichst flächendeckenden Erfassbarkeit einer großen Fahrergruppe. Hierbei wird bereits bei der Entwicklung des Modells unter kontrollierten Bedingungen auf eine Anwendbarkeit der Methodik auch im Straßenverkehr abgezielt. Unter Herleitung der Randbedingungen im vorangegangenen Kapitel wird daher der Fokus auf die Erfassung inertialer Bewegungsgrößen des Fahrzeuges gesetzt. Zusätzliche, fahrzeugspezifische Messgrößen sind für die Interpretation der Ergebnisse wichtig und sinnvoll und werden daher bei der Entwicklung mitefassen. Für die spätere Anwendbarkeit wird jedoch die Anforderung *Anf-Mod-All-1* an die Methodik gestellt, dass keine Notwendigkeit für das Vorhandensein solcher Messwerte besteht.

Hierbei wird nach der Aufteilung durch Prokop 2017⁹⁴ eine Einteilung der Messkonzepte vorgenommen:

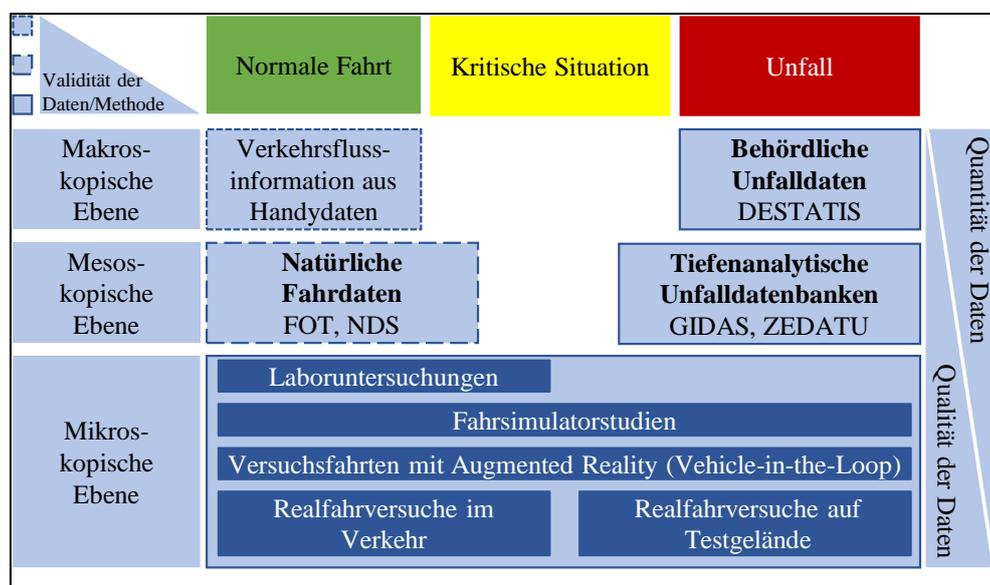


Abbildung 4-5: Datengrundlagen und Untersuchungsmethoden nach Granularität im Verkehr und zeitlichem Ablauf, nachgezeichnet nach Prokop⁹⁴

Zur Analyse der grundlegenden Zusammenhänge innerhalb dieser Arbeit werden hierbei auf der untersten (mikroskopischen) Ebene Daten erzeugt, verbunden mit der Anforderung *Anf-Mod-All-2* der Anwendbarkeit der erarbeiteten Methodik auf mesoskopischer Ebene, insbesondere der Auswertung natürlicher Fahrdaten aus Straßenverkehrsfahrten. Das bedeutet, dass das zu entwickelnde Modell auch außerhalb kontrollierter Testbedingungen und bei reduzierter Datenqualität einsetzbar sein soll.

⁹⁴ Prokop, G. et al.: Bewertungsmethodik automatisierter Fahrfunktionen (2017). S.6

Zur Untersuchung kritischer Situationen wird ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik zur wiederholten Untersuchbarkeit und dem Nachweis der Messbarkeit erarbeitet. Das Ziel dieses Vorgehens ist es im späteren Fahrgeschehen im Straßenverkehr mögliche kritische Situationen zu erkennen und potentielle Unfälle durch gezielte Aufklärung oder gezieltes Training zu vermeiden.

4.2.1 Für Datenerhebung genutzte Messtechnik

Für die Erzeugung von Messdaten, auf deren Grundlage die Entwicklung der Methodik basiert, wird ein Messfahrzeug der Marke Honda, Modell NC700X eingesetzt. Das Datenblatt des Fahrzeuges befindet sich in Anhang A-1 der Arbeit. Die niedrige Sitzposition, ermöglicht auch kleineren Fahrern ein sicheres Führen des Fahrzeuges. Aufgrund der Leistung von 34 kW (48 PS) darf das Motorrad von Besitzern einer Fahrerlaubnis der Klassen A und A2 gefahren werden und ermöglicht so den Zugang zu einer größeren potentiellen Fahrergruppe. Die Gesamtmasse des Fahrzeuges beträgt 218 kg.

Schwerpunktnah im Fahrzeug ist eine inertielle Messeinheit (Inertial Measuring Unit, IMU) des Hersteller XSENS verbaut. Die in dieser Arbeit genutzte Ausführung MTi-G-700 (kurz MTiG) integriert ein Global-Positioning-System (GPS) und entspricht somit einer integrierten GPS/IMU-Lösung. Es ist mit einem werkseitig kalibrierten Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS)-Beschleunigungsmesser und -Gyroskop, einem Magnetometer und einem Barometer ausgestattet. Der GPS-Empfänger unterstützt die Technologie Satellite Based Augmentation System (SBAS), ein System zur Erhöhung der Positionsgenauigkeit durch Zusatzinformationen geostationärer Satelliten über die Integrität der Signale, notwendige Korrekturen der Satellitenuhren oder auch Einflüsse auf die Signalqualität aufgrund atmosphärischer Störungen⁹⁵. Die GPS-Antenne ist extern und außerhalb des Fahrzeuges angeordnet, was eine empfangsoptimierte Montage ermöglicht. Die integrierte Navigationslösung ist in der Lage, die Ausrichtung, Geschwindigkeit und Position des Fahrzeuges zu messen oder zu berechnen. Aufgrund der Verwendung von MEMS-Sensoren und Differential Global Position System (DGPS) mit SBAS gehört dieses System nicht mehr zum Bereich der Low-Cost Messtechnik und liefert eine höhere Genauigkeit der Messdaten als vergleichbare Großserientechnik, zum Beispiel durch die werkseitige Kalibrierung des Gyroskops. Zusätzlich zu der IMU sind analoge Sensoren zur Erfassung von zum Beispiel des Lenkmoments oder der Bremsdrücke vorhanden. Diese Zusatzinformationen werden im weiteren Verlauf jedoch nur zur Interpretation der Eingriffe durch die Probanden verwendet.

In der folgenden Abbildung 4-6 ist das Messfahrzeug mit Montagepunkten der Messtechnik dargestellt.

⁹⁵ Diggelen van, F.: A-GPS (2009).



Abbildung 4-6 Messfahrzeug Honda NC700X inklusive Messtechnik

Die für die Anwendbarkeit der Methodik besonders im Fokus stehenden inertialen Bewegungsdaten, wie sie während der Probandenstudie mit dem beschriebenen Messsystem erfasst werden, sollen zur späteren Bewertung hinsichtlich des Vertrauensintervalls der Datenqualität validiert werden.

Für die Validierungsuntersuchungen wird am Versuchsfahrzeug eine Konstruktion zur Montage einer besonders hochwertigen und präzisen Messtechnik, einer Automotive Dynamics Motion Analyzer (ADMA) der Firma Genesys angebracht. Diese ist während der inertialen Probandenstudie nicht vorhanden, um möglichst keine Veränderung des Verhaltens der Fahrer durch den Eingriff in die Schwerpunktage oder ein besonderes Vorsichtsverhalten aufgrund des Preises des Gesamtaufbaus hervorzurufen.

Die ADMA-Serie ist ein Inertialmesssystem aus der Gruppe der Trägheitsnavigationssysteme. Der ADMA 3.0 ist speziell für Messungen im Automobilbereich geeignet. Er ist mit gegen Schläge oder Erschütterungen schützenden, robusten Faserkreisel-Gyroskopen und Beschleunigungssensoren sowie einem integrierten DGPS mit Wide Area Augmentation System (WAAS)- und Real Time Kinematik (RTK)-Unterstützung ausgestattet.⁹⁶ Ein erweitertes Kalman-Filter führt die Datenfusion von IMU-, DGPS-Daten und optional externer

⁹⁶ GeneSys Elektronik GmbH: Genesys ADMA Bedienungsanleitung (2016), 11 ff.

Geschwindigkeitsdaten durch. Aufgrund der Größe und der hohen Anschaffungs- und Betriebskosten ist er für einen breiten Einsatz nicht geeignet und wird somit der Kategorie der mikroskopischen Ebene nach Prokop⁹⁷ zugeordnet. Seine hohe Genauigkeit und die fortschrittliche Sensorerarbeitung eignen sich gut als Referenzmesssystem zur Bewertung der Leistung anderer Systeme und Sensoren.

In der für die Validierung eingesetzten Konstellation wird auf zusätzliche externe Sensorik zur Bestimmung der Geschwindigkeit oder des barometrischen Luftdrucks verzichtet. Zur Optimierung der GNSS-Empfangsqualität wird der *Global System for Mobile Communications* (GSM) basierte Datenkorrekturservice der Firma Genesys, sowie entsprechende Post Processing Software des Anbieters verwendet.

Für die spätere Anwendbarkeit der Methodik und des Modells, sowie die prototypische Erprobung im Straßenverkehr wird eine massentaugliche Messtechnik der Firma RideLink, die spezifisch auf Motorradfahrtdynamik adaptiert ist, eingesetzt. Sie ist dem Bereich der Low-Cost Messtechnik zuzuordnen. Die Messtechnik besteht aus einem Linux basierten Rechner, der die Sensorinformationen aus einem GNSS Modem des Herstellers Quectel mit IMU Messdaten einer 6-Achsen MEMS Sensorik des Herstellers NXP fusioniert. Über einen „extended Kalman Filter“ (EKF) werden die Sensordaten mit den GNSS Daten fusioniert und somit eine Schätzung des Fahrzeugrollwinkels durchgeführt. Durch die Nutzung verschiedener Satellitensysteme wie GPS, GLONASS oder Galileo ist eine Positionsgenauigkeit von maximal einem Meter erreichbar.

Als Anforderung *Anf-Mod-All-3* an die Modellentwicklung ergibt sich die Unabhängigkeit von der genutzten Messtechnik für eine spätere individuelle Einsetzbarkeit des Modells.

4.2.2 Methodik zur Bewertung der Güte der Positionsmessung

Die im vorherigen Kapitel vorgestellte Messtechnik wird hinsichtlich der erreichbaren Datenqualität explizit dem Vertrauensbereich der Positionsmessung bewertet. Die nachfolgend vorgestellte Methodik zur Untersuchung der Messgenauigkeit ist hierbei übertragbar auf jedes Messsystem mit Positionsmessung. Ziel dieses Vorgehens ist die Vergleichbarkeit und Bewertbarkeit der Positionsgenauigkeit von Messsystemen.

⁹⁷ Prokop, G. et al.: Bewertungsmethodik automatisierter Fahrfunktionen (2017).

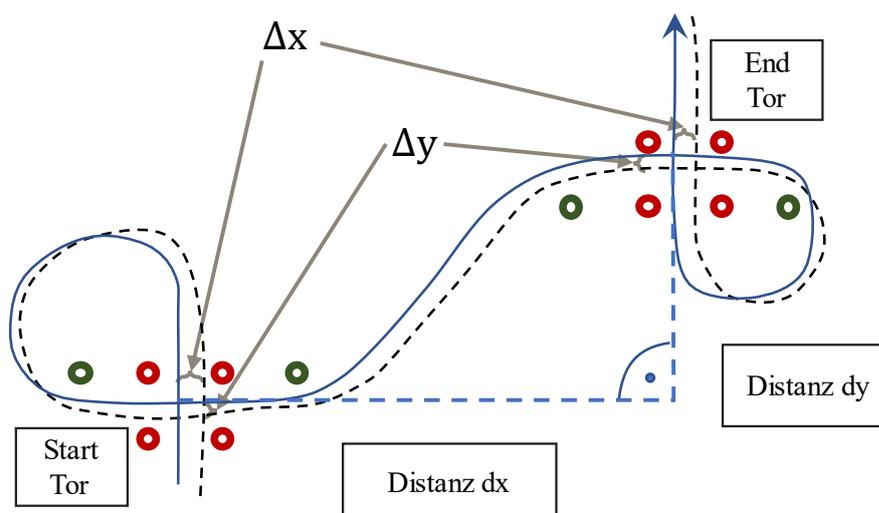


Abbildung 4-7 Methodik zur Bewertung der Güte der Positionsmessung

Abbildung 4-7 verdeutlicht die Methodik zur Messung der Güte der Positionsgenauigkeit. Es werden ein oder wie hier gezeigt mehrere Messkreuze aufgebaut (in der Abbildung rot dargestellt). Hierfür werden jeweils vier Markierungen, zum Beispiel Pylonen mit gleichem Abstand zueinander aufgestellt. Hieraus ergibt sich jeweils ein gleichseitiges Viereck, das aus verschiedenen Seiten angefahren werden kann. Der Abstand zum jeweils nächsten Messkreuz, sowie die Anordnung insgesamt werden je nach Anwendungsfall variiert. Die hier blau eingezeichneten Markierungen dienen als Führungshilfe zur Orientierung für eine möglichst gerade, beziehungsweise um 90° versetzte Einfahrtrichtung zur Ausfahrtrichtung.

Das Prinzip beruht auf einer wiederholten Durchfahrung eines definierten Punktes aus verschiedenen Richtungen, woraus sich jeweils ein Kreuzungspunkt der gemessenen Trajektorie ergibt. Die relative Abweichung der Punkte zueinander sowie der Mittelwert aller ermittelten Kreuzungspunkte lassen sich als Messunsicherheit der Positionsmessung interpretieren. Bei der Bewertung der Ergebnisse muss der Pylonabstand mit berücksichtigt werden.

Wie im hier gezeigten Beispiel kann zwischen zwei Messpunkten ein dynamisches Manöver integriert werden. Dies ist insbesondere bei der Untersuchung der Positionsgenauigkeit von Messungen während des Motorradfahrens sinnvoll. Aufgrund der hohen Dynamik während einer Kurvenerleitung oder -ausleitung mit hohen Änderungen in allen Sensormesswerten wird in dieser Arbeit ein solches dynamisches Manöver gewählt. Mit einer Distanz $dx = 24 \text{ m}$ und $dy = 12 \text{ m}$ entspricht das dynamische Manöver zwei aneinandergereihten Kurven mit einem Radius von $R = 12 \text{ m}$. Alternative Manöver sind zum Beispiel ein Slalom zur Überprüfung der Gierstabilität der Sensorik, oder eine längere kurvenreiche Fahrt mit der sowohl die Positionsgenauigkeit bei erneutem Durchfahren desselben Punktes, wie auch die Präzision der Gierwinkelmessung bestimmt werden kann.

Die hohe Dynamik in den Drehraten und Beschleunigungswerten führt zu einer zu erwartenden Auswirkung auf Sensorfusionsalgorithmen, die - wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben -

typischerweise in einem Messtechniksystem zur Nachverarbeitung von Positionsdaten eingesetzt werden.

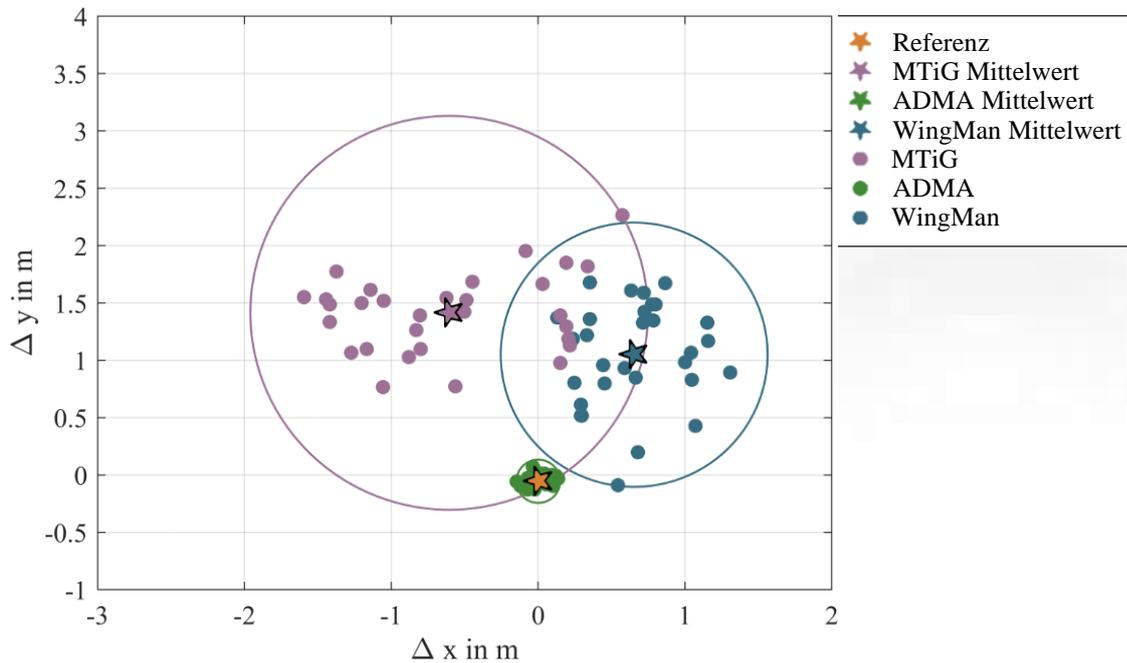


Abbildung 4-8 Ergebnisse der Positionsmessungsgüte, Vergleich der drei Messkonzepte, Mittelwerte und Einzelmessungen am End Tor

Die drei verschiedenen Messkonzepte werden wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben gleichzeitig auf dem Messfahrzeug montiert. Über einen Zeitraum von insgesamt $t = 8 \text{ h}$ wird das in Abbildung 4-7 dargestellte Manöver insgesamt 30-fach durchfahren, zwischen jeder Durchfahrt werden mindestens $t = 10 \text{ min}$ Pause eingehalten. Aufgetragen sind in der Abbildung 4-8 jeweils alle 30 Einzelmesspunkte der Endtor-Trajektorien-Kreuzungen. Mit einem Stern markiert ist jeweils der Mittelwert der Messungen einer Messtechnik. Hierbei erreicht die Validierungsmesstechnik ADMA die geringste Streuung um den sehr exakt zentrierten Mittelwert. Der Zentrierpunkt wird durch eine über $t = 3 \text{ h}$ andauernde Standmessung mit dem RTK-GNSS basierten System ADMA ermittelt. Hier sei hinzugefügt, dass somit die Referenz dieser Untersuchung nicht unabhängig von dem gewählten Messsystemen ist und der relative Versatz der Mittelwerte zwischen den einzelnen Systemen nicht zur Bewertung der Genauigkeit geeignet ist. Aus diesem Grund wird in der Abbildung ein Kreis um den Mittelpunkt der jeweiligen Messwerte mit dem Radius des größten Abstandes einer Einzelmessung zum Mittelwert eingezeichnet. Die mittlere absolute Abweichung beträgt beim ADMA System 0.11 m , womit die Produktspezifikation erreicht wird. Die maximale Abweichung einer Einzelmessung beträgt $\pm 0.25 \text{ m}$, was dem Pylonenabstand von 0.5 m entspricht. Somit liegt die Messungenauigkeit über der Prozessgenauigkeit. MTiG mit einer mittleren absoluten Abweichung von $\pm 0.88 \text{ m}$ und das RideLink-Modul „WingMan“ mit einer Abweichung von $\pm 0.70 \text{ m}$ sind außerhalb der Prozessgrenze anzusiedeln.

Aus den hier ermittelten Werten ergibt sich für die Trajektorienprädiktion des zu entwickelnden Modells die Anforderung *Anf-Mod-Tra-1* einer maximalen lateralen Abweichung

zwischen gemessener und gerechneter Trajektorie von 0.5 m. Diese Abweichung soll während des zur Entwicklung genutzten Kurvenmanövers nicht überschritten werden. Bei einer Anwendung der Methodik zur prototypischen Erprobung im Straßenverkehr mit Low-Cost Messtechnik ist die jeweilige Messgenauigkeit des genutzten Systems zu berücksichtigen (*Anf-Mod-Tra-2*). Sie kann mit der hier gezeigten Methode bestimmt werden.

4.3 Datenerhebung

Im nachfolgenden Abschnitt der Datenerhebung wird zu Beginn der Begriff der Bewertungskurve eingeführt. Diese Bewertungskurven bilden einen essenziellen Bestandteil der hier vorgestellten Methodik zur Entwicklung des Fahrermodells. Anschließend werden die Versuchsgeländestudie zur Erfassung der für die datengetriebene Modellentwicklung notwendigen Messdaten sowie das für die Modellentwicklung und Bewertung notwendige Anomalieereignis vorgestellt. Im letzten Teilabschnitt werden die für die Messdatenerfassung sowie die Validierungsfahrten ausgewählten Fahrer beschrieben.

4.3.1 Definition der Bewertungskurve

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur kurvenabhängigen Trajektorienprädiktion von Motorradfahrern. Der Fokus liegt hierbei auf der Untersuchung des Fahrerhaltens in typischen Unfallkurven, die laut Unfallstatistik mit einem Kurvenradius von $R = 60$ m und einer Kurveneintrittsgeschwindigkeit von weniger als 60 km/h angefahren werden (siehe Kapitel 2.4). Hinzuzufügen ist der Fokus der Anwendung des hier entwickelten Modells auf Landstraßen in Deutschland. Bei einer Übertragung in andere Länder sind die spezifischen Geschwindigkeitsbegrenzungen auf Landstraßen zu berücksichtigen. Zudem soll durch die erarbeitete Methodik ein möglichst umfassendes Verständnis für die fahrerindividuelle Durchfahrung einer Kurve geschaffen werden. Unter Berücksichtigung der einzelnen Kurvenprimitive ist somit die Erfassung jeweils eines dynamischen und eines quasistationären Primitivs zur Analyse notwendig. Physikalische Grenzen in Form des Erreichens der Kraftschlussgrenze zwischen Reifen und Fahrbahn bilden eine weitere Randbedingung. So darf die Kurvengeometrie unter Berücksichtigung der erlaubten Geschwindigkeit keine Einschränkung hinsichtlich des theoretisch möglichen Rollwinkels bedingen.

Für die Definition der Bewertungskurve wird die Beziehung des quasistationären Zustands bei konstanter Kurvenfahrt zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit v , Kurvenradius R und dem Rollwinkel φ verwendet, nach Formel (3.1). Für die Beurteilung des Fahrkönnens eines Motorradfahrers muss es im Straßenverkehr möglich sein, eine Kurve unter Berücksichtigung der gesetzlichen Begrenzung bis an die Grenzen der Fahrdynamik zu durchfahren. Unter Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf deutschen Landstraßen von $v = 100$ km/h und der Annahme eines theoretischen Grenzrollwinkels $\varphi = 45^\circ$ bei einem Reibwert von $\mu = 1$ ergibt sich somit in Tabelle 4-1 folgender Zusammenhang:

Tabelle 4-1 Vergleichswerte der Referenzkurven

Referenzkurven Geschwindigkeit und Kurvenradien		
φ in °	v in km/h	R in m
45 °	40	12.6
	60	28.3
	80	50.3
	100	78.7

Daraus ergibt sich ein möglicher Kurvenradius zwischen ca. $R = 13$ m und $R = 79$ m für deutsche Landstraßen. Kurven mit deutlich kleinerem Radius sind für die hier vorgestellte Methode weniger geeignet, da hier aufgrund der geringen Geschwindigkeiten der quasi-stabile Bereich der Motorradfahrtdynamik erreicht wird. Bei Geschwindigkeiten kleiner $v = 30$ km/h wird die Motorradfahrt eher über Lenkbewegungen stabilisiert. Das in Formel (2.1) definierte Kräftegleichgewicht stabilisiert hier noch nicht ausreichend die Fahrbewegung.⁹⁸ Der zur Bewertung der Kurve betrachtete Radius ist hierbei - falls nicht konstant - stets der minimale Radius einer Kurve, was der maximalen Krümmung, wie in Formel (4.1) beschrieben, entspricht.

$$\kappa = \frac{1}{R} \quad (4.1)$$

Der Punkt der maximalen Krümmung entspricht dem fahrtechnisch anspruchsvollsten Punkt der Kurve, da hier zum Ausgleich der Querschleunigung der größtmögliche Rollwinkel eingenommen werden muss.

Tatsächlich wird eine Kurve nur von einem geringen Anteil der durchschnittlichen Motorradfahrer mit einem maximalen Rollwinkel von $\varphi = 45^\circ$ durchfahren. Dies zeigt das Ergebnis einer Fahrstudie im Straßenverkehr aus Scherer et. al.⁹⁹, wonach 75 % aller Schräglagenwinkel auf einer typischen Landstraßenfahrt in Deutschland unter 25° liegen.

Für die Entwicklung der Methodik in dieser Arbeit soll der gesamte Wertebereich von Kurvenradien abgedeckt werden. Hieraus ergibt sich eine erste Anforderung *Anf-Dat-Bew-1* an zu untersuchende Kurven: Zur Untersuchung fahrer- oder manöverspezifischen Verhaltens sind Kurven mit einem minimalen Kurvenradius von $R = 12$ m bis $R = 80$ m einzusetzen.

Neben den Anforderungen an den Kurvenradius für die besondere Eignung des Methodenachweises ist ein wichtiges Kriterium für eine solche Kurve die Richtungsänderung, die innerhalb einer Kurve vollzogen wird. Diese entspricht der Differenz des Gierwinkels des

⁹⁸ Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 768.

⁹⁹ Scherer, F. et al.: Schräglagenangst (2021).

Fahrzeugs zwischen Kurveneingang und Kurvenausgang, was mit Formel (4.2) beschrieben werden kann.

$$\Delta\psi = \left| \text{hor}\psi_{0\%} - \text{hor}\psi_{100\%} \right| \quad (4.2)$$

Zum Erreichen der Anforderung *Anf-Dat-Bew-2* der Abdeckung sowohl des dynamischen als auch des quasistationären Kurvenprimitives muss eine Richtungsänderung von $\Delta\psi \geq 90^\circ$ erreicht werden. Vorversuche auf geschlossenem Gelände haben gezeigt, dass bei einer kleineren Richtungsänderung der quasistationäre Teil der Kurve nur sehr kurz oder gar nicht vorhanden ist. Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit auf jede mögliche Kurvengeometrie ergibt sich die Anforderung *Anf-Mod-All-5* an das Modell, dass Kurvendurchfahrten unabhängig von der Größe des Kurvenwinkels modellierbar sein sollen.

Für erste Untersuchungen zur Unterscheidbarkeit oder Wiederholbarkeit der dynamischen Phasen bei der Ein- und Ausleitung der Kurvenfahrt ist - als Anforderung *Anf-Dat-Bew-4* - eine Achsensymmetrie um den Kurvenscheitelpunkt anzustreben. Hierdurch sind Unterschiede oder Ähnlichkeiten zwischen dem Einleiten und Ausleiten der Kurve explizit untersuchbar. Die hieraus resultierende Anforderung *Anf-Mod-All-6* an das Modell ist die Berücksichtigung der Unabhängigkeit von Kurvenradienänderungen über den gesamten Kurvenverlauf.

Um eine möglichst große Ähnlichkeit zur gewohnten und geübten Kurvengeometrie von Motorradfahrern zu behalten, ist eine Fahrstreifenbreite von mindestens 2,75 m bis maximal 3,50 m einzuhalten, was der vorgeschriebenen Fahrstreifenbreite auf deutschen Landstraßen entspricht¹⁰⁰.

Einflüsse durch verändertes Verhalten aufgrund anderer Verkehrsteilnehmer sind zu vermeiden. Gerade beim Motorradfahren gibt es sogenannte „Gruppeneffekte“,¹⁰¹ die ein verändertes Verhalten bei Fahrten durch Bewertungskurven in Gruppen oder mit Gegenverkehr zur Folge haben können

Hieraus ergeben sich die Anforderung *Anf-Dat-Bew-3* an die Fahrstreifenbreite von 2,75-3,50 m und der Verzicht auf andere Verkehrsteilnehmer während der Datenerhebungsphase *Anf-Dat-Erf-2*.

¹⁰⁰ Hartkopf, G.; Weise, G.: Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (2012).

¹⁰¹ Kühn, M.; UDV: Motorcycle riding in groups (2022).

4.3.2 Versuchsgelände Studie

Für diese Arbeit steht das Versuchsgelände der TU Darmstadt in Griesheim zur Verfügung. Die Untersuchung und Beschreibung der Fahrerindividualität wird anhand von Messdaten aus Fahrversuchen auf dem abgesperrten Gelände durchgeführt. Messdaten aus dem Straßenverkehr werden aufgrund mangelnder Kenntnisse über exakte Fahrbahn- und Fahrstreifenverläufe sowie wenig kontrollierbare Umgebungsbedingungen zur Entwicklung der Methodik nicht genutzt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden Fahrversuche zur prototypischen Erprobung der Methodik im Straßenverkehr exemplarisch herangezogen.

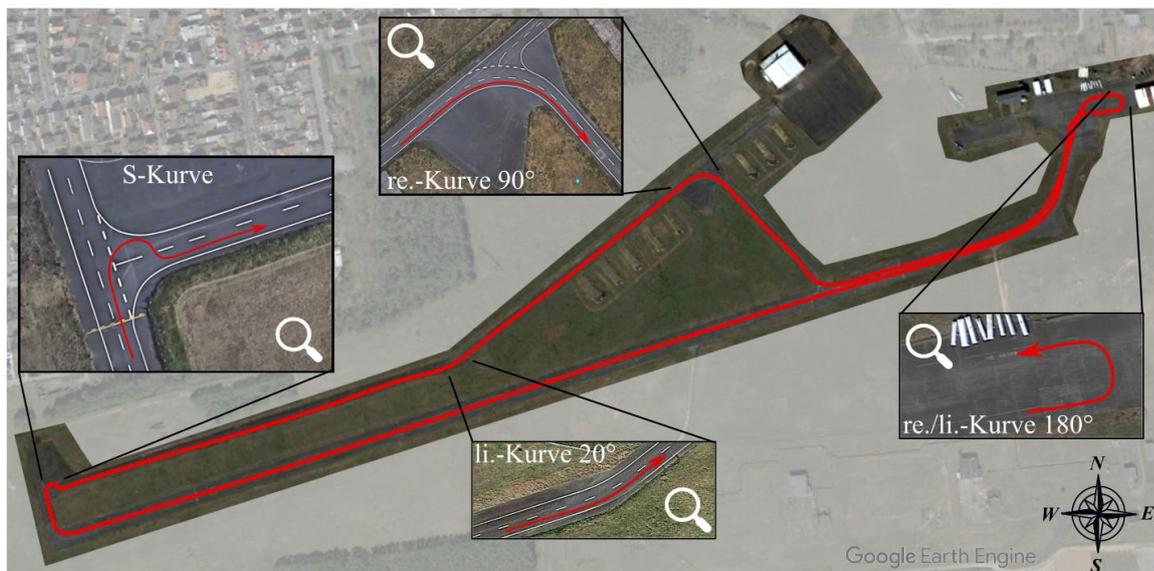


Abbildung 4-9 Untersuchungskurven der Fahrversuche auf abgesperrtem Testgelände, Kartendaten © Google Earth¹⁰²

Insgesamt stehen vier Kurvenarten und 424 Kurvendurchfahrten von zehn unterschiedlichen Fahrern zur Methodenentwicklung zur Verfügung. Die zehn Probanden weisen unterschiedliche Fahrerfahrungen auf. Auf die Auswahl der Probanden wird in Kapitel 4.3.4 näher eingegangen.

Abbildung 5-3 zeigt die Übersicht einer exemplarischen Messfahrt eines Probanden auf dem Flugplatz in Griesheim mit den zur Untersuchung definierten Manövern.

In Tabelle 4-2 sind die Eigenschaften der definierten Kurven spezifiziert. Zur besseren Zuordnung der Ergebnisse mit den untersuchten Kurven wird nachfolgende Nomenklatur eingeführt: Eine Kurvenbeschreibung setzt sich aus drei Elementen zusammen, der Kurvenrichtung (RE ~ Rechts, LI ~ Links), dem Kurvenwinkel in Grad und dem Kurvenradius in Metern. Getrennt werden die Werte jeweils durch einen Bindestrich „-“ Beispielhaft wird so eine Rechtskurve mit Kurvenwinkel $\Delta\psi = 75^\circ$ und Kurvenradius $R = 40$ m mit RE-75-40 bezeichnet. Bei einer Aneinanderreihung mehrerer Kurven, zum Beispiel der hier

¹⁰² Google Earth: August-Euler-Flugplatz Griesheim (2024).

gezeigten S-Kurve oder Kurvenkombinationen werden die Kurvenabschnitte durch einen Schrägstrich: „/“ voneinander getrennt, aber direkt hintereinandergeschrieben. Die hier vorgestellte Kurvenkombination, eine sogenannte S-Kurve setzt sich somit zum Beispiel folgendermaßen zusammen:

RE/LI-180/90-12/18

Dies entspricht einer auf eine Rechtskurve, mit Radius $R = 12 \text{ m}$ und Kurvenwinkel $\Delta\psi = 180^\circ$, folgenden Linkskurve.

Tabelle 4-2: Kurvenöffnungswinkel und Radien

Art	Charakteristika	
	Kurvenwinkel $\Delta\psi$	Kurvenradius R
Bewertung Rechts RE-180-12	180°	12 m
Bewertung Links LI-180-12	180°	12 m
Rechtskurve RE-90-30	90°	~30 m
Linkskurve LI-20-40	20°	~40 m
S-Kurve RE/LI-180/90-12/18	180°/90°	~12 m/~18 m

Wesentlicher und somit initialer Bestandteil der Untersuchung ist die $\Delta\psi = 180^\circ$ Bewertungskurve auf dem Vorplatz des Versuchsfeldes. Diese ist nach den Kriterien in Kapitel 4.3.1 konzipiert. Mit einem Kurvenwinkel $\Delta\psi = 180^\circ$ und einem konstanten Kurvenradius $R = 12 \text{ m}$ erfüllt die Kurve die Minimalanforderung *Anf-Dat-Bew-1* an den Kurvenradius, sowie die Anforderung *Anf-Dat-Bew-4* der Symmetrie. Besonders die untere Grenze für Kurvenradien zur Durchfahrbarkeit wird hierdurch untersuchbar. Sie wird von allen Probanden zu Beginn einer Messfahrt sieben-fach in beide Kurvenrichtungen durchfahren. Hieraus lassen sich Rückschlüsse auf entsprechende fahrerspezifische Schwellwerte in fahrdynamischen Größen ermitteln.

Die Links- und Rechtskurven LI-20-40 bzw. RE-90-30 entsprechen aufgrund ihrer stetigen Kurvenkrümmung Kurven im Straßenverkehr und werden somit zum Nachweis einer Übertragbarkeit in den Straßenverkehr herangezogen. Aufgrund des kleinen Kurvenwinkels bei relativ großem Radius und der hieraus resultierenden fehlenden Stationärphase der Kurvenfahrt wird die Linkskurve LI-20-40 nicht weiter zur Validierung genutzt. Die Rechtskurve RE-90-30 eignet sich hierfür durchaus und wird somit zur ersten Validierung herangezogen.

Die S-Kurve RE/LI-180/90-12/18, wiederum mit konstanten Kurvenradien wobei der erste Teil der Kurve der Bewertungskurve auf dem Vorplatz entspricht, dient repräsentativ zur Untersuchbarkeit von Kurvenübergängen. Die dynamische, sequentielle Kurvenausleitung und Kurveneinleitung sind hier von besonderem Interesse.

Beispielhaft ist der Aufbau der Bewertungskurve und der RE/LI Kombination in Abbildung 4-10 dargestellt.



Abbildung 4-10 RE/LI Kurvenkombination zur Untersuchung dynamischer Kurvenübergänge

Vor der Durchführung der tatsächlichen Messdatenerfassung wurde zur Validierung der Durchfahrbarkeit aller Kurven eine Expertenstudie mit Fahrtrainern sowie Teilnehmern eines Fahrtrainings durchgeführt. Die hieraus resultierenden Anforderungen *Anf-Dat-Erf-1* an die Durchführung der Fahrversuche sind nachfolgend aufgeführt, wobei (FF) für Festforderung und (ZF) für Zielforderung steht:

- Testgelände. Die Testmanöver sollen auf einem Testgelände ohne weiteren Verkehr mit bekannten und für die Untersuchung der Methode geeigneten Randbedingungen durchgeführt werden. (ZF)
- Gefahrenstoffe: Während der Testdurchführung darf keine Gefährdung der Probanden aufgrund von Gefahrenstoffen, wie zum Beispiel Benzin oder Motorenöl entstehen. (FF)
- Schutzbekleidung: Während der Durchführung der Testmanöver ist Schutzbekleidung durch die Probanden zu tragen. Die Schutzausrüstung hat aus Helm, Motorradjacke, Motorradhose, Motorradhandschuhen sowie Motorradstiefeln zu bestehen. Vor Fahrtantritt wird ein Vorhandensein dieser Bekleidung sowie der einwandfreie Zustand ohne eventuelle Beschädigungen sichergestellt. (FF)
- Auslauflächen: Während der Tests sind Auslauflächen vorzusehen. Diese sind entsprechend der maximalen Geschwindigkeit und einer geeigneten Verzögerung auszulegen. Dies dient dem Probandenschutz, um diesen vor einem Aufprall auf ein Hindernis zu schützen. (FF)
- Belastung des Probanden: Während der Durchführung der Testmanöver sollen normale alltägliche Belastungen des Motorradfahrens nicht überschritten werden. Dies bezieht sich sowohl auf psychische als auch auf physische Belastungen. (FF)
- Motorradführerschein/ Fahrerlaubnis: Der Proband muss einen für das Versuchsfahrzeug notwendigen Führerschein besitzen. Dies ist vor Fahrtantritt durch den Versuchsleiter zu überprüfen. (FF)
- Stresslevel: Das Stress- und Angstlevel darf alltägliche Belastungen nicht überschreiten. Für den Fall einer länger vorliegenden psychischen Belastung kann von einem hohen Stresslevel ausgegangen werden. (FF)

- Nachwirkungen: Nachwirkungen aufgrund der Testmanöver sind auszuschließen. Diese beziehen sich sowohl auf psychische als auch auf physische Belastungen. (FF)
- Vorschädigungen: Vorschädigungen des Probanden sind vor Testantritt auszuschließen. Dies beinhaltet Herz-Kreislauf-Erkrankungen. (FF)
- Real: Die dargestellten Testszenerien sollen weitmöglichst Szenerien aus dem Fahrgeschehen im Straßenverkehr repräsentieren. (FF)

4.3.3 Definition eines Anomalie-Ereignisses

Zur Untersuchung oder zum Nachweis der Wiederholbarkeit eines Ereignisses ist das bewusste Erzeugen eines Anomalie-Ereignisses möglich. In dieser Arbeit wird ein Anomalie-Ereignis konzipiert, das zum Nachweis der Abhebung des Ereignisses von den Normalfahrten dient.

Tabelle 4-3 Ergebnis des Paarvergleichs zwischen verschiedenen potentiellen Gefahren und die daraus resultierende Rangfolge für die Umsetzung von Fahrversuchen.

Parameter	Summe Paarvergleich	Rangfolge	Gewichtungsfaktor
Zustand der Fahrbahn	4	3	0,06
Fahrbahnverlauf	5	2	0,09
Position auf der Fahrbahn	5	2	0,09
Andere Fahrzeuge	9	1	0,18
Sichtbehinderung	9	1	0,18
Hindernisse/ ruhende (stehende) Fahrzeuge	5	2	0,09
Fußgänger/ Tiere	3	4	0,04
Signale (akustisch, visuell, haptisch)	2	5	0,04
Licht/ Sichtverhältnisse	1	6	0,03
Mangel am Fahrzeug	0	7	0,02
Reaktionsunfähigkeit Fahrer	9	1	0,18

Besonders geeignet hierfür ist das Stören des typischen, natürlichen Verhaltens eines Fahrers durch zum Beispiel eine plötzlich veränderte Umgebungsbedingung. Auf Basis der Ergebnisse einer Voruntersuchung mit den zwei zusätzlichen Manövern *zuziehende Kurve* und *veränderter Kurvenradius* wird das Anomalie-Ereignis *plötzlich auftauchendes Hindernis in nicht einsehbarer Kurve* für die Untersuchung der Anomalieerkennung gewählt.

Die Grundlage für diese Auswahl stellt ein Paarvergleich auf Basis der Analyse des Unfalltypenkatalogs nach Ortlepp¹⁰³ dar. Die Ergebnisse hiervon, sowie die hieraus resultierende Rangfolge und Gewichtung der Kriterien sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst. Hieraus geht

¹⁰³ Ortlepp, J.; Butterwege, P.: Unfalltypen-Katalog (2016).

hervor, dass das Involvieren anderer Fahrzeuge, einer Sichtbehinderung und die gezielte Berücksichtigung oder Veränderung der Reaktionsfähigkeit des Fahrers am besten für die Untersuchung veränderten Verhaltens geeignet sind. Aufgrund der möglichen Steigerung der Gefährdung von Probanden ist bei der Konzeption auf bewegte andere Fahrzeuge zu verzichten. Zur Steigerung der Realitätsnähe der Situation werden die Kriterien *andere Fahrzeuge*, *Sichtbehinderung* und *Hindernisse*, sowie *Position auf der Fahrbahn* kombiniert und in Form eines *plötzlich auftauchenden Hindernisses* in einer durch am Straßenrand parkende Fahrzeuge verdeckten Kurve realisiert.



Abbildung 4-11 Anomalie-Ereignis zur Untersuchung der Veränderung des Fahrerverhaltens

Das konzipierte Anomalie-Ereignis ist in Abbildung 4-11 dargestellt. Die mittig in Abbildung 4-11 sichtbaren Pylonen werden nach der zehnten Durchfahrt der Kurve ohne erkennbares Hindernis während der Abwesenheit der Probanden aufgestellt. Die Einsehbarkeit der Kurve ist durch am Fahrbahnrand geparkte Fahrzeuge - nicht dargestellt ist hier das rechts neben dem gezeigten Fahrzeug parkende weitere Fahrzeug - eingeschränkt und ist erst bei der Einfahrt in die Kurve endgültig möglich.

Durch die Auswahl der vorgestellten Manöver werden alle in Kapitel 4.3.2 aufgestellten Anforderungen *Anf-Dat-Erf-1* vollumfänglich erfüllt. Durch die Auswahl einer abgesperrten Versuchstrecke mit großen Versuchsflächen werden die Anforderungen an Auslaufzonen, einer Vermeidung zusätzlicher Gefährdung von Probanden und der Sicherstellung keiner zusätzlichen Verkehrsteilnehmer erfüllt. Die Auswahl des Ereignisses „verdecktes Hindernis“ stellt eine potentiell im Straßenverkehr erlebbare Situation dar und erfüllt hiermit die Anforderung „keiner über den sonstigen Alltag der Probanden steigenden psychischen oder physischen Belastung.“

Durch die Kontrolle des Versuchsfahrzeuges, der ordnungsgemäßen Schutzkleidung und der Fahrerlaubnis der Probanden vor Fahrtantritt sowie eine Befragung mittels Fragebogen zu vorliegenden Erkrankungen oder gesundheitlichen Einschränkungen werden die Anforderungen an die Sicherheit bei der Durchführung der Versuche erfüllt.

4.3.4 Probandenauswahl für Teststrecken- und Straßenverkehrs-Untersuchung

Zur Einschränkung möglicher Einflussfaktoren wird für die Probandenauswahl eine homogene Alterscharakteristik bei gleichzeitig unterschiedlicher Fahrpraxis/Fahrerfahrung angestrebt. Somit wird ausgeschlossen, dass mögliche altersbedingte Einflüsse das Verhalten der Probanden beeinflussen, wie sie zum Beispiel in Pleß et. al.¹⁰⁴ erkennbar sind. Die Probanden bewerten ihren eigenen Fahrertyp nach der in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Methodik. Zudem ist eine Durchmischung der Geschlechter notwendig. Hieraus ergibt sich die in Tabelle 4-4 zusammengefasste Probandenauswahl für die Teststreckenuntersuchung.

Das Fahrerkollektiv setzt sich aus drei weiblichen und sieben männlichen Fahrern im Alter von 21 bis 29 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 26,5 (Median 27) zusammen. Die Fahrpraxis variiert zwischen zwei bis elf Jahren, bei einer durchschnittlichen Haltedauer der Fahrerlaubnis von sechs Jahren (Median 6,5). Nach der Fahrertypenklassifizierung („Defensiv“ / „Konstant“ / „Sportlich“) sind vier Teilnehmer defensiv, drei sportlich, zwei konstant und ein Teilnehmender zwischen defensiv und sportlich einzugliedern. Die jährliche Fahrleistung der Probanden teilt sich je zu ca. einem Drittel auf die Intervalle 0-5000 km, 5000-10000 km und 10000-15000 km auf. Dabei geben die Fahrer eine Fahrhäufigkeit von mehrmals wöchentlich bis zu ein- bis vier-mal pro Monat an. Der Großteil der privat gefahrenen Strecken sind Freizeitfahrten, durchgeführt auf Landstraßen sowie im Stadtverkehr.

¹⁰⁴ Pleß, R. et al.: Schräglagenschwelle bei Motorradfahrern (2020).

Tabelle 4-4 Übersicht des Probandenkollektivs der Teststreckenuntersuchung

Fahrer Nr.	Geschlecht	Alter	Fahrpraxis (Jahre)	Fahrertyp (nach Absatz 3.2.1)
1	Männlich	28	4	Defensiv
2	Männlich	24	6	Sportlich
3	Männlich	21	3	Sportlich
4	Weiblich	29	7	Defensiv
5	Männlich	26	8	Konstant
6	Männlich	28	2	Defensiv/Sportlich
7	Männlich	25	7	Defensiv
8	Männlich	29	11	Sportlich
9	Weiblich	29	4	Defensiv
10	Weiblich	26	8	Konstant

Für die prototypische Erprobung im Straßenverkehr wird eine Person aus dem Testfeld als Referenzperson ausgewählt, welche eine geringe Fahrpraxis mit gleichzeitig defensiver Fahrweise aufweist. Zum Nachweis der Validität werden zudem zwei weitere Probanden ausgewählt, die nicht Teil der Teststreckenuntersuchung sind. Zur Untersuchung der Unterscheidbarkeit wird hierbei ein sportlicher Fahrertyp mit hoher Fahrpraxis angestrebt. Insgesamt werden so für die Stichprobenvalidierung drei Probanden ausgewählt, die in Tabelle 4-5 aufgeführt sind. Aufgrund der Durchführung der Untersuchung in unterschiedlichen, aufeinanderfolgenden Jahren variiert das Alter der Referenzperson zwischen den beiden Untersuchungsschwerpunkten, wobei der Mittelwert des Probandenalters bei 30,7 Jahren liegt. Bei der Auswahl der Personen wird zur Einordnung der jährlichen Fahrpraxis die entsprechende jährliche durchschnittliche gefahrene Strecke als Vergleichsgröße herangezogen, diese variiert zwischen wenig Fahrpraxis mit 500 km pro Jahr bis 5000 km pro Jahr.

Tabelle 4-5 Probandenauswahl für die prototypische Erprobung im Straßenverkehr

Fahrer Nr.	Geschlecht	Alter	Fahrpraxis (Jahre)	Fahrertyp (nach Absatz 3.2.1)
1	Männlich	32	14	Sportlich
2	Weiblich	31	8	Defensiv
3	Männlich	29	11	Sportlich

4.3.5 Zusammenfassung der Datenerhebung und Messkampagnen

Die in Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3 eingeführten Messsysteme und die Datenerhebungsphasen sind in Tabelle 4-6 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4-6 Zusammenfassung der Messkampagnen

Bezeichnung	Testgeländeuntersuchung		Erprobung im Straßenverkehr	
Ort	Testgelände Griesheim		Erprobungsstrecke Straßenverkehr	
Fahrzeug	Honda NC 700 X		BMW K 1200 R Sport	Honda CBF
Messtechnik	MTIG	ADMA	WingMan	
Fahrer	10	3	3	
Kampagne	Datenerfassung	Validierung	Erprobung	
Markierung	◇	○	□	

Die Messkampagnen lassen sich in die Testgeländeuntersuchung und die Erprobung im Straßenverkehr unterteilen. Für die Testgeländeuntersuchung, durchgeführt auf dem abgesperrten Testgelände in Griesheim wird ausschließlich das Fahrzeug Honda NC 700X eingesetzt. Hierbei wird für die Datenerfassungskampagne zur Modellbildung in Kapitel 5 und Verifikation in Kapitel 6.1 das Messsystem MTiG der Firma XSENS genutzt. Das schwerpunktnah verbaute System wird für die Datenerfassung mittels der zehn Probanden gewählt, um eine möglichst geringe Abweichung des Fahrzeuges zum Erscheinungsbild und Fahrverhalten im Serienzustand zu gewährleisten. Der Datensatz der insgesamt je Richtung sieben-fach durchfahrenen Bewertungskurve LI-180-12 ist komplett nutzbar, woraus sich eine Kurvenanzahl $n_c = 7$ bei allen 10 Fahrern ergibt. Aufgrund einer fehlenden letzten Durchfahrt bei der Erfassung der RE-180-12 Bewertungskurven sind für die Rechtskurven von allen 10 Fahrern $n_c = 6$ Kurvendurchfahrten für die Modellbildung und Verifikation vorhanden.

Die S-Kurve RE/LI-180/90-12/18 und die Kurve RE-90-30 werden von allen zehn Probanden jeweils neun-fach direkt hintereinander durchfahren. Somit stehen für die Modellbildung und Verifikation jeweils $n_c = 9$ Kurvendurchfahrten aller zehn Probanden zur Auswertung zur Verfügung. Die zehnte Durchfahrt der RE-90-30 Kurve stellt die mit dem Anomalieereignis veränderte Durchfahrt dar. Aus diesem Grund können für Untersuchungen zur Veränderung des Verhaltens durch das Anomalieereignis $n_c = 10$ Kurvendurchfahrten verwendet werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Bezug zu Daten aus der Datenerfassungskampagne mit der Markierung ◇ gekennzeichnet.

Für die Validierung des Modells in Kapitel 6.2 werden Daten einer weiteren Messkampagne genutzt. Ort und Fahrzeug unterscheiden sich nicht zur Datenerfassungskampagne, das Fahrzeug Honda NC 700 X wird auf dem Testgelände in Griesheim eingesetzt. Hierfür wird im Gegensatz zur Datenerfassungsstudie \diamond jedoch der hochpräzise ADMA als Messsystem eingesetzt. Die Erfassung des Validierungsdatensatzes erfolgt durch insgesamt drei Fahrer, wovon ein Fahrer (Fahrer 2) an beiden Kampagnen teilnimmt. Die RE-180-12 und LI-180-12 Kurven werden von allen drei Fahrern je Richtung zehnfach durchfahren. Hieraus ergeben sich $n_c = 10$ auswertbare Kurvendurchfahrten je Richtung und Fahrer. Die RE/LI-180/90-12/18 S-Kurve und die RE-90-30 Kurve werden jeweils fünffach durchfahren, ohne die Integration eines Anomalieereignisses. Hierdurch stehen für diese Kurven jeweils $n_c = 5$ Kurvendurchfahrten je Fahrer und Kurve zur Validierung zur Verfügung. Im weiteren Verlauf werden Daten aus der Validierungskampagne mit \circ gekennzeichnet.

Die dritte Messkampagne wird im öffentlichen Straßenverkehr nördlich von Frankfurt am Main mit den zwei Fahrzeugen BMW K 1200 R Sport und Honda CBF 1000 durchgeführt. Als Messsystem wird das Low-Cost System WingMan eingesetzt und die Strecke wird von denselben drei Fahrern der Validierungskampagne \circ befahren. Im weiteren Verlauf werden Daten aus dieser Kampagne mit \square kenntlich gemacht. Die Strecke wird jeweils fünffach durchfahren. Somit liegen je Fahrer $n_c = 5$ Kurvendurchfahrten vor.

4.4 Datenvorverarbeitung

Nachfolgend wird zunächst die in dieser Arbeit genutzte Segmentierungsmethodik vorgestellt. Hierbei wird unterschieden nach der örtlichen Segmentierung zur Trennung einzelner Kurvendurchfahrten anhand von Referenzpunkten sowie einer allgemein anwendbaren Methodik zur Segmentierung beliebiger Streckenabschnitte in Kurvensegmente.

Darauf aufbauend wird eine Metrik zur Bewertung eines beliebigen Streckenabschnitts hinsichtlich der Eignung des Abschnitts für die Anwendung der Methodik, bzw. der Validierung erarbeitet. Die Metrik zielt zusätzlich darauf ab, Kurven hervorzuheben, die aufgrund ihrer Ausprägung Ähnlichkeiten mit den im Kapitel 2.4 definierten Unfallkurven aufweisen.

Im letzten Teilabschnitt wird auf die Normierung der segmentierten Daten zur Vergleichbarkeit verschiedener Durchfahrten, sowie einer Eignung der normierten Daten zur Untersuchung von Schwellwerten und Wiederholbarkeit eingegangen.

4.4.1 Segmentierung in Kurvensegmente

Die hier vorgestellte Methode erarbeitet die Anwendbarkeit des Modells auf beliebige Fahrtabschnitte von Motorradfahrten. Der Fokus liegt hierbei auf Kurvenfahrten von Motorrädern, somit sind Segmente von Fahrten mit Geradeausfahrt nicht relevant. Eine Segmentierung einer zusammenhängenden Messfahrt in relevante und nicht relevante Teilstücke ist

daher notwendig. Insbesondere zur Vergleichbarkeit verschiedener Fahrer oder auch unterschiedlicher Durchfahrten einer Kurve wird hierfür ein Kriterium gewählt, das zeitunabhängig und kurvenunabhängig ist. Somit wird ein örtlicher Bezug festgelegt, wobei jede Kurve aus einem Kurvenbeginn und einem Kurvenende besteht. Zwischen diesen Punkten befindet sich der für die Untersuchung relevante Datenteil. Für die Erarbeitung der Methode werden zur Segmentierung der Bewertungskurven Punkte gewählt, an denen die Probanden sich vor der Einleitung oder nach der Ausleitung der Kurvenfahrt befinden.

Hierbei wird der Punkt gewählt, an dem nach der aufrechten und geraden Anfahrt an die Kurve bei allen Fahrern erstmalig ein Rollwinkel von $\varphi = \pm 5^\circ$ überschritten wird. Für die Segmentierung wird je Durchfahrt der Punkt mit dem lateral geringsten Abstand zum Segmentierungspunkt gewählt.

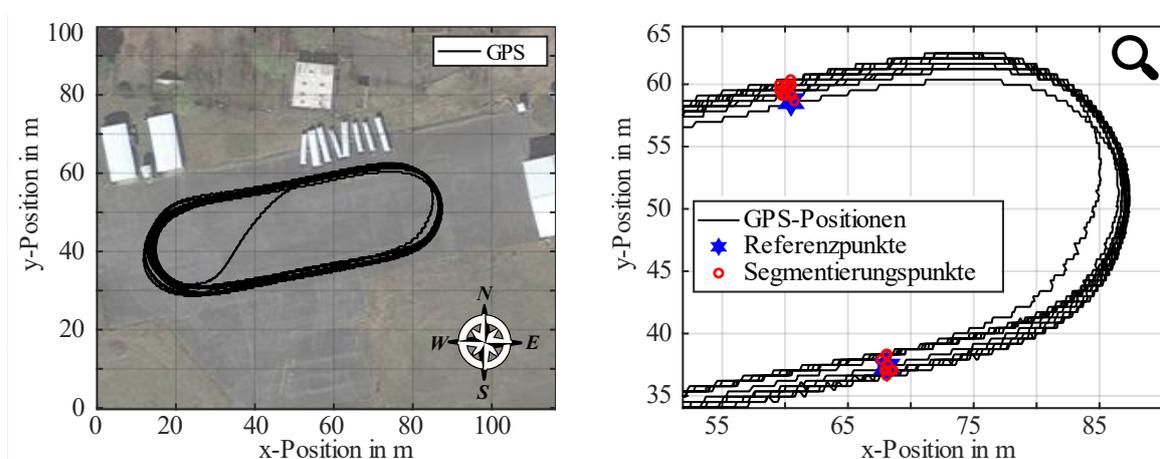


Abbildung 4-12 Kurvensegmentierung anhand der Ein- und Ausfahrtposition einer Kurve, Beispieldatensatz, Fahrer 4, transformiertes GNSS-Positionssignal, Kartendaten © Google Earth¹⁰⁵ ◇

In Abbildung 4-12 ist der beispielhafte Verlauf einer Messfahrt eines Probanden dargestellt, links der gesamte Verlauf und rechts der gewählte Segmentierungspunkt, sowie jeder Punkt einer Kurvendurchfahrt mit der lateral geringsten Entfernung zum Segmentierungspunkt.

Für die prototypische Erprobung im Straßenverkehr und spätere Anwendung auf beliebige Kurven im Straßenverkehr werden die Messdaten anhand der Informationen aus Kartendaten segmentiert.

¹⁰⁵ Google Earth: August-Euler-Flugplatz Griesheim (2024).

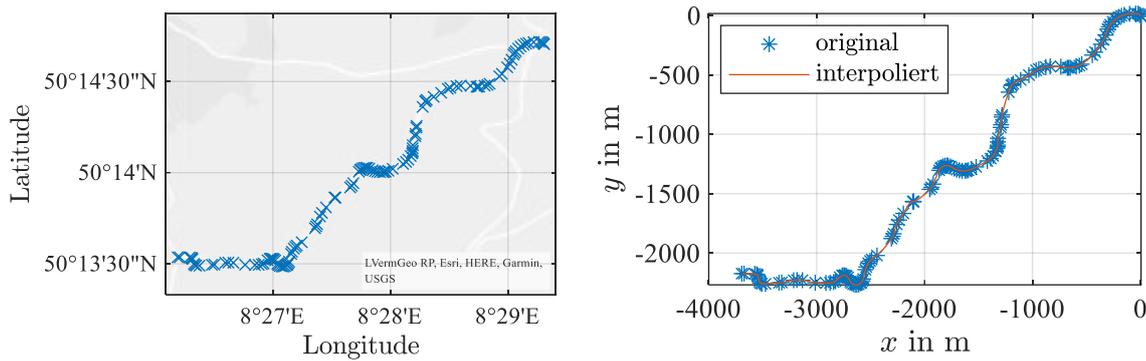


Abbildung 4-13 Latitude, Longitude, exportiert aus OSM Datenquelle (links), Spline interpolierte und auf $ds = 1$ m normierte Daten (rechts), Kartendatenlizenz: dl-de/by-2-0, www.govdata.de/dl-de/by-2-0

Dies ermöglicht die Anwendbarkeit der Methodik auf beliebige Streckenabschnitte. Ziel der Segmentierung über die entwickelte Methode ist die Unabhängigkeit von Kartenanbietern bei der Anwendbarkeit. Anforderungen an Kartenanbieter werden im Rahmen dieser Arbeit nicht definiert. Hierfür wird auf alternative Veröffentlichungen wie zum Beispiel von Wiltshcko und Kaufmann¹⁰⁶ verwiesen. Alle im weiteren Verlauf gezeigten Kartendaten basieren auf Open-Street-Map (OSM) Daten und sind somit öffentlich zugänglich.

Im ersten Schritt der Segmentierung werden aus Kartendaten geographische Koordinaten (Längengrad und Breitengrad) einer durchfahrenen oder geplanten Strecke extrahiert wie in Abbildung 4-13 links dargestellt und in ein kartesisches Koordinatensystem überführt (Abbildung 4-13 rechts). Beispielhaft dient für die Darstellung der Methode die für die prototypische Erprobung im Straßenverkehr ausgewählte Strecke im Norden von Frankfurt am Mains.

Im zweiten Schritt werden die kartesischen Daten mit einer Stützstellenweite von einem Meter auf eine Auflösung von $ds = \text{const.} = 1$ m interpoliert und somit eine äquidistante Datenbasis erzeugt. In dieser Arbeit wird zur Interpolation der Werte ein stückweise kubisch hermetischer Spline genutzt. Die Ausgangswerte, sowie das interpolierte Signal sind in Abbildung 4-13, rechts, dargestellt.

Aus dem interpolierten Signal wird der Krümmungsverlauf des Streckenabschnittes nach Formel (4.3) berechnet:

$$\kappa = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}} \text{ mit } \dot{x} = \frac{dx}{ds}; \dot{y} = \frac{dy}{ds} \text{ und } \ddot{x} = \frac{d^2x}{ds^2}; \ddot{y} = \frac{d^2y}{ds^2} \quad (4.3)$$

¹⁰⁶ Wiltshcko, T.; Kaufmann, T.: Qualität Geodatenverarbeitung von Straßendaten (2005).

Jeder Vorzeichenwechsel der Krümmung steht für den Beginn oder das Ende eines neuen Segmentes. Als Kurve wird definiert, wenn zwischen einem Vorzeichenwechsel eine Richtungsänderung $\Delta\psi > 10^\circ$ vollzogen wird.

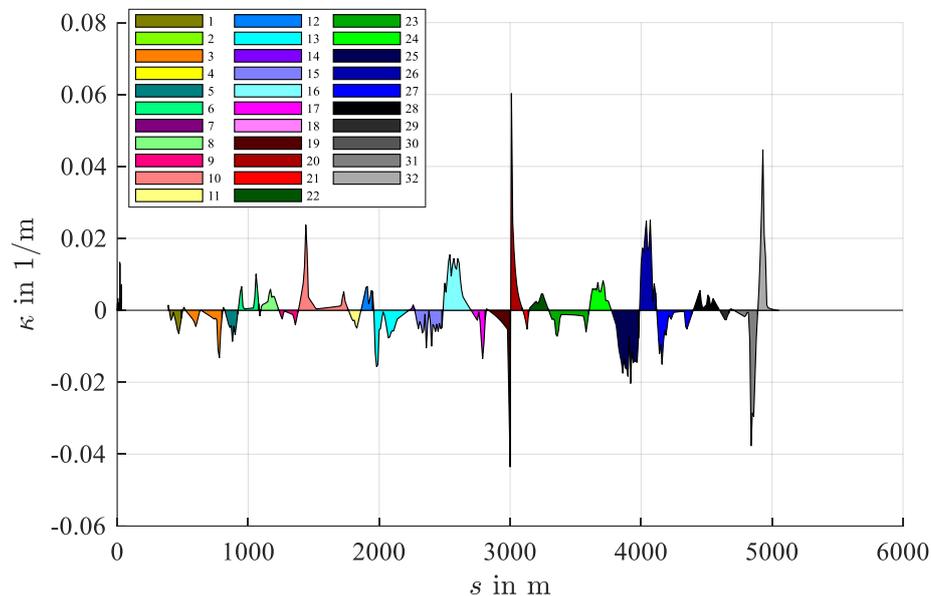


Abbildung 4-14 Segmentierte Streckenabschnitte über der zurückgelegten Strecke, insgesamt 31 Segmente, je Segment unterschiedlich eingefärbt.

Positiv dargestellt in Abbildung 4-14 sind Linkskurven, im negativen Bereich sind alle auf dem Abschnitt befindlichen Rechtskurven zu finden. Aufgetragen in Abbildung 4-14 ist der Krümmungsverlauf über der Streckenlänge in Metern. Der für die prototypische Erprobung im Straßenverkehr ausgewählte Streckenabschnitt besteht somit aus insgesamt 31 Kurvensegmenten, die in Abbildung 4-14 jeweils unterschiedlich eingefärbt dargestellt sind. Die Anwendbarkeit dieser Segmentierungsmethodik wird stichprobenartig auf beliebig ausgewählten Streckenabschnitten überprüft.

4.4.2 Metrik zur Eingliederung und Auswahl geeigneter Kurvensegment

Zur Eingliederung, respektive zur Auswahl für die Anwendung der Methodik geeigneter Kurven auf beliebigen Streckenabschnitten, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Bewertungsmetrik eingeführt. Ziel der Metrik ist die Analysemöglichkeit der Erfüllung aller Anforderungen an Bewertungskurven aus Kapitel 4.3.1.

Die Anforderung *Anf-Dat-Bew-1* an den Kurvenradius im Bereich $12 \text{ m} \leq R \leq 80 \text{ m}$ ergibt über Formel (4.1) einen Wertebereich für die maximale Kurvenkrümmung $0.013 \frac{1}{\text{m}} < \kappa < 0.083 \frac{1}{\text{m}}$ eines Kurvensegmentes.

In Abbildung 4-15 dargestellt ist der Streckenverlauf der für die prototypische Erprobung im Straßenverkehr ausgewählte Strecke im Norden von Frankfurt am Mains. Alle Segmentübergängen sind markiert durch ein blaues „x“. Über die Einfärbung der Strecke anhand der Krümmung werden alle als Bewertungskurve in Frage kommende Kurven farblich in grün hervorgehoben.

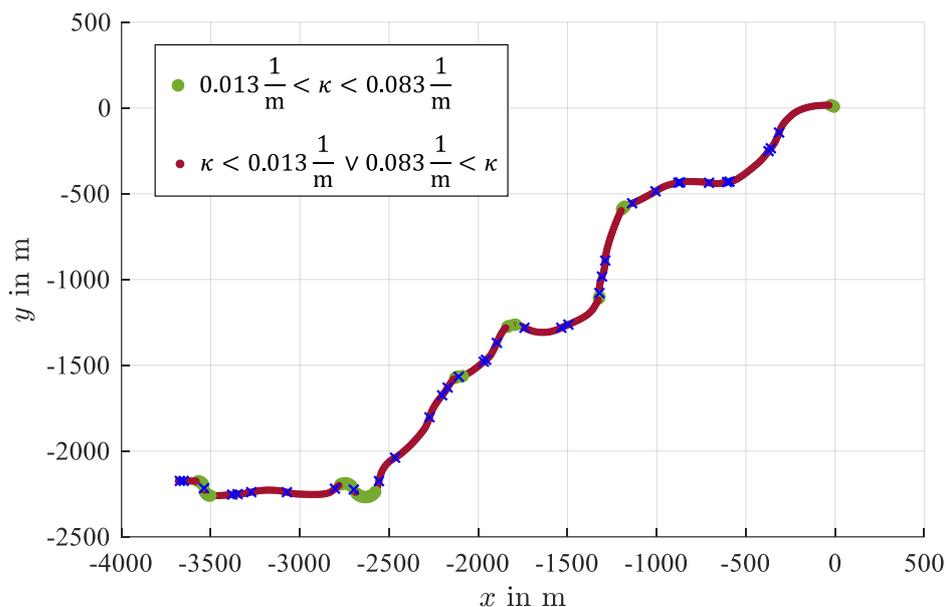


Abbildung 4-15 Eignung der Streckenabschnitte zur Anwendung der Methodik auf der Straßenverkehrserprobungsstrecke

Unter der Annahme der Betrachtung aller Kurvensegmente als ebene Kurven gilt folgende Beziehung zwischen der Kurvenkrümmung und dem Kurvenwinkel $\Delta\psi$:

$$\kappa = \frac{d \Delta\psi}{d \text{seg}_S} \quad (4.4)$$

Hieraus ergibt sich für die gesamte Winkeländerung der Kurve beziehungsweise den Kurvenwinkel, unter der Berücksichtigung der Anforderung an die Normierung der Daten mit $ds = \text{const.} = 1 \text{ m}$ aus Kapitel 4.4.3, der Zusammenhang aus Formel (4.5).

$$\sum \kappa = \Delta\psi \quad (4.5)$$

Die hieraus resultierenden Kurvenwinkel für die Validierungsstrecke befinden sich im Anhang A.2 dieser Arbeit. Zum Vergleich mit der Anforderung *Anf-Dat-Bew-2* an den Winkel aus Kapitel 4.3.1 wird der Wert von Rad in Grad transformiert. Für die Auswahl zur Bewertungskurve eines Segmentes muss die Bedingung $\Delta\psi \geq 90^\circ$ erfüllt sein.

Zur weiteren Kategorisierung werden zusätzlich zu den Kategorien *Kurve* und *Gerade* die folgenden Kriterien eingeführt:

- *Dynamik*: Die Dynamik einer Kurve ist ein Kennwert für die dynamischen Manöverprimitive Kurvenerleitung und Kurvenausleitung, beziehungsweise Kurvenübergang. Hierfür liegt der Fokus in dieser Arbeit auf der Änderung der Kurvenkrümmung im Verhältnis zur Kurvenlänge. Eine Kurve, die auf einer kleinen Strecke eine hohe Richtungsänderung vollzieht, benötigt eine hohe dynamische Bewegung des Fahrzeuges, insbesondere hohe Dynamik bei Rollrate und Gierrate. Die hier eingeführte Definition deckt sich nicht mit der Definition nach Schellin¹⁰⁷ aus Kapitel 3.1.1, da die Definition aus der Literatur keine Dynamik der Ein- oder Ausleitungsphase abbildet. Auf Basis dieser Anforderung wird nachfolgende Beziehung in Formel (4.6) als Kriterium für die Dynamik festgelegt.

$$\frac{\sum \kappa}{\text{seg}_S} \geq 0.006 \frac{\text{rad}}{\text{m}} \quad (4.6)$$

Der Grenzwert wird festgesetzt über die Anwendung der Minimalanforderungen an den Kurvenradius *Anf-Dat-Bew-1* und Kurvenwinkel *Anf-Dat-Bew-2* aus Kapitel 4.3.1 mit der Berücksichtigung der Klothoidenform von Kurven im Straßenverkehr für die Berechnung der Segmentlänge (Herleitung im Anhang A.2).

- *Konstanz*: Die Konstanz eines Kurvensegments ist ein Kriterium für den Gradienten der Krümmung rund um den Scheitelpunkt einer Kurve. Zur Analyse des quasistationären Manöverprimitivs ist eine Segmentphase gleichbleibender Krümmung des Kurvensegments notwendig. Ein geeignetes Kriterium zur Bewertung der Konstanz in diesem Zusammenhang ist die Ableitung der Krümmung an der Stelle der maximalen Krümmung $\text{max}\kappa$ eines Segmentes mit der Einheit $\frac{1}{\text{m}^2}$.

$$\frac{d\kappa(\text{max}\kappa)}{ds} \leq \text{thresh} \quad (4.7)$$

Im Rahmen dieser Arbeit und aufgrund numerischer Instabilitäten beim Ableiten der aus öffentlichen Kartendaten erzeugten Krümmung wird für diesen Kennwert kein

¹⁰⁷ Schellin, A.; Sklenak, S.: Erkennung dynamischer Streckenabschnitte (2020).

Grenzwert (thresh) festgesetzt. Er wird im weiteren Verlauf daher auch nicht zur Bewertung oder Auswahl geeigneter Kurven verwendet.

- *Symmetrie*: Wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben ist zur Bewertung der Unterschiede bei Ein- und Ausleitung einer Kurvenfahrt eine symmetrische, also um den Mittelpunkt achsensymmetrisch spiegelbare Kurve notwendig. Ein Kriterium zur Bewertung dieser Eigenschaft ist in Formel (4.8) dargestellt:

$$\frac{\text{seg}_s}{\bar{R}} \geq 1 \quad (4.8)$$

Der Kennwert der Symmetrie ist einheitenlos. Durch das Verhältnis der Segmentlänge zum Median Radius \bar{R} werden Kurven mit symmetrischer Form, also dem minimalen Radius am Kurvenmittelpunkt höher bewertet als asymmetrische Kurven. Der Grenzwert wird so gewählt, dass Kurven mit einem Medianradius größer als der Segmentlänge nicht für eine Anwendung der Methodik herangezogen werden.

Zusammenfassend ist mit der hier vorgestellten Metrik die Bewertung und Auswahl geeigneter Kurvensegmente möglich. Die Anwendung der Kriterien für Symmetrie und Dynamik führen zur Bewertung in Abbildung 4-16.

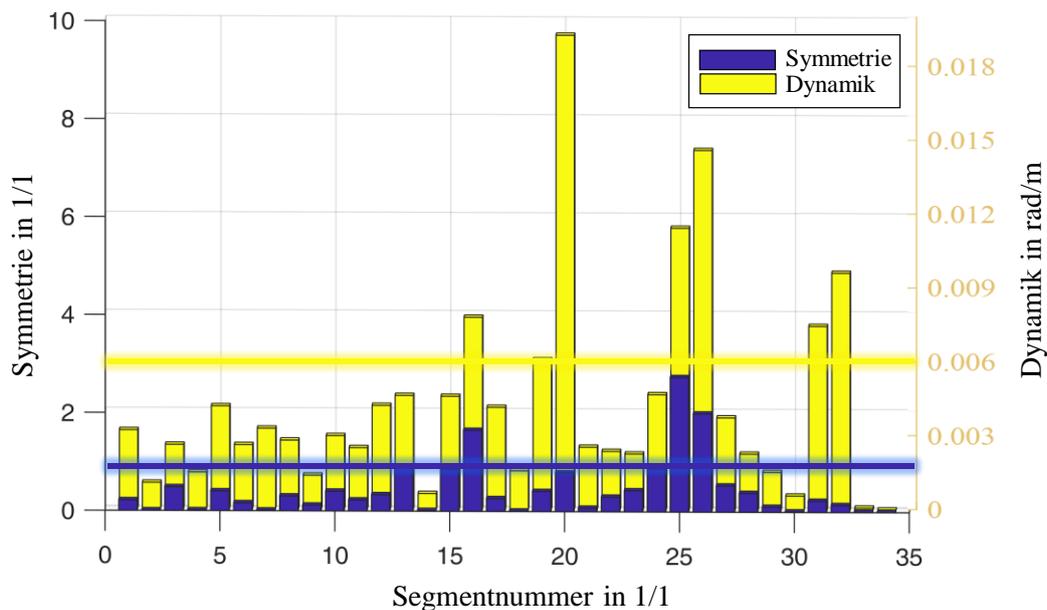


Abbildung 4-16 Ergebnis der Anwendung der Metrik zur Auswahl von Bewertungskurven je Kurvensegment, gelb: Dynamik, blau: Symmetrie Bewertung

Dargestellt sind die Kriterien für die Symmetrie auf Basis des Radius in blau und für die Dynamik in gelb. Mit der blauen und gelben Linie wird die Minimalanforderung an die Kennwerte markiert. Somit sind alle Kurvensegmente, deren Werte sich oberhalb der jeweiligen Linie befinden, geeignet für die Untersuchung der Methodik.

Segment 20 befindet sich im Bereich einer Straßenkreuzung und steht damit für die Methodik trotz hoher Dynamikwerte nicht zur Verfügung. Durch besonders hohe Dynamik fallen

ebenfalls die Segmente 31 und 32 auf. Infolge der geringen Bewertung beim Symmetriewert sowie der geringen Konstanz der Kurve werden auch diese Kurven für die Methodik ausgeschlossen. Die Segmente 16, 25 und 26 sind laut der Metrik zur Anwendung der Methodik geeignet. Segment 16 wird aufgrund der räumlichen Gegebenheiten mit umrandenden Parkplätzen direkt an der Fahrbahn ausgeschlossen. Somit werden die Kurvensegmente 25 und 26 zur prototypischen Erprobung im Straßenverkehr ausgewählt. Hier kann zudem direkt der Kurvenübergang analysiert werden, da es sich um eine Rechts-, Links-Kurvenkombination handelt.

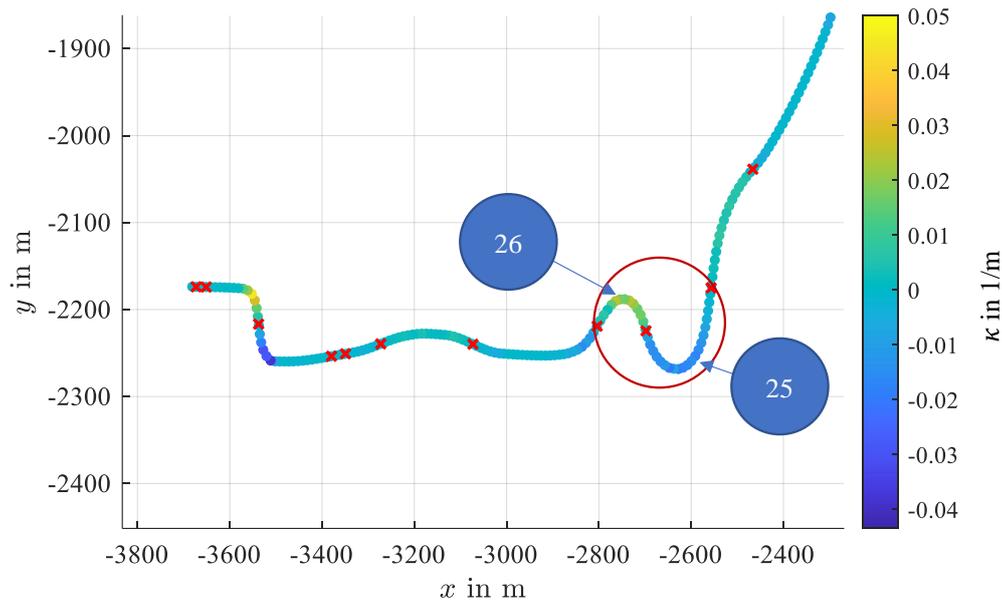


Abbildung 4-17 Für die prototypische Erprobung im Straßenverkehr ausgewählte Kurvensegmente, in Rot umrandet.

In Abbildung 4-17 rot umrandet dargestellt ist die aufgrund der Ergebnisse der Anwendung der Metrik aus diesem Kapitel ausgewählte Kurvenkombination mit dem zugehörigen Krümmungsverlauf. Ausgewählt werden die Segmente 25 und 26, von oben (Norden) kommend angefahren ergibt sich hiermit eine Rechts-links-Kurvenkombination, mit dynamischen Einleitungs- Ausleitungsphasen und einem großen Kurvenwinkel sowie einer hieraus resultierenden großen Konstanz der Kurven. Das ausgewählte Kurvensegment wird aufgrund der Kurvenradien und Kurvenwinkel als RE/LI-135/110-63/50 Kurve nach der in Kapitel 4.3.1 vorgestellten Benennungsmethode definiert.

4.4.3 Normierung der Kurvensegmente

Die nach Kapitel 4.4.1 segmentierten Kurven werden zum Vergleich verschiedener Fahrer oder auch einzelner Durchfahrten normiert.

Je Durchfahrt eines Kurvensegmentes wird in der Datenerfassung ein Messdatensatz im Zeitbereich erzeugt. Ziel der hier entwickelten Methode ist der Vergleich der verschiedenen

Durchfahrten eines Segmentes, sowohl von derselben Person, als auch im Vergleich zu anderen Personen.

Beispielhaft dargestellt sind in Abbildung 4-18 fünf aufeinander folgende Durchfahrten von Fahrer 1 durch die Bewertungskurve LI-180-12 im Zeitbereich. Links die zeitlichen Verläufe des Rollwinkels und rechts der Geschwindigkeit. Fahrer 1 wird zufällig gewählt, nicht aufgrund der Bewertung einer konstanten oder sportlichen Fahrweise. Das gezeigte Verhalten ist auf alle Probanden übertragbar.

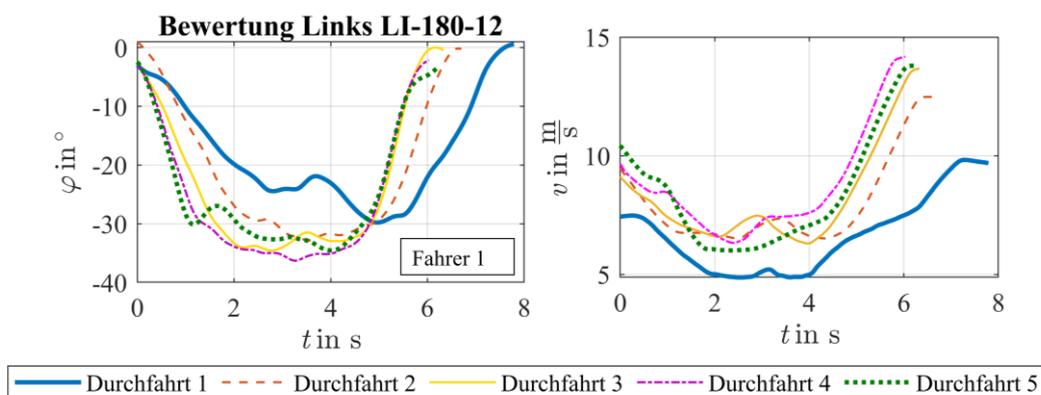


Abbildung 4-18 Zeitlicher Verlauf von (links) Rollwinkel und (rechts) Geschwindigkeitsverlauf bei fünf Durchfahrten durch die LI-180-12 Bewertungskurve von Fahrer 1 \diamond

Besonders beim Vergleich der ersten Durchfahrt mit der fünften wird klar, dass aufgrund der unterschiedlichen, gefahrenen Geschwindigkeit und der sich daraus ergebenden unterschiedlichen Verläufe keine Vergleichbarkeit ersichtlich ist.

Als Lösung wird der relative Kurvenfortschrittsbereich eingeführt. Eine Kurve wird hierfür jeweils auf einen Wert vom örtlichen Kurvenbeginn bis Kurvenende von 0 % bis 100 % normiert. Dieses Vorgehen basiert auf der Grundannahme einer in den Messdaten nahezu gleichbleibenden Segmentlänge bei wiederholter Durchfahrt einer Person, unabhängig davon wieviel Zeit hierfür benötigt wird. Implizit wird hierdurch die Annahme eines ähnlichen Verhaltens bei gleichen Umgebungsbedingungen getroffen, was ein Bestandteil der aufgestellten Forschungsfrage dieser Arbeit ist. Die Hypothese ist, dass ein Mensch beim Führen eines Motorrades nicht immer zeitlich aufeinander folgende und getaktete Handlungsmuster zeigt. Es wird angenommen, dass an einer ähnlichen Stelle (örtlich) einer Kurve eine wiederholbare Handlung ausgeführt wird. Diese Hypothese wird im weiteren Verlauf, insbesondere in Kapitel 5 Modellbildung und Schwellwerte intensiv untersucht.

Die relative lokale Betrachtung des Kurvenverlaufs erzeugt aus den äquidistanten Zeitschritten der Messdatenaufzeichnung, deren diskrete Schritte in der transformierten Form zunächst keinen äquidistanten Abstand mehr aufweisen, den relativen streckenbezogenen Kurvenfortschritt. Eine äquidistante Schrittweite des Kurvenfortschritts ist jedoch für die weitere Messdatenverarbeitung notwendig. Es wird daher eine lineare Interpolation der transformierten Werte durchgeführt, so dass die diskreten Werte im Kurvenfortschrittsbereich wieder äquidistant vorliegen. Für die einfache Anwendbarkeit und die effiziente Weiterverarbeitung

der Messdaten ist es zweckmäßig, die Schrittweite der Diskretisierung des Kurvenverlaufs so groß wie möglich und so klein wie nötig zu wählen. Die Umwandlung vom Zeitbereich in den Kurvenfortschrittsbereich geht je nach Geschwindigkeitsänderung mit einer Dehnung oder Stauchung der Signale einher. Die mögliche Frequenzerhöhung durch die Transformation muss bei der Datentransformation berücksichtigt werden.

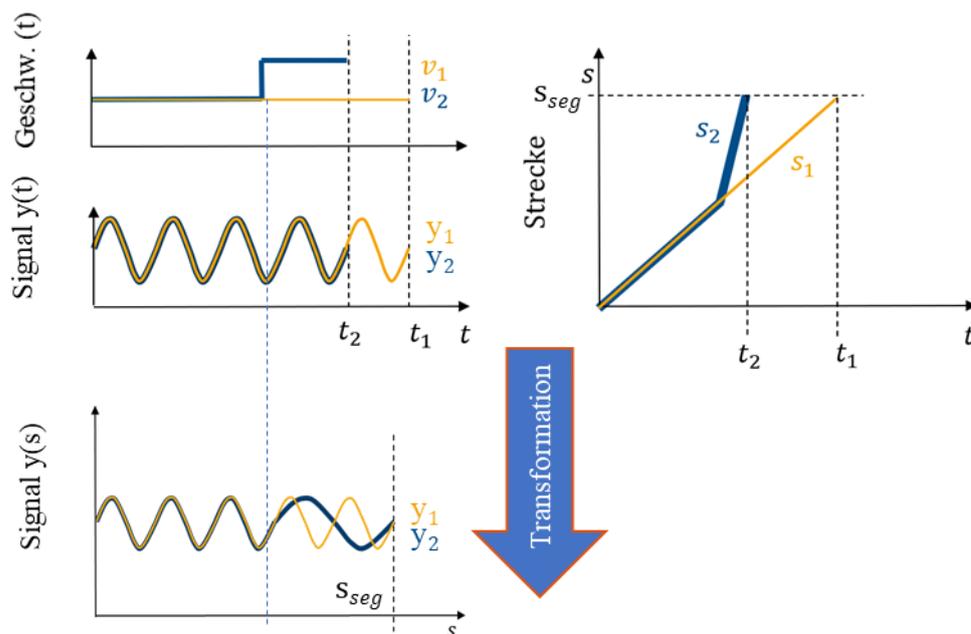


Abbildung 4-19 Streckung und Stauchung der Zeitsignale bei der Transformation in den Streckenfortschrittsbereich

In Abbildung 4-19 (unten) beispielhaft dargestellt ist die, bei Signalen zeitlich unterschiedlicher Länge resultierende Streckung des transformierten Signals in Abhängigkeit eines Geschwindigkeitssprungs. Oben links und rechts in dieser Abbildung sind die beiden zeitlichen Signale, links das Signal selbst und der Geschwindigkeitsverlauf, rechts die in der Zeit zurückgelegte Strecke je nach Geschwindigkeit dargestellt.

Je größer die Fahrzeuggeschwindigkeit v ist, desto stärker werden die Signale bei der Transformation in den Kurvenfortschrittsbereich gestreckt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass eine Schwingung umso stärker gestaucht wird, je langsamer sich das Fahrzeug fortbewegt. Die zurückgelegte Strecke wächst langsamer, so dass bezogen auf die Strecke eine Erhöhung der Frequenz stattfindet. Nachfolgend wird eine Herleitung zur Ermittlung einer minimal notwendigen Frequenz bzw. Auflösung der Daten im Kurvenfortschrittsbereich aufgeführt.

Als Ausgangsform für die komplex ergänzte Darstellung eines beliebigen periodischen Signals $y(t)$ wird Formel (4.9) verwendet. Die hieraus resultierende Frequenz f des Signals ist in Formel (4.10) dargestellt.

$$y(t) = e^{iat} \quad (4.9)$$

$$f = \frac{\alpha}{2\pi} \quad (4.10)$$

Im weiteren Verlauf sowie den gezeigten Formeln steht α für die Kreisfrequenz des Signals im Zeitbereich.

Zur Herleitung wird der Fall eines Signals mit konstanter Geschwindigkeit $v = \text{const.}$ betrachtet. Hierbei besteht der lineare Zusammenhang zwischen der zurückgelegten Strecke s , der Fahrzeuggeschwindigkeit v und der Zeit t nach Formel (4.11)

$$s = v \cdot t \text{ oder } t = \frac{s}{v} \quad (4.11)$$

Angewandt auf Formel (4.9) ergibt sich hiermit für das Signal im streckenbezogenen Bereich Formel (4.12):

$$\tilde{y} = e^{i\frac{\alpha}{v}s} = e^{i\frac{f}{2\pi \cdot v}s} \text{ mit } \tilde{y} = y(s) \quad (4.12)$$

Im weiteren Verlauf (wie auch hier) werden Darstellungen im streckenbezogenen Bereich mit einer Tilde wie bei $\tilde{y} = y(s)$ gekennzeichnet. Somit ergibt sich für die Frequenz in Abhängigkeit der Strecke \tilde{f} Formel (4.13)

$$\tilde{f} = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \frac{1}{v} \quad (4.13)$$

Bei Betrachtung von Signalen mit nicht konstanter, sich ändernder Geschwindigkeit wird eine differentielle Betrachtung notwendig. Für den Zusammenhang zwischen Streckenfortschritt s , der Zeit t und der Geschwindigkeit v resultiert der Zusammenhang in Formel (4.14):

$$t = \int_s \left(\frac{1}{v}\right) ds \text{ mit } \frac{ds}{dt} = v \quad (4.14)$$

Hieraus ergibt sich für eine beliebiges Messsignal y über der Streckenlänge s Formel (4.15):

$$\tilde{y} = e^{i\alpha \int_s \left(\frac{1}{v}\right) ds} \text{ mit } \tilde{y} = y(s) \quad (4.15)$$

Und respektive für die Frequenz \tilde{f} im Bezug zur zurückgelegten Strecke Formel (4.16):

$$\tilde{f} = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \int_0^s \left(\frac{1}{v}\right) ds \quad (4.16)$$

Durch die bereits beschriebene Darstellung eines relativen normierten Streckenfortschritts in Abhängigkeit der Segmentlänge zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Strecken- oder Kurvenssegmente wird der prozentuale Streckenbezug \check{s} in Formel (4.17) eingeführt.

$$\check{s} = \frac{s}{s_{\text{seg}}} ; \check{s} \in [0; 1] \quad (4.17)$$

Eingesetzt in die Formeln (4.15) und Formel (4.16) ergibt sich hiermit für ein Signal y und die Frequenz f im relativen Kurvenfortschritt s :

$$y(\check{s}) = e^{i\alpha \int_0^{s_{seg} \cdot \check{s}} \left(\frac{1}{v}\right) \cdot s_{seg} \cdot ds} \quad (4.18)$$

$$\check{f} = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \int_0^{s_{seg} \cdot \check{s}} \left(\frac{1}{v}\right) ds \quad (4.19)$$

Für die notwendige Auflösung bzw. die Abtastrate T ergibt sich unter Berücksichtigung des Shannonschen Abtasttheorems¹⁰⁸ folgende Anforderung *Anf-Dat-Erf-3* an die Transformation eines beliebigen Signals in Abhängigkeit der Messfrequenz f des Ausgangssignals und der Fahrzeuggeschwindigkeit v :

$$T_{abstast} = \frac{v}{2 \cdot f \cdot s_{seg}} \quad (4.20)$$

Die Veränderung der Geschwindigkeit und die hieraus resultierende Streckung oder Stauchung eines Signals bei der Transformation in den streckenbezogenen Kurvenfortschrittsbereich ist nachfolgend beispielhaft dargestellt.

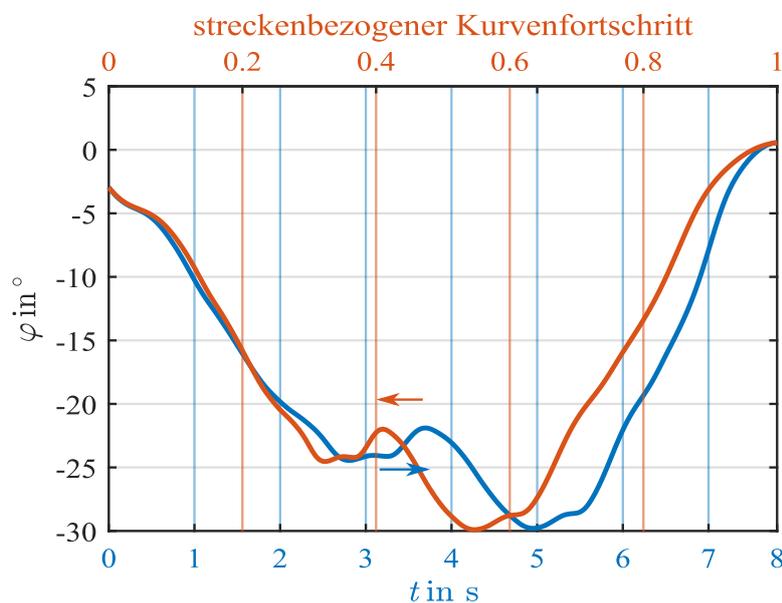


Abbildung 4-20 Beispielhafte Transformation in den streckenbezogenen Kurvenfortschritt \diamond

¹⁰⁸ Plaßmann, W.: Abtasttheorem (2016).

Abbildung 4-20 veranschaulicht die Wirkung der Streckung und Stauchung bei der Transformation aus dem Zeitbereich in den Kurvenfortschrittsbereich am Beispiel eines aufgezeichneten Rollwinkelsignals. Beispielhaft gewählt ist hierfür die auch in Abbildung 4-20 dargestellte erste Durchfahrt durch die LI-180-12 Kurve von Fahrer 1 der Teststreckenuntersuchung. In blau das Signal im Zeitbereich, in rot das transformierte Signal in der relativen, streckenbezogenen Kurvenfortschrittsdarstellung.

5 Modellbildung

Das folgende Kapitel beschreibt das methodische Vorgehen bei der Entwicklung des Fahrermodells, sowie die Entwicklung des Trajektorienprädiktionsmodells.

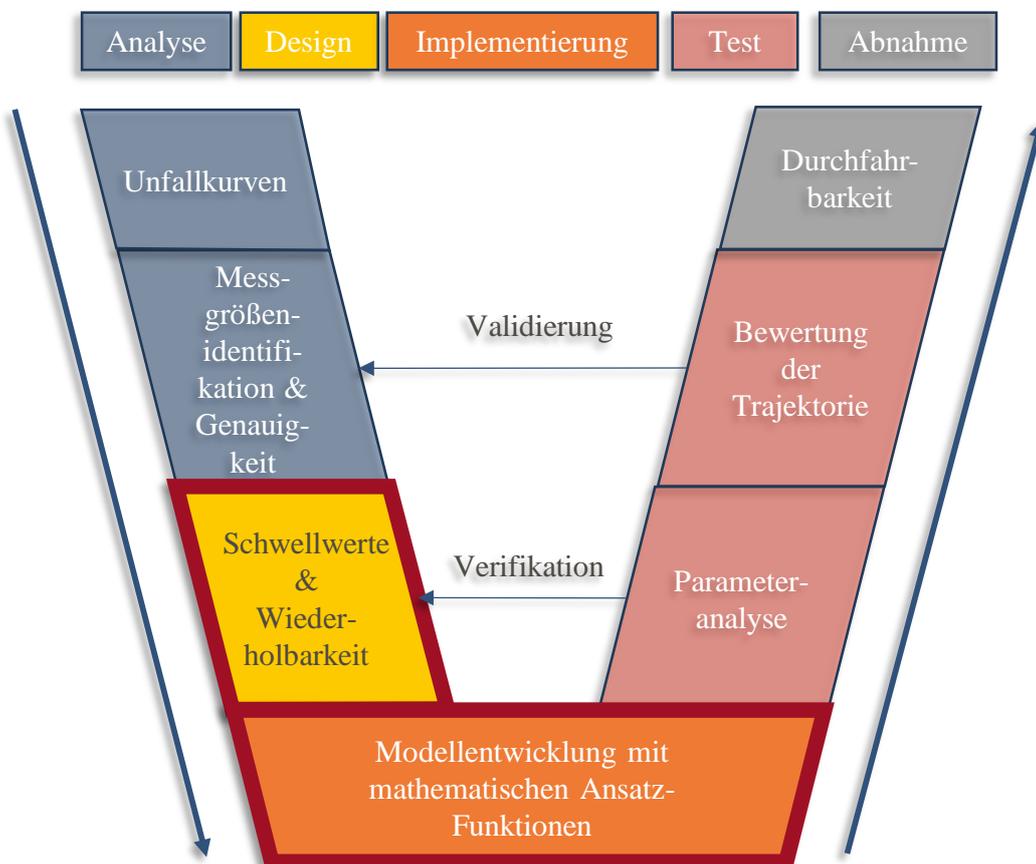


Abbildung 5-1 Methodisches Vorgehen der Modellbildung mit der Designphase und Implementierungsphase

In Abbildung 5-1 hervorgehoben ist der Bereich des V-Modells aus Kapitel 1.2, der in Kapitel 5 behandelt wird. Nach einer Beschreibung des allgemeinen Vorgehens bei der Modellbildung werden mittels einer Schwellwertuntersuchung und einer Untersuchung der Wiederholbarkeit beim Durchfahren von Kurven Anforderungen an das Modell abgeleitet. Dies entspricht der Designphase der Modellentwicklung.

In den Unterkapiteln 5.4 bis 5.7 wird die Implementierung des Modells beschrieben. Diese unterteilt sich zum einen in die Auswahl mathematischer Ansatzfunktionen zur Beschreibbarkeit der Fahrerspezifität, bzw. der Umsetzung der aus den vorherigen Kapiteln erarbeiteten Modellanforderungen. Zum anderen wird der gewählte Ansatz zur Berechnung einer zukünftigen Position in der Kurvenfahrt vorgestellt. Die für die Berechnung notwendigen Zusatzgrößen werden hinsichtlich der Interpretierbarkeit der erzeugten Werte untersucht. Zuletzt werden die ansatzbedingten Modellgrenzen beschrieben.

5.1 Allgemeiner Ansatz der Modellbildung

Statistische Nachweise über eine Möglichkeit der Eingliederung fahrdynamischer Größen in verschiedene Fahrfertigkeitsklassen sind aus der Literatur bereits bekannt¹⁰⁹.

Die Untersuchung der Forschungsfragen bezüglich der Existenz und Nutzbarkeit von Schwellwerten bei Motorradfahrten in Kurven setzt eine Ähnlichkeit bei der wiederholten Durchführung einer Kurvenfahrt von einer Person bei gleichbleibenden Bedingungen voraus.

Zur Untersuchung dieser Hypothese ist die Beobachtung der wiederholten Durchführung einer Kurve bei gleichzeitiger Kontrolle der Umgebungseinflüsse notwendig. Hierfür wird in Kapitel 4.3.1 die Bewertungskurve eingeführt, welche mit immer demselben Fahrzeug, bei möglichst gleichen Umweltbedingungen wie Wetter, Temperatur, Straßenzustand und allen weiteren Umwelt-Einflüssen, aufgeführt in Kapitel 4.1, durchfahren wird. Aufgrund der Durchführung von Messfahrten auf abgesperrtem Gelände wird zudem eine mögliche Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer ausgeschlossen.

Die nach Kapitel 4.4.1 segmentierten Kurvendurchfahrten – je Fahrer und Durchfahrt existiert somit ein Datenssegment – werden im nächsten Schritt in die einzelnen Kurvenprimitive in Anlehnung an Magiera aufgeteilt.

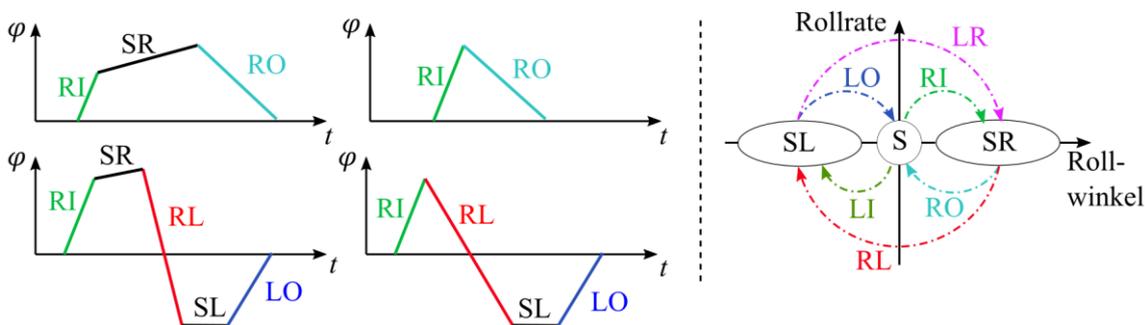


Abbildung 5-2 Kurvenprimitive als Darstellung von Rollwinkel und Rollrate, angelehnt an Magiera¹⁰⁹

Auf Basis der Rollwinkel- und Rollratenverläufe lässt sich - wie in Abbildung 5-2 beispielhaft dargestellt – eine Kurvenfahrt in die dynamischen Primitive der Kurven-Einleitung (RI, LI), -Ausleitung (RO, LO) oder Kurvenüberleitung (RL, LR) und die quasistationären Anteile der stationären Kurvenfahrt Links (SL) oder Rechts (SR) aufteilen. Der Zustand der stationären Geradeausfahrt tritt aufgrund der Vorsegmentierung der Daten nicht mehr auf und ist kein Bestandteil des hier entwickelten Modells. Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die hier genutzten Primitivbezeichnungen in den

¹⁰⁹ Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020).

dynamischen Kurvenausleitungsprimitiven nicht mit den durch Magiera¹¹⁰ eingeführten Bezeichnungen übereinstimmen.

Jedes auf diese Weise segmentierte Kurvenprimitiv wird für den nächsten Schritt als eigenständige mathematische Kurve betrachtet. Für jedes Primitiv wird ein analytisch mathematischer Ansatz gesucht, der die typische Form dieser Kurve beschreibt, angelehnt an das Vorgehen aus der Literatur in Kapitel 3.2.3. Wie in Kapitel 4.1 hergeleitet liegt der Fokus bei der Erarbeitung des Modells auf den Werten Rollwinkel und Geschwindigkeit. Die Annäherung mittels der minimalen Fehlerabweichung eines jeden gemessenen Primitivs mit einem analytisch mathematischen Ansatz ergibt je Durchfahrt und Fahrer einen Satz zusammenhängender Koeffizienten. Diese eröffnen die Möglichkeit des Vergleichs verschiedener Kurvenfahrten eines Fahrers oder auch verschiedener Fahrer oder Kurven zueinander.

Im weiteren Verlauf werden durch die Erarbeitung mittels der Untersuchung verschiedener Schwellwerte weitere Anforderungen an das zu entwickelnde Modell gestellt. Diese sind sowohl notwendig für die Entwicklung des fahrer- und kurvenspezifischen Modells, können aber auch allgemeingültig für vergleichbare Modellentwicklungen als Grundlage dienen. Die Verifikation des Erreichens dieser Anforderungen mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modells wird im Kapitel 6.1 mittels einer Parameteranalyse durchgeführt.

Zur Überprüfung der Validität dieses Ansatzes wird auf Basis der Modellgrößen eine Trajektorie geschätzt, die mit den Messungen der Position und Geschwindigkeit verglichen wird. Hieraus ergibt sich als Fehler des Modells eine laterale Abweichung, die als Gütekriterium zur Bewertung des Modells herangezogen wird. Die für die Validierungsmessungen genutzte Messtechnik wird in Kapitel 4.2.1 vorgestellt.

5.2 Modellanforderungen aus Schwellwertuntersuchungen

Der im vorherigen Kapitel 5.1 vorgestellte Ansatz basiert auf der Annahme einer wiederholten Handlungsweise eines Motorradfahrers beim mehrfachen Durchfahren derselben Kurven unter gleichbleibenden Bedingungen. In Kapitel Methodik 4.1 werden die Zielmessgrößen zur Erfassung des spezifischen Verhaltens festgelegt. Auf Basis dieser Messgrößen wird nachfolgend eine Eingliederung der Schwellwerte dieser Messgrößen beim wiederholten Durchfahren einer Kurve durchgeführt. Der Fokus liegt hierbei insbesondere auf den Schwellwerten für die Messgrößen Rollwinkel und Geschwindigkeit. Werte für Bremsengriffe und Lenkmoment werden als zusätzliche Bewertungsgrößen hinzugezogen, jedoch für die Erarbeitung des Modells aufgrund der getroffenen Vorauswahl nicht weiter betrachtet.

¹¹⁰ Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020).

Zur Eingliederung unterschiedlicher Fahrertypen wird nach Kapitel 4.3.4 im folgenden Verlauf häufig Fahrer 4 mit einer defensiven Fahrweise und geringer Fahrpraxis, Fahrer 6 mit gleich hoher Bewertung für defensives und sportliches Verhalten bei geringer Fahrpraxis und Fahrer 8 mit sportlicher Selbsteinschätzung und großer Fahrpraxis, sowie Fahrer 7 mit defensiver Einschätzung und großer Praxis stellvertretend genutzt.

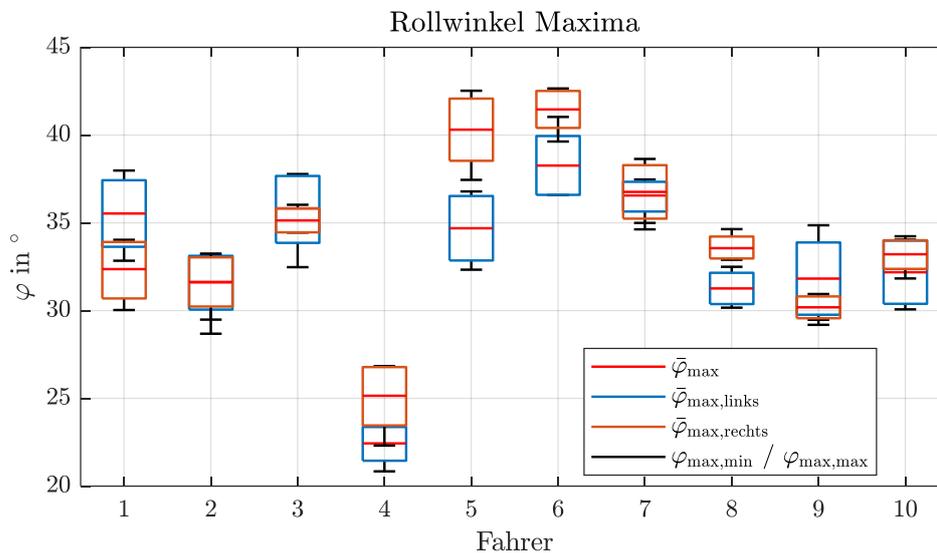


Abbildung 5-3 Rollwinkel Verteilung aller Durchfahrten der Bewertungskurven RE-180-12 und LI-180-12, aller 10 Fahrer, farblich getrennt nach Kurvenrichtung nach Scherer et. al.¹¹¹ \diamond

In Abbildung 5-3 dargestellt sind alle Rollwinkelschwellwerte der 130 Kurvensegmente aller 10 Fahrer aus der Teststreckenstudie \diamond beim Durchfahren der Bewertungskurven RE-180-12 und LI-180-12. Als Grundlage der Darstellung dienen die Medianwerte der Rollwinkelmaxima im Kurvenfortschrittsbereich, was bei der symmetrischen Bewertungskurve den Rollwinkelwerten zum Kurvenmittelpunkt entspricht. Obere und untere Grenze der Box bilden das 25 %- und 75 %-Quantil der Medianwerte aller Einzeldurchfahrten. Zudem sind farblich getrennt dargestellt die Durchfahrten in positiver und negativer Krümmungsrichtung. Hierbei wird deutlich, dass bei wiederholter Durchfahrt sichtbare Unterschiede in den Schwellwerten der Rollwinkel zwischen verschiedenen Fahrern existieren. Fahrer 4 als defensiver Fahrer mit geringer Erfahrung fährt zum Beispiel wiederholt geringere maximale Rollwinkel als alle anderen Fahrer. Fahrer 8 mit der größten Fahrerfahrung sticht nicht durch das Erreichen der größten Maxima heraus. Somit ist das absolute Maximum eines Rollwinkelwertes kein geeignetes Kriterium zur Eingliederung der Fahrer, was sich mit der Literatur¹¹² deckt. Die Größe der Boxen, die der Schwankung in der Wiederholung der einzelnen Durchfahrten entspricht, korreliert mit der Einschätzung der Fahrfähigkeit. Ein erfahrener Fahrer fährt wiederholbar ein ähnliches Rollwinkelmaximum an, als ein weniger erfahrener.

¹¹¹ Scherer, F. et al.: Schräglagenangst (2021), S. 43.

¹¹² Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020).

Unterschiede zwischen der Durchfahrungsrichtung einer Kurve sind existent, jedoch nicht fahrerübergreifend festzustellen. Beispielsweise existiert bei Fahrer 2 kaum ein Unterschied, während Fahrer 5 deutliche Unterschiede zwischen der Durchfahrungsrichtung der Kurve aufweist. Somit ist die Unterscheidung in Links- und Rechtskurven bei der Entwicklung des Modells notwendig.

Im weiteren Verlauf wird zur Steigerung der Übersichtlichkeit stellvertretend nur noch eine Kurvenrichtung (Rechtskurven) betrachtet. Dabei ist zu erwähnen, dass die Werte im Vergleich zu Abbildung 5-4 leicht variieren. Es liegen insgesamt $n_c = 6$ Kurvendurchfahrten je Fahrer vor. Eine detaillierte Erklärung der Datenerfassung befindet sich in Kapitel 4.3.5.

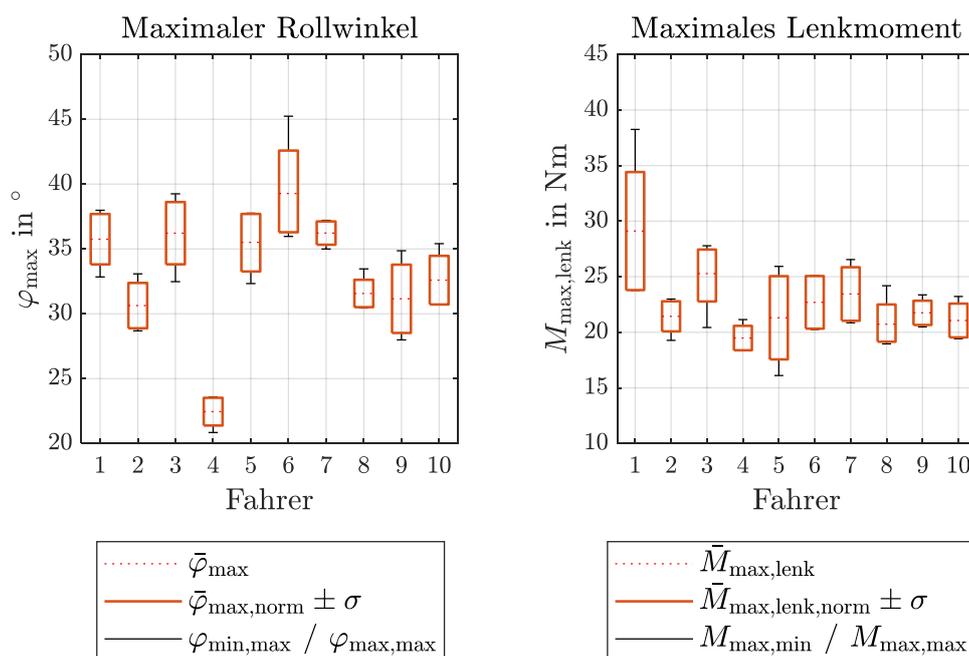


Abbildung 5-4 Boxplots, Bewertungskurve RE-180-12, Links Rollwinkel, rechts Lenkmoment, Je Fahrer $n_c = 6$ Kurvendurchfahrten nach Pleß et. al.¹¹³ \diamond

In Abbildung 5-4 dargestellt sind links Rollwinkelschwellwerte der RE-180-12 Bewertungskurve aller Probanden und rechts die zugehörigen Medianwerte der Lenkmomente. Hierbei ist ersichtlich, dass bis auf bei Fahrer 1 alle Schwellwerte in einem ähnlichen Bereich liegen. Insbesondere der Vergleich von zum Beispiel Fahrer 1 und 3 macht deutlich, dass mit unterschiedlich verteilten Lenkmomentwerten ähnliche Rollwinkelverteilungen erreicht werden. Dies macht deutlich, dass eine reine Betrachtung der Schwellwerte der Rollwinkel nicht ausreicht, um fahrerspezifisches Verhalten zu modellieren. Das Lenkmoment steht indirekt im Bezug zu den dynamischen Anteilen einer Kurvenfahrt. Hohe Werte sind hier gleichzusetzen mit starken, dynamischen Fahrereingriffen im Verlauf der Kurvenfahrt. Dies können sowohl Korrekturen während der quasistationären Phase als auch besonders dynamische

¹¹³ Pleß, R. et al.: Schräglagenschwelle bei Motorradfahrern (2020), S. 12–13.

Kurveneinleitungs- oder Kurvenausleitungsvorgänge sein. Zudem ist hier keine Korrelation zwischen der Selbsteinschätzung - Fahrer 1 als defensiver Fahrer und Fahrer 3 als sportlicher Fahrer oder der Fahrpraxis in diesen Schwellwerten ersichtlich.

Hieraus resultiert die Anforderung *Anf-Mod-Fah-1* an das zu entwickelnde Modell, bei allen Kurvensegmenten auch dynamische Änderungen abbilden zu können. Aufgrund der in Kapitel 4.1 definierten Zielkenngrößen und dem Zusammenhang zwischen Eingriffen durch den Fahrer am Lenker und der daraus resultierenden Veränderung der Rollrate wird diese, beziehungsweise die Ableitung des Rollwinkels als relevant für die Modellentwicklung erachtet.

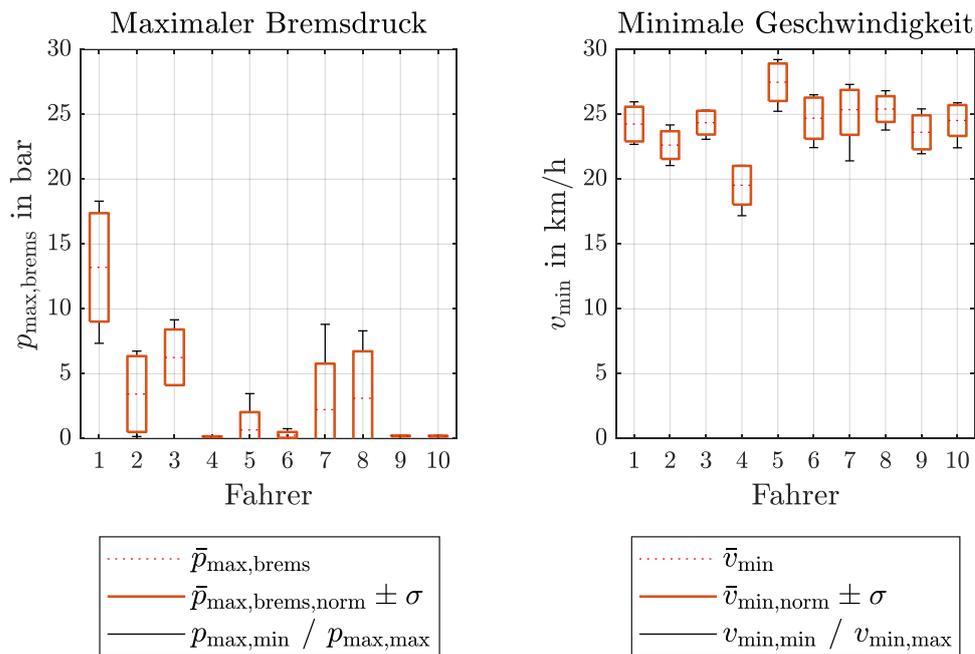


Abbildung 5-5 Boxplots, Bewertungskurve RE-180-12, Links Bremsdruck, rechts Geschwindigkeit, Je Fahrer $n_c = 6$ Kurvendurchfahrten \diamond

In Abbildung 5-5 werden links Bremsengriffe (Vorderrad- und Hinterradbremse in einer Darstellung) durch Probanden bei allen Durchfahrten der RE-180-12 Bewertungskurve und rechts der Zusammenhang mit der resultierenden Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt. Aus dem Geschwindigkeitsverlauf rechts lässt sich ablesen, dass die Kurvengeschwindigkeit sowohl im Median, als auch bei den Minima und Maxima Schwellwerte zwischen ca. $v = 17$ km/h und $v = 28$ km/h aufweist. Dies deutet auf eine starke Variation der Kurvengeschwindigkeit im Verlauf der Kurve hin. Hieraus wird ersichtlich, dass auch der Geschwindigkeitsverlauf als dynamisches Signal betrachtet werden muss. Der in Abbildung 5-5 links dargestellte Bremsdruck zeigt starke Unterschiede zwischen den Fahrern auf. Bei insgesamt drei Fahrern sind keinerlei Bremsengriffe im Kurvenverlauf sichtbar. Im Gegensatz hierzu gibt es zwei Fahrer die bei jeder der $n_c = 6$ Durchfahrten Bremsdruck anlegen. Fünf Fahrer zeigen unterschiedliches Verhalten, von keinem Bremsengriff bis teils starkem Bremsengriff (Fahrer 7) im Verlauf der Durchfahrten. Hierbei ist keine eindeutige

Korrelation zwischen der Selbsteinschätzung ersichtlich. Fahrer 4, 7 und 9 zum Beispiel stufen sich alle als defensive Fahrer ein, der Bremseneingriff variiert von sehr stark bis nicht vorhanden. Ebenso besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Nutzung der Bremse und der Fahrerfahrung. Fahrer 4 und Fahrer 5 zum Beispiel, beide mit wenig Fahrerfahrung, zeigen deutlich unterschiedliches Verhalten auf. Dieses Erkenntnis deckt sich nicht mit der Literatur aus Kapitel 3.2.2. Dies bedeutet, dass bei einer statistischen Betrachtung über einen längeren Beobachtungszeitraum ein anderes Ergebnis als bei der Betrachtung von Einzelkurven möglich ist.

Aufgrund der Abbildung der Bremseneingriffe und in Bezug auf Kapitel 4.1 wird somit die Betrachtung des dynamischen Geschwindigkeitsverlaufes für die weitere Modellentwicklung als Anforderung *Anf-Mod-Fah-2* gesetzt.

Zusammenfassend lassen sich in den Werten Rollwinkel und Geschwindigkeit deutliche Schwellwerte erkennen. Eine Unterscheidung bei der Kurvenrichtung ist notwendig. Ebenso der Einbezug der Dynamik beider Signale. Zudem wird aus den Schwellwerten ersichtlich, dass keine eindeutige Korrelation zwischen der Selbsteinschätzung, der Fahrerfahrung und dem Verhalten ersichtlich ist.

5.3 Modellanforderungen aus der Wiederholbarkeit

Die in Kapitel 5.2 gezeigten Zusammenhänge zwischen der wiederholten Durchfahrt einer Kurve und wiederholbarer Schwellwerte bei Rollwinkel und Geschwindigkeit werden im weiteren Verlauf detaillierter betrachtet. Die alleinige Berücksichtigung der Schwellwerte ist nicht ausreichend für die Beschreibung fahrerspezifischen, kurvenabhängigen Verhaltens. Zudem ist aus Kapitel 5.2 eine genauere Untersuchung der dynamischen Verläufe der einzelnen Durchgänge als Modellanforderung hervorgegangen.

Abbildung 5-6 stellt diese detaillierten Verläufe von Rollwinkel (oben), Geschwindigkeit (Mitte) und Gierrate (unten) der drei Fahrer 4, 8 und 9 im Vergleich zueinander dar. Alle Messwerte der $n_c = 13$ Durchfahrten von LI-180-12 (links) und RE-180-12 (rechts) sind hierbei nach der Methode in Kapitel 4.4.3 auf den relativen streckenbezogenen Kurvenfortschritt normiert (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \diamond siehe Kapitel 4.3.5). Fahrer 4 und 9 bewerten die eigene Fahrweise als defensiv, Fahrer 8 schätzt die eigene Fahrweise als sportlich ein.

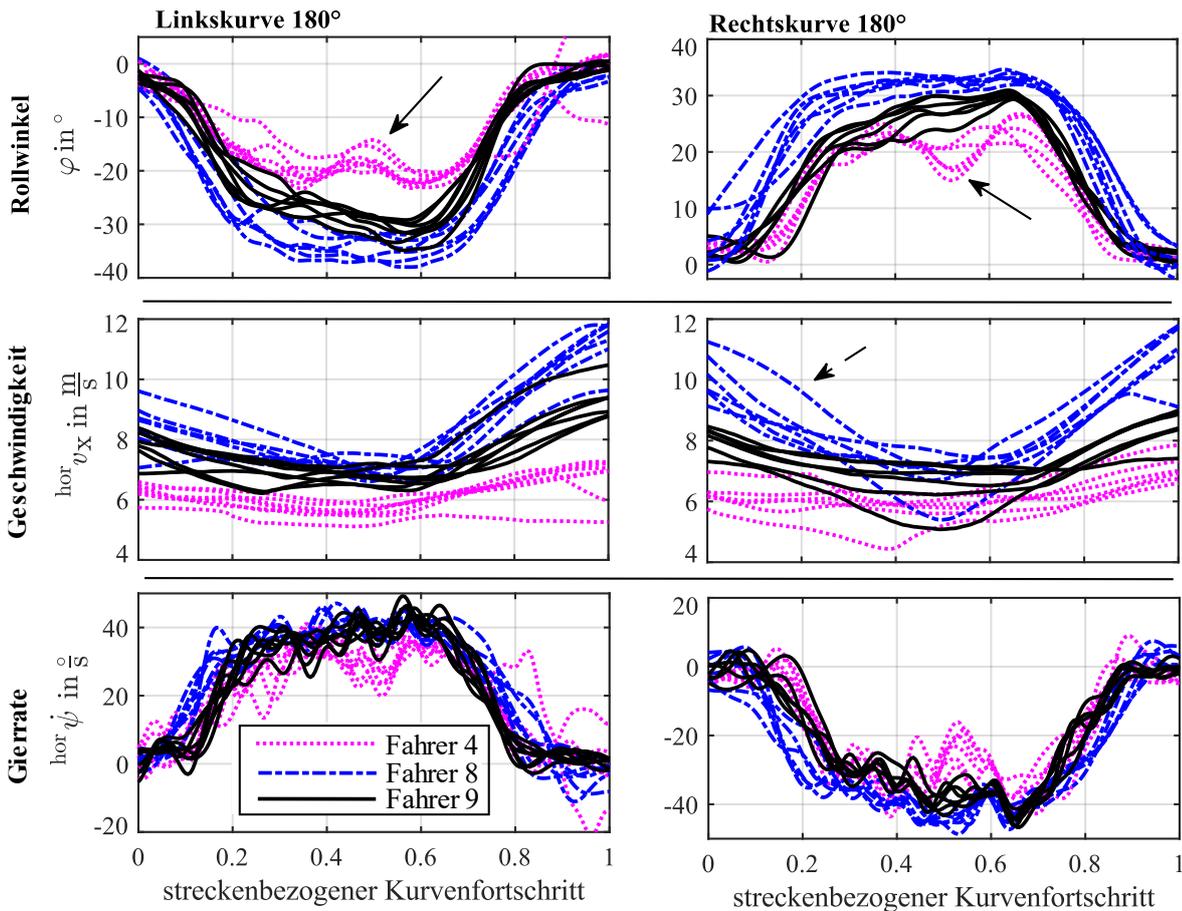


Abbildung 5-6 Rollwinkel-, Geschwindigkeits- und Gierratenverläufe von Fahrer 4,8,9 im Vergleich der RE-180-12 und LI-180-12 Kurven nach Scherer und Basten¹¹⁴ ◇

Beim Betrachten der Rollwinkelverläufe (oben) wird deutlich, dass alle drei Fahrer wiederholbar zueinander unterschiedliches, jedoch zu sich selbst ähnliches Verhalten aufzeigen. Fahrer 4 mit den geringsten Rollwinkelschwellwerten in Kapitel 5.2 weist in beiden Kurvenrichtungen eine sichtbare Veränderung etwa in der Kurvenmitte auf (gekennzeichnet durch einen Pfeil). Diese Veränderung ist nur im Rollwinkel und Gierratensignal erkennbar, nicht im Geschwindigkeitsverlauf. Eine mögliche Erklärung ist ein Eingriff von Fahrer 4 durch Aufbringen einer Lenkmomentänderung, was aus der Auswertung der Lenkmomentverläufe aufgrund der Messweise nicht hervorgeht.

Der Geschwindigkeitsverlauf von Fahrer 9 ist dem von Fahrer 4 ähnlich, verschoben um ca. $v = 2 \text{ m/s}$. Der Beginn der Rollwinkelverläufe der beiden Fahrer ist zudem ähnlich, Fahrer 9 stellt in der Kurveneinleitungsphase einen höheren Zielrollwinkel ein. In der quasistationären Phase ist bei Fahrer 9 eine stetige Steigerung des Rollwinkels, bei gleichzeitig nahezu gleichbleibender Geschwindigkeit ersichtlich. Dies deutet auch hier auf eine Erhöhung des Rollwinkels durch Aufbringen eines einlenkenden Lenkmoments hin. Fahrer 8 erreicht die

¹¹⁴ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 279.

größten Rollwinkelwerte, bei gleichzeitig konstantem Rollwinkelwert in der stationären Phase (insbesondere in der RE-180-12 Kurve erkennbar).

Hervorzuheben ist in dieser Darstellung zusätzlich der Zeitpunkt der Kurveneinleitung. Fahrer 4 und Fahrer 9 beginnen die Kurveneinfahrt später als Fahrer 8, ersichtlich sowohl in den Messwerten des Rollwinkels, als auch der Gierrate. Zum einen bedeutet dies, dass Fahrer 8, der direkt mit der dynamischen Kurveneinleitungsphase einen Zielrollwinkel erreicht als die anderen beiden Fahrer mehr Strecke für die Kurveneinleitungsphase benötigt und zum anderen, dass bei späterer Einleitung entweder eine höhere Dynamik notwendig oder ein insgesamt niedriger erreichbarer Rollwinkel möglich ist.

Zur Analyse der Wiederholbarkeit der Kurvenprimitiv-Phasenübergänge von Kurveneinleitung, stationärer Phase und Ausleitung werden die Zeitpunkte des Beginns eines jedes Primitives analysiert.

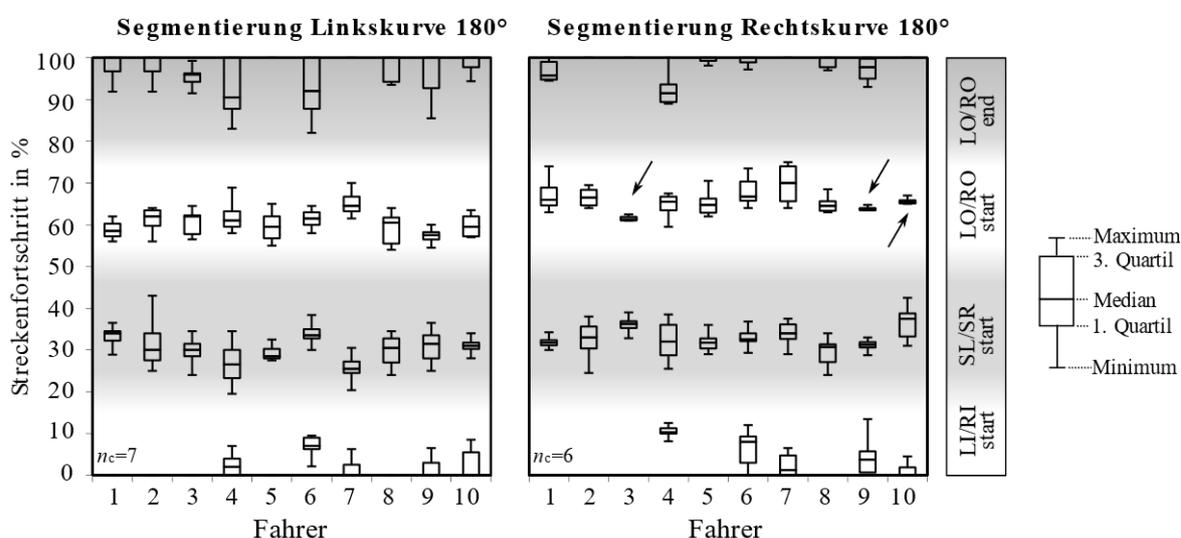


Abbildung 5-7 Kurven-Primitivübergänge, Wiederholbarkeit aller 10 Fahrer \diamond

In Abbildung 5-7 dargestellt sind jeweils die Primitiv-Übergangswerte, angegeben im relativen Streckenfortschritt, der jeweiligen Kurvenprimitive aus Kapitel 5.1 (Allgemeiner Ansatz). Jeweils aufgezeigt sind die Medianwerte und zugehörige erste und dritte Quartilwerte als Boxplots von insgesamt 13 Durchfahrten der LI-180-12 ($n_c = 7$) und RE-180-12 ($n_c = 6$) Bewertungskurven-Durchfahrten aller 10 Fahrer (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \diamond siehe Kapitel 4.3.5).

Zu lesen ist die Darstellung von unten nach oben. Kommend aus der Geradeausfahrt beginnt unten die Einfahrt in die Kurve. Als erster Wert eingetragen ist die Streuung der Startwerte der dynamischen Kurveneinfahrt in entweder die Linkskurve *LI-start* (links) oder Rechtskurve *RI-start* (rechts). Der Primitivübergang in die stationäre Kurvenphase *SL-start* oder *SR-start* ist gleichzeitig das Ende der vorherigen dynamischen Phase. In umgekehrter Reihenfolge leitet der *LO-start* und *RO-start* vom Ende der stationären Kurvenphase in den Beginn der dynamischen Kurvenausleitungsphase über. Das Ende des gesamten

Kurvensegmentes bzw. auch der dynamischen Kurvenausleitung ist mit *LO-end* oder *RO-end* gekennzeichnet.

Die hier ermittelten Übergänge decken sich mit der Erkenntnis aus Abbildung 5-6. So beginnen beispielsweise Fahrer 4 und Fahrer 9 die Einleitung der Kurve später als Fahrer 8. Alle Fahrer, bei denen der Beginn der Einleitungsphase vor dem segmentierten Kurvenelement bzw. das Ende des dynamischen Primitivs nach dem Segmentende liegt, haben dementsprechend an der Stelle im Plot keinen Wert eingetragen. Dies ist erklärbar durch die Wahl der Segmentierungsmethode in Form eines Grenzwertes im Rollwinkel. Bei Fahrern, die schon sehr früh von einer Geradeausfahrt in eine Kurvenfahrt übergehen, kann somit der Beginn oder das Ende des Primitivs außerhalb des segmentierten Bereichs liegen. Zurückzuführen ist dies auf den Aufbau der Bewertungskurve mittels möglichst realer Straßenmarkierung in Form von weißem Kreidespray und vorgesehenen Auslauflächen in lateraler Richtung zur Versuchsstrecke. Die Vorgabe, den markierten Bereich nicht zu verlassen wurde aus Sicherheitsgründen nicht zusätzlich räumlich begrenzt, ein zeitweises Verlassen zur Kurvenanfahrt ist somit möglich und führt zu den hier gezeigten Ergebnissen. Zur Bewertung der Wiederholbarkeit des Verhaltens lässt sich auch mit dieser Darstellung feststellen, dass im räumlichen Bezug sehr ähnlich gehandelt wird. Fahrer 1, 2, 3, 5 und Fahrer 8 zum Beispiel beginnen die Kurveneinleitung unabhängig von der Kurvenrichtung bei allen 13 Durchfahrten bereits vor dem Kurvensegment. Die Fahrer weisen alle unterschiedliche Eigenbewertungen und Fahrpraxis auf.

Hervorgehoben ist jeweils mit einem Pfeil der Beginn der Kurvenausleitungsphase bei den Fahrern 3, 9 und 10. Die Streuung des örtlichen Zeitpunktes der Ausleitung der Kurvenfahrt findet hier sehr wiederholbar an derselben Stelle statt. Dieses Verhalten lässt sich bei den gleichen Fahrern und anderer Kurvenrichtung nicht in demselben Maße beobachten. Die Selbsteinschätzung der Fahrer aus Kapitel 3.2.1 zeigt hierfür keine Übereinstimmung. Ein solch wiederholbares Verhalten entspricht der Selbsteinschätzung eines „konstanten“ Fahrverhaltens, das nur bei einem der drei Fahrer feststellbar ist. Eine Korrelation der Selbsteinschätzung und des gemessenen Verhaltens ist somit nicht ersichtlich. Aufgrund der fahrerspezifischen Streuung der Wiederholbarkeit des Phasenübergangs wird eine Abbildung dieses Zusammenhangs als Anforderung *Anf-Mod-Fah-3* an das zu entwickelnde Modell gesetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird kein weiterer Fokus auf den Hintergrund der geringen Streuung beim örtlichen Punkt der Kurvenausleitung gelegt. Eine mögliche Erklärung ist ein Zusammenhang zwischen der Planung der Kurvenfahrt auf einen expliziten Punkt des Beendens der Stationärphase hin. Dies würde bedeuten, dass einzelne Fahrer als Planungsziel nicht die Einleitung der Kurve, sondern die Ausleitung fixieren. Es empfiehlt sich dies in weiteren Forschungsarbeiten näher zu untersuchen.

Insgesamt ist kein einheitliches, fahrerübergreifendes Verhalten hinsichtlich der Verteilung der Phasenübergänge ersichtlich. Fahrerspezifisch ist im Gegenzug unterschiedlich deutlich aber wiederholbar ein ähnliches Verhalten detektierbar. Dies bestätigt die Wichtigkeit einer fahrer- und kurvenindividuellen Betrachtungsweise und ergibt die Anforderung *Anf-Mod-*

Fah-3 der Parametrierbarkeit der Phasenübergänge an das Modell. Eine Korrelation zwischen der Fahrpraxis oder der Selbsteinschätzung lässt sich nicht direkt herleiten. Somit wird die individuelle Betrachtung des fahrertypischen Verhaltens als wichtiger als die Kategorisierung in einzelne Typen- oder Fähigkeitsgruppen angesehen.

Zur besseren Darstellbarkeit dynamischer Ereignisse wird zusätzlich zu den bereits aufgezeigten Verläufen von Rollwinkel und Geschwindigkeit die Information über die Änderung des Rollwinkels, also die Rollrate mit hinzugezogen.

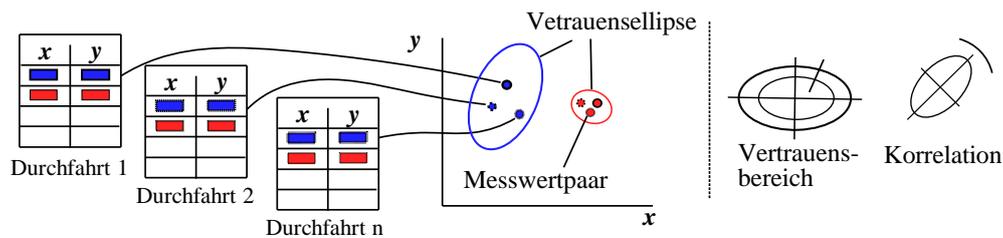


Abbildung 5-8 Beispieldarstellung für die Beschreibung von Vertrauensellipsen nach Birolini

Hierfür wird eine Darstellung genutzt, bei der gleichzeitig die Information über die Streuung der Wertepaare aus Rollwinkel und Rollrate im Verhältnis zur wiederholten Durchfahrt sichtbar wird.

Abbildung 5-8 nach Birolini¹¹⁵ repräsentiert beispielhaft die Darstellbarkeit mittels Vertrauensellipsen. Notwendig für die Anwendung dieser Darstellung ist die vorherige Transformation und Normierung der Messdaten in einen vergleichbaren Messwertbereich. Die in Kapitel 4.4.1 und Kapitel 4.4.3 vorgestellte Segmentierungs- und Normierungsmethode ist somit Grundvoraussetzung für die gezeigte Darstellungsart.

Für die Darstellung von Daten mittels Vertrauensellipsen werden jeweils die Messwertpaare verschiedener Durchfahrten (Abbildung 5-8 links) zum immer gleichen bezogenen Ort aufgetragen und zugehörige Ellipsen mit einem definierten Vertrauensbereich eingezeichnet (Abbildung 5-8 rechts). Dieses Vorgehen wird für jeden normierten Werteschritt wiederholt. Aus der Streuung der Messwertpaare und dem gewählten Vertrauensbereich resultieren die Seitenlängen der Ellipse. Die Ausrichtung der Ellipse, also das Verhältnis von längerem zu kürzerem Durchmesser der Ellipse ergibt sich aus den Steigungen der Eigenvektoren des größten Eigenwertes der Kovarianzmatrizen der gegeneinander aufgetragenen Messgrößen. Die Orientierung der Ellipse zeigt somit eine Korrelation bzgl. der dominierenden Streuung der aufgetragenen Wertepaare.¹¹⁶

¹¹⁵ Birolini, A.: Statistische Qualitätskontrolle und Zuverlässigkeitsprüfungen (1997).

¹¹⁶ Hartung, J.; Elpelt, B.: Multivariate Statistik (2007).

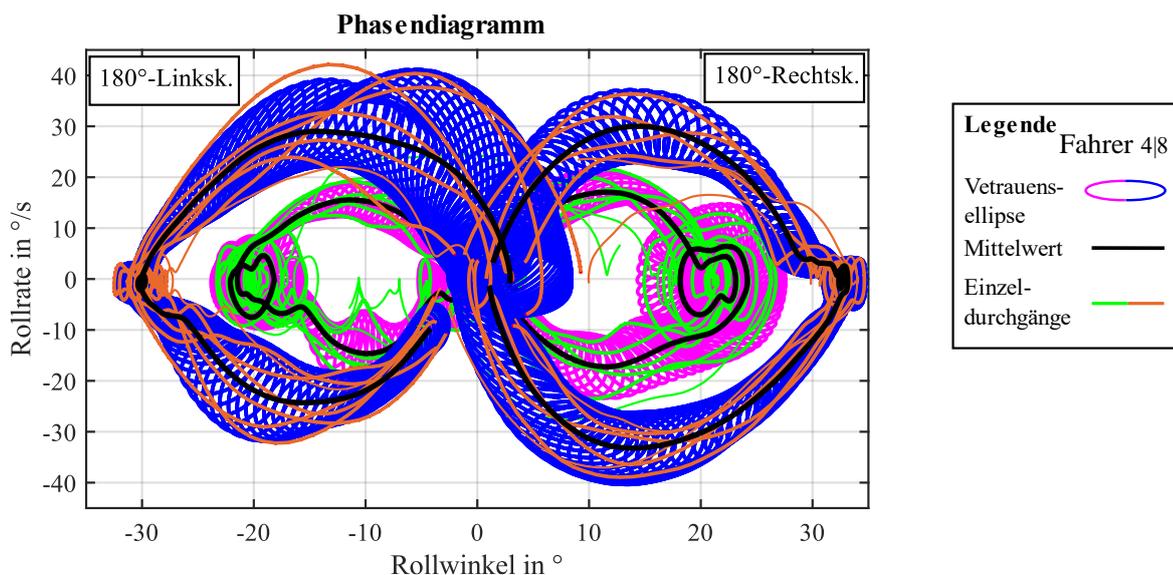


Abbildung 5-9 Vertrauensellipsen aller LI-180-12 und RE-180-12 Kurvendurchfahrten von Fahrer 4 und Fahrer 8 mit 63 % Konfidenzintervall nach Scherer und Basten¹¹⁷ ◇

Abbildung 5-9 stellt von Fahrer 4 (rot) und Fahrer 8 (blau) die Vertrauensellipsen aller $n_c = 13$ Kurvendurchfahrten der LI-180-12 und RE-180-12 Bewertungskurven dar (nähere Beschreibung des Messdatensatzes ◇ siehe Kapitel 4.3.5). Mit dieser Art der Darstellung lässt sich kein Zeitbezug darstellen.

Aufgetragen ist die Rollrate über dem Rollwinkel. Die Messwertstreuung je Durchfahrt und die resultierenden Ellipsen reflektieren in dieser Darstellung keine Messungenauigkeiten, sondern vielmehr die Reproduzierbarkeit, mit welcher ein Fahrer in der Lage ist, ein identisches Manöver wiederholt auszuführen. Das gewählte Vertrauensintervall beträgt 63 % (Standardabweichung). Aufgrund der begrenzten Anzahl von Messgrößen wird das Vertrauensintervall mittels der Student-t-Verteilung berechnet. Das Phasendiagramm illustriert die bereits in Abbildung 5.2 präsentierten Unterschiede der Rollwinkelverläufe von Fahrer 4 und Fahrer 8 mit der zusätzlichen Information der Rollratenstreuung. Zu lesen sind Darstellungen dieser Art bei einer Vorsegmentierung der Messdaten vom Nullpunkt aus startend. Abhängig von der gefahrenen Kurvenrichtung beginnt eine Kurveneinleitung zum Beispiel bei einer Rechtskurve mit einer positiven Rollrate und dem gleichzeitigen Aufbau eines positiven Rollwinkels. Hierzu sei erwähnt, dass die kurze Phase der initialen Kurveneinleitung mit Counter Steering Effekt vernachlässigt wird, da dieser in der Darstellungsart mit den Korrekturen der Geradeausfahrt vor Kurvenbeginn überlagert ist. Der Hochpunkt (oder Tiefpunkt bei Linkskurven) der Rollrate stellt den Punkt der höchsten Dynamik einer Kurveneinleitung dar. Diese Dynamik flacht im weiteren Verlauf ab, bis zum Erreichen einer Rollrate gegen 0 bei gleichzeitigem Erreichen des Zielrollwinkels. Während der quasistationären Schräglagenhaltephase variieren Rollwinkel und Rollrate in einem - wie in der Abbildung zu sehen - fahrerspezifischen Bereich, bevor es durch eine umgekehrte Reihenfolge, also

¹¹⁷ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 281.

zum Beispiel bei der Rechtskurve durch das Aufbauen einer negativen Rollrate bei gleichzeitiger Verringerung des Rollwinkels in die Kurvenausleitungsphase übergeht. Bei einer Kurve, die in eine aufrechte Geradeausfahrt übergeht, enden auch die Vertrauensellipsen wieder im Nullpunkt. In Abbildung 5-9 ist die Besonderheit, dass gleichzeitig alle Durchfahrten in beide Kurvenrichtungen aufgetragen sind. Hierdurch ist ein direkter Vergleich von Links- und Rechtskurven möglich.

Es zeigt sich, dass Fahrer 8 in Bezug auf die Rollrate bei den Kurvenausleitungen in Linkskurven stärkere Variationen aufweist im Vergleich zu den Kurvenausleitungen in Rechtskurven. Dies manifestiert sich in der Größe der Vertrauensellipsen. Ferner ist ersichtlich, dass die erreichten maximalen Rollwinkel und -raten zwischen Fahrer 4 und Fahrer 8 variieren. Zudem offenbaren sich fahnerspezifische Charakteristika während der quasistationären Phase im Verlauf der Phasendiagramme.

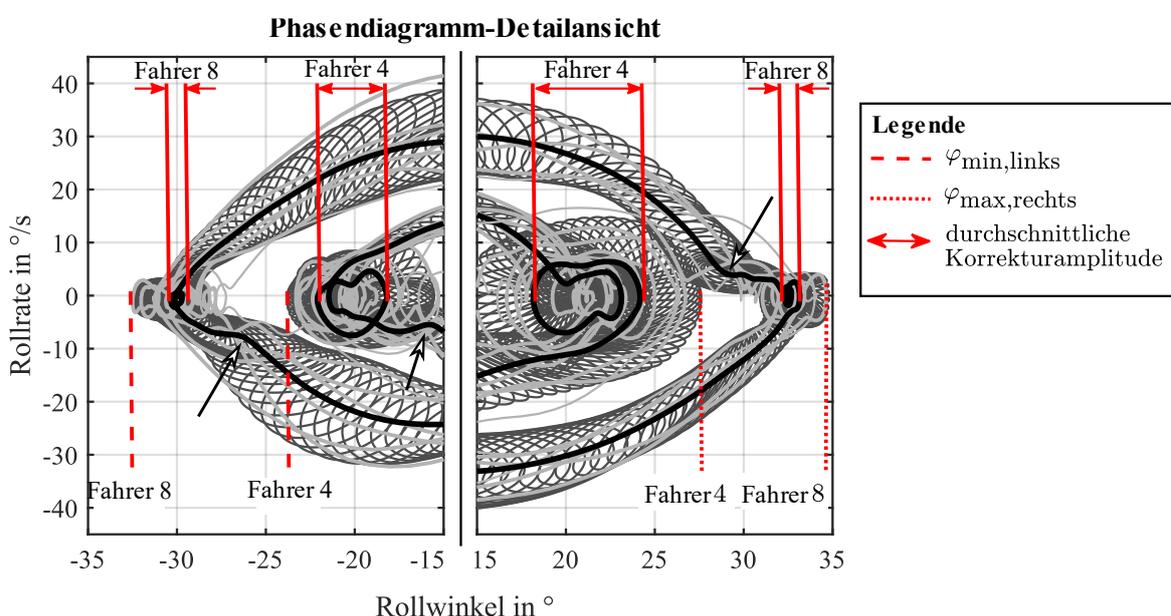


Abbildung 5-10 Hervorgehobene Bereiche der Korrekturamplituden in den Vertrauensellipsen von Fahrer 4 und Fahrer 8 bei allen RE-180-12 und LI-180-12 Kurvendurchfahrten nach Scherer und Basten¹¹⁸ ◇

Abbildung 5-10 präsentiert eine Vergrößerung der relevanten Bereiche. Die Korrekturamplituden im Rollwinkelverlauf von Fahrer 4 manifestieren sich durch Schleifen im Phasendiagramm. Herbeigeführt werden diese durch jeweils einen Vorzeichenwechsel in der Rollrate je Korrekturschleife im Rollwinkel. Es wird deutlich, dass die Korrekturamplituden von Fahrer 8 im Vergleich zu Fahrer 4 geringer sind. Beobachtbar ist zudem, dass nicht nur zwischen den Fahrern Unterschiede bestehen, sondern auch eine Abhängigkeit von der Kurvenrichtung bei demselben Fahrer besteht. Fahrer 4 erreicht z.B. in den Rechtskurven einen höheren Grenzrollwinkel im Vergleich zu den Linkskurven. Gleichzeitig zeigen sich jedoch in den Rechtskurven größere Korrekturamplituden im Rollwinkelverlauf. Im Falle von

¹¹⁸ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 282.

Fahrer 8 ist keine kurvenrichtungsabhängige Rollwinkelkorrektur erkennbar, jedoch sind die erreichten Rollwinkel in den Rechtskurven ebenfalls größer als in den Linkskurven. Dieses Verhalten ist bei sechs von zehn Fahrern in der Studie zu beobachten.

Beim Vergleich von Kurvenein- und Kurvenausleitung fällt auf, dass die Verläufe der Kurvenausleitung von Fahrer 4 und 8 im Phasendiagramm glatter und ellipsenförmiger sind, während die Kurveneinleitung teilweise durch Knickstellen im Phasendiagramm gekennzeichnet ist (siehe Pfeil). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Verringerung des Rollwinkels am Kurvenausgang hauptsächlich durch eine Erhöhung der Fahrzeuggeschwindigkeit und infolgedessen durch eine Zunahme der Fliehkraft erreicht wird. Das Einlenken des Fahrzeugs aus der Geradeausfahrt hingegen ist nicht allein durch die Reduzierung der Geschwindigkeit möglich. Somit erfordert das Einlenken des Fahrzeugs umfangreichere Steuereingaben seitens des Fahrers.

Aus dieser Erkenntnis ergibt sich die Anforderung *Anf-Mod-Fah-4* an das zu entwickelnde Modell, dass eine Abbildbarkeit der Korrekturamplituden, beziehungsweise des spezifischen Korrekturverhaltens während der quasistationären Phase möglich sein muss.

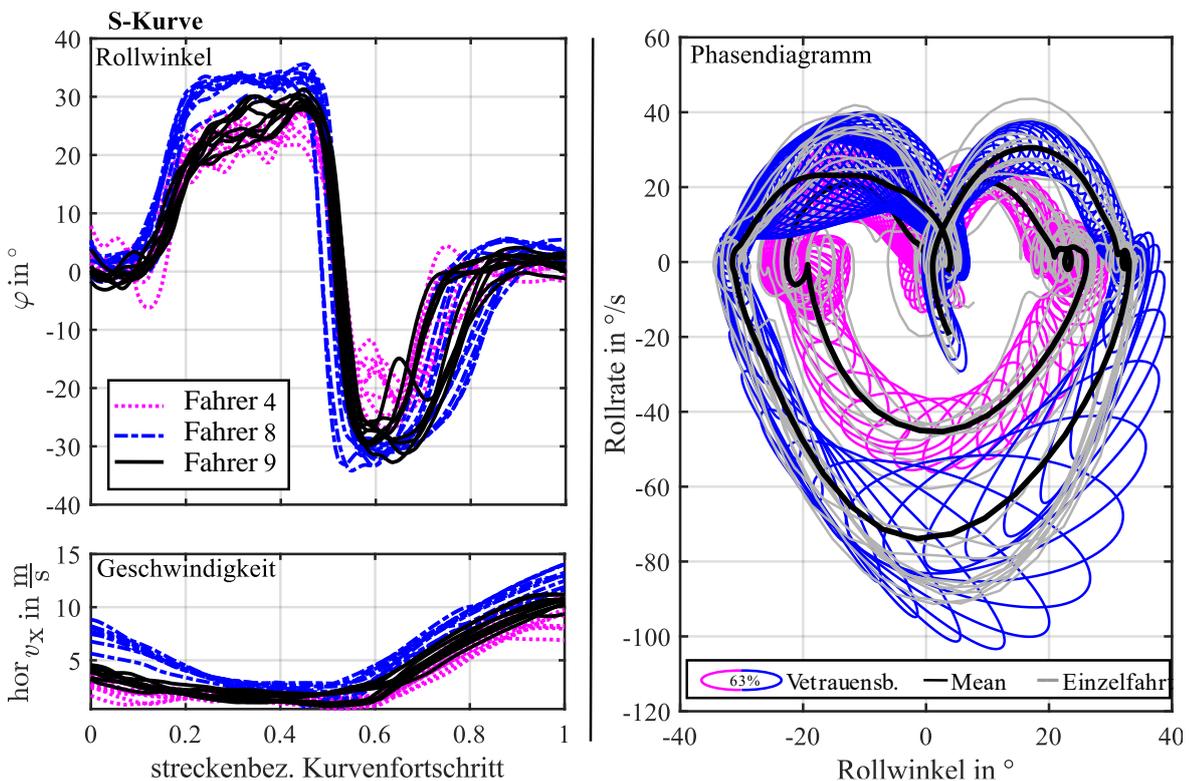


Abbildung 5-11 Rollwinkel (links oben) und Geschwindigkeitsverläufe im streckenbezogenen Kurvenfortschritt, Fahrer 4,6,8 Vertrauensellipsen Fahrer 4 und 8 (rechts) Untersuchung Kurvenübergang \diamond

In Abbildung 5-11 dargestellt ist der Verlauf der Rollwinkel und zugehörigen Geschwindigkeit von Fahrer 4, 8 und 9. Wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben wird das Manöver RE/LI-180/90-12/18 zur Untersuchung von Kurvenübergängen herangezogen. Bereits bei Betrachtung der Verläufe wird wiederholbares und fahrerspezifisches Verhalten sichtbar. Während Fahrer 8 wie bei den RE-180-12 früher im relativen streckenbezogenen Kurvenfortschritt

mit dem Rollwinkelaufbau beginnt sind Fahrer 4 und Fahrer 9 hier quasi parallel. Ersichtlich ist dies aus der Abbildung oben links. Hier wird auch deutlich, dass Fahrer 8 direkt auf einen Zielrollwinkel in der quasistationären Phase rollt, während die anderen beiden Fahrer in der Haltephase progressives Rollwinkelaufbau verhalten zeigen. Bei Fahrer 4 geschieht dies zudem mit deutlichen Regelschwingen, die auch in der Darstellung rechts in der Breite der Korrekturamplituden ersichtlich ist.

Hinsichtlich der Kurvenübergangsphase, die in den linken Darstellungen aufgrund des Manöveraufbaus bei 50 % des Kurvenfortschritts zu sehen ist, ist ein wiederholbares Verhalten bei allen drei dargestellten Fahrern ersichtlich. Zudem ist ein deutlich symmetrisches Verhalten um den Mittelpunkt des Übergangs erkennbar. Aus den Vertrauensellipsen wird deutlich, dass aufgrund des größeren Differenzwertes der Rollwinkel zwischen Links- und Rechtskurven bei Fahrer 8 eine größere Dynamik in der Kurvenübergangsphase notwendig ist. Die finale Kurvenausleitung variiert sehr stark zwischen den drei Fahrern. Zurückzuführen ist dies auf die weite Auslaufläche zum Kurvenausgang mit geringer Einschränkung der Fahrlinie. Notwendig ist diese zur Umsetzung der Anforderungen *Anf-Dat-Erf-1* aus Kapitel 4.3.2 an die Fahrversuche.

Als Anforderung *Anf-Mod-Fah-5* an das zu entwickelnde Modell wird aus den beschriebenen Zusammenhängen die Umsetzbarkeit von Kurvenübergängen per se, wie auch die Abbildbarkeit der fahrerspezifischen Dynamik und des spezifischen Start- und Endpunktes der Phase definiert.

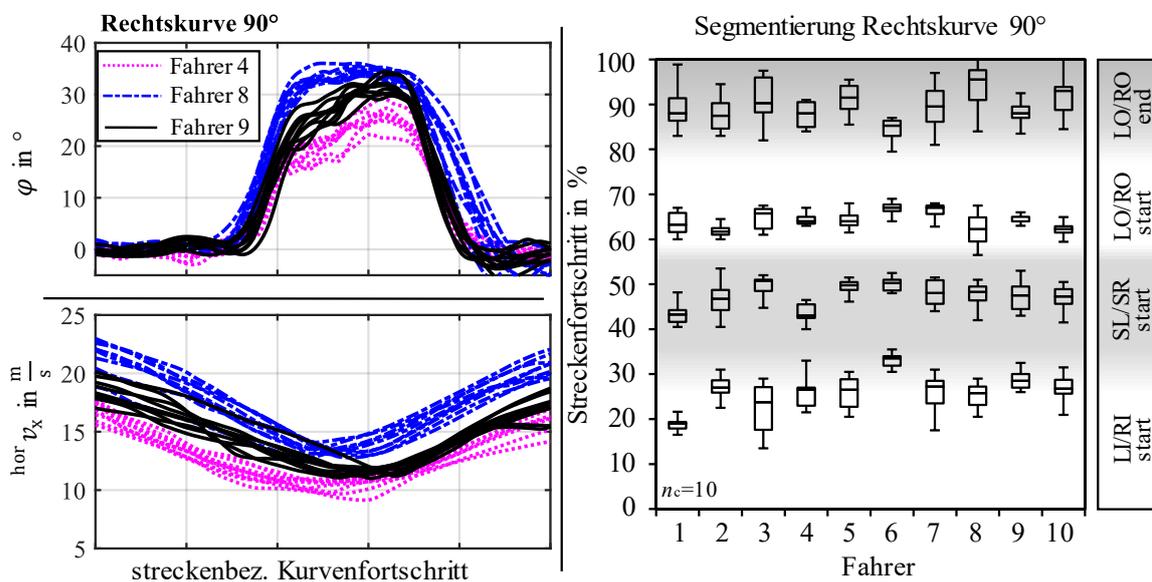


Abbildung 5-12 Wiederholbarkeit von Rollwinkel, Geschwindigkeit (Fahrer 4,8 und 9 - links) und Primitivübergänge aller Fahrer der RE-90-30 Kurve \diamond

Abbildung 5-12 stellt links wiederum für die Fahrer 4, 8 und 9 die Rollwinkel und Geschwindigkeitsverläufe der RE-90-30 Kurve definiert in Kapitel 4.3.2 dar. Hierbei wird wie bei den beiden anderen betrachteten Primitiven deutlich fahrerspezifisches und somit unterscheidbares Verhalten ersichtlich. Wiederum beginnt Fahrer 8 früher mit der Kurveneinleitung und

der insgesamt Rollwinkelverlauf ist sehr vergleichbar mit dem ersten Teil des Kurvenübergangsmanövers. Beides sind Rechtskurven, jedoch mit unterschiedlichen Radien und Kurvenwinkeln. Der Geschwindigkeitsbereich ist insgesamt höher, was allgemein zur Erhöhung der Stabilität beiträgt. Das bereits im ersten Manöver beobachtete Verhalten des sehr ähnlichen Ortes des Beginns der Kurvenausleitungsphase wird in Abbildung 5-12 rechts deutlich. 7 von 10 Fahrern weisen hier ein sehr wiederholbares Verhalten auf. Insgesamt ist dieser Ort bei allen Fahrern sehr ähnlich. Im Gegensatz hierzu steht der örtliche Punkt der Einleitung der Kurve aus der Geradeausfahrt. Dieser variiert stark zwischen den verschiedenen Fahrern.

Wie sich aus der Darstellung ergibt, sind die Wiederholbarkeit und die Ähnlichkeit der Verläufe von Rollwinkel und Geschwindigkeitssignalen auch bei einer Variation der Kurvenart ersichtlich. Die hier gezeigte Kurve entspricht durch den stetigen Krümmungswechsel einer Kurve im Straßenverkehr (siehe Beschreibung in Kapitel 4.3.2).

Die hieraus resultierende Anforderung *Anf-Mod-All-7* an das zu entwickelnde Modell ist die Übertragbarkeit der erreichten Ergebnisse in den Straßenverkehr, d. h. bei einer Bekanntheit des Manövers einen Vergleich verschiedener Manöver ziehen zu können. Das Modell ist daher unabhängig von den während der Entwicklung genutzten Manövern zu halten.

Wie in Kapitel 4.3.3 vorgestellt, ist ein geeignetes Maß zur Untersuchung der Wiederholbarkeit, beziehungsweise der Erkennbarkeit der Abbildbarkeit derselben in einem Modell die Nutzung eines Anomalieereignisses.

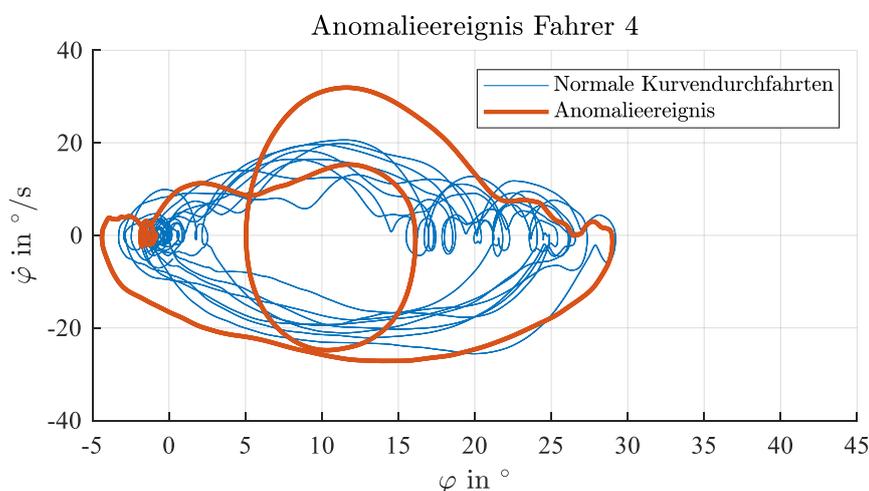


Abbildung 5-13 Beispielhaftes Anomalieereignis mit verdeckter Kurve, Rollrate über Rollwinkel, Fahrer 4 nach Scherer et. al.¹¹⁹ ◇

In Abbildung 5-13 nach Scherer et. al.¹¹⁹ dargestellt ist der Vergleich zwischen allen $N = 9$ Normaldurchfahrten von Fahrer 4 der RE-90-30 Kurve mit dünnen blauen Linien und in orange dick das Anomalieereignis des plötzlich und unerwartet auftauchenden verdeckten Hindernisses (nähere Beschreibung des Messdatensatzes ◇ siehe Kapitel 4.3.5). Aus der Geradeausfahrt mit Rollwinkel und Rollrate 0 wird über eine positive Rollrate ein positiver

¹¹⁹ Scherer, F. et al.: Schräglagenangst (2021), S. 47.

Rollwinkel aufgebaut. Der normale Aufbau wird nach Erkennen der veränderten Situation schlagartig abgebrochen und nach einer sehr deutlichen Korrekturschleife fortgesetzt. Der im Anschluss erreichte Maximalrollwinkel ist nicht größer als der maximale Rollwinkel aller anderen Durchfahrten.

Als Anforderung *Anf-Mod-Fah-6* an das Modell resultiert hieraus die Notwendigkeit der Erkennbarkeit und dynamischen Darstellbarkeit von Abweichungen zur typischen, wiederholbaren Verhaltensweise.

Zusammenfassend lässt sich aus dem Kapitel der Wiederholbarkeit fahrerspezifisches, wiederholbares Verhalten aufzeigen, eine Korrelation zwischen der individuellen Fahrweise und der Zuordnung zu der Selbsteinschätzung oder der Fahrpraxis ist nicht direkt gegeben. Somit wird die Darstellbarkeit fahrerindividuellen Verhaltens, die Wiederholbarkeit und Berücksichtigung der Schwellwerte im Vergleich zum eigenen typischen Verhalten als wichtiger eingeschätzt, als der Vergleich zu Fahrern mit zum Beispiel einer ähnlichen Fahrpraxis oder Selbsteinschätzung.

5.4 Auswahl mathematischer Ansatzfunktionen

Die Anforderungen zum Erreichen des Ziels dieser Arbeit, der Entwicklung eines Modells zur Beschreibung fahrerspezifischen Verhaltens in Abhängigkeit der Kurvengeometrie sind in den vorangegangenen Kapiteln zu finden. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben beruht der allgemeine Ansatz des Vorgehens auf dem Zerteilen der Kurvenfahrt in einzelne Manöverprimitive. Für jedes dieser Primitive wird im folgenden Kapitel eine mathematische Ansatzfunktion gesucht, die unter Berücksichtigung der hergeleiteten Anforderungen eine geringstmögliche Komplexität und Interpretierbarkeit der Modellparameter aufweist.

Die hier vorgestellten Ansätze sind als beispielhafte Vorgehensweise zu betrachten. Unter Anwendung der erarbeiteten Anforderungen sind weitere alternative Ansätze denkbar. Somit zeigt der hier vorgestellte Ansatz einen möglichen Weg auf, ohne einen alleinigen Anspruch zu erheben.

In den vorangegangenen Kapiteln haben sich als besonders interpretationsfähige dynamische sowie gut erfassbare Größen zur Abbildung fahrerspezifischen Verhaltens beim Motorradfahren die Größen Rollwinkel, Rollrate und Geschwindigkeit erwiesen. Aufgrund der direkten Abhängigkeit zwischen Rollrate und Rollwinkel wird für die Erarbeitung des hier gezeigten Ansatzes im weiteren Verlauf nur der Rollwinkel modelliert. In einem ersten Ansatz werden Funktionen gesucht, die sowohl Rollwinkel, als auch Geschwindigkeitsverläufe bei normaler Landstraßenfahrt von Motorradfahrern abbilden können. Dieser Ansatz beruht auf der Annahme der physikalischen Kopplung und gegenseitigen Beeinflussung von Geschwindigkeit und Rollwinkel bei der Kurvenfahrt von Motorrädern. Gleichzeitig bietet dieser Ansatz eine so gering wie mögliche Anzahl unterschiedlicher Parameter für die Interpretation derselben. Eine Anpassung der Randbedingungen ist dennoch notwendig.

Für die Anwendung dieses Ansatzes auf Sonderfälle des Motorradfahrens wie Rennstreckenfahrten oder Geländefahrten ist eine gesonderte Überprüfung notwendig. Ebenso bei der Anwendung auf Autobahn- oder Stadtfahrten. Durch die in Kapitel 3.5 hergeleiteten Anwendungsschwerpunkte liegt der Hauptanwendungszweck auf Landstraßenfahrten von Motorradfahrern.

Alle Ansatzfunktionen werden in Abhängigkeit des in dieser Arbeit eingeführten relativen streckenbezogenen Kurvenfortschritts erarbeitet.

Im ersten Schritt wird ein Ansatz zur Abbildung der dynamischen Übergänge von Geradeausfahrt in Kurvenfahrt, also der Kurveneinleitung, bzw. der Kurvenausleitung oder Kurvenüberleitung gesucht. Allgemein wird hier bei Betrachtung des Rollwinkels als zu beschreibende Größe von einem kleinen Wert im Bereich von $-5^\circ < \varphi < 5^\circ$ über eine Aufbauphase (je nach Kurvenrichtung) in ein niedrigeres (Linkskurven) oder höheres (Rechtskurven) Niveau übergeleitet. Bei der Kurvenausleitung geschieht dies genau umgekehrt. Als einfachster Ansatz ist hier das lineare Wachstum zu nennen. Aufgrund der Begrenztheit des Wachstums ist dieser Ansatz jedoch nicht geeignet. Somit kommen alle mathematischen Ansätze in Betracht, die nach einer Steigungsphase eine Sättigung erreichen. Aufgrund der stetigen Übergänge der Verläufe, sowohl aus der Geradeausfahrt als auch bei Erreichen des Zielrollwinkels, eignen sich prinzipiell sogenannte Sigmoid-Funktionen für die Beschreibung der Übergänge.

Hierfür geeignet sind zum Beispiel die Funktionen: $\tanh(s)$ und $\arctan(s)$ oder auch die Gudermann Funktion.¹²⁰ Es handelt sich bei allen Funktionen um nullpunktsymmetrische Funktionen mit nur einem Freiheitsgrad. Eine Anpassung an einen früheren Beginn oder die unterschiedliche Dynamik der Übergänge einer Kurveneinleitung, wie in Kapitel 5.2 hergeleitet, ist hiermit nicht möglich.

Ein mathematischer Ansatz, der eine Parametrierung des Übergangs zulässt, ist der Ansatz einer begrenzten Wachstumsfunktion.¹²¹ Die Regelung des Vorgangs der Kurveneinleitung durch den Menschen als Eingangsgröße über den Lenker lässt keine zu erwartende sprunghafte Handlung zu, wie sie zum Beispiel durch einen Stufenmotor gestellt wird. Aufgrund dessen, dass es sich bei dem Rollwinkel um das messbare Resultat eines menschlichen Eingriffs in ein mechanisches System handelt, wird nach mathematisch beschreibbarem Verhalten von in der Natur aufkommenden Ereignissen gesucht. Eine Ähnlichkeit lässt sich bei Wachstumskurven von Tier- oder Bakterienpopulationen erkennen. Zur mathematischen Beschreibung solcher Vorgänge werden typischerweise begrenzte Wachstumsfunktionen eingesetzt. Das hierfür einfachste mathematische Beispiel ist die in Gleichung (5.1) aufgezeigte Wachstumsfunktion:

¹²⁰ Weisstein, E. W.: Gudermannian. (2002).

¹²¹ Kreiner, W. A.: Wachstumsfunktionen (2018).

$$f(x) = c(1 - e^{-\frac{x}{T}}) \quad (5.1)$$

Hierbei steht c für den Sättigungswert und T ist Bestandteil der Anfangssteigung c/T . Diese lässt eine Parametrierung der Dynamik des Übergangs aus der Steigungs- in die Sättigungsphase zu. Mit dieser Funktion nicht möglich ist die Parametrierung des Beginns der Kurveneinleitungsphase. Somit wird nach Derivaten dieser Wachstumsfunktion gesucht, die zusätzlich auch diese Phase parametrisch darstellen.

Eine Möglichkeit der Darstellung dieses Wachstums ist die Nutzung einer logistischen Wachstumsfunktion, oder einer schiefsymmetrischen Wachstumsfunktion, wie in Gleichung (5.2),

$$f(x) = \kappa_{\pm} \frac{a \cdot c \cdot e^{b \cdot x}}{c^n + a^n (e^{nbx} - 1)^{\frac{1}{n}}} \quad (5.2)$$

wobei a, b, c und n jeweils Gestaltungsparameter sind. Für $n = 1$ erhalten wir den Fall der logistischen Wachstumsfunktion, bei $n \neq 1$ wird von der schiefsymmetrischen Wachstumsfunktion gesprochen. κ_{\pm} wird eingeführt zur Unterscheidbarkeit je nach Kurvenrichtung. κ_{+} steht hier für eine linksgekrümmte Kurve, κ_{-} für eine rechtsgekrümmte Kurve.

Für den hier gewählten Ansatz wird die logistische Wachstumsfunktion gewählt zur Minimierung der notwendigen Parameter. Zeigt sich bei der Anwendung des mathematischen Ansatzes eine Notwendigkeit zur Hinzunahme von n , ist dies jederzeit möglich. Aufgrund dessen, dass die Kurveneinleitung von unterschiedlichen Grundniveaus aus starten kann (in Kapitel 4.4.2 wird die Segmentierung der Kurveneinleitung anhand eines Grenzrollwinkels vorgestellt), wird der Wachstumsfunktion ein weiterer Parameter d zur Verschiebung des Verlaufs in vertikaler Richtung hinzugefügt.

Abbildung 5-14 zeigt den Einfluss der jeweiligen Gestaltungsparameter a, b, c, d und der Vorzeichenwahl der Kurve κ_{\pm} . Hieraus ergibt sich die Eingrenzung eines geeigneten oder sinnvollen Lösungsraums zur Abbildung des Kurvenbeginn-Verhaltens, d. h. dass die Auswahl des Vorzeichens je nach Kurvenrichtung lediglich einer Spiegelung der Methodik um die x-Achse entspricht. Dies wird ermöglicht, in dem vor der Parametrierung die Messwerte je nach Kurvenrichtung durch eine Spiegelung der Messdaten in die passende Grundform gebracht werden.

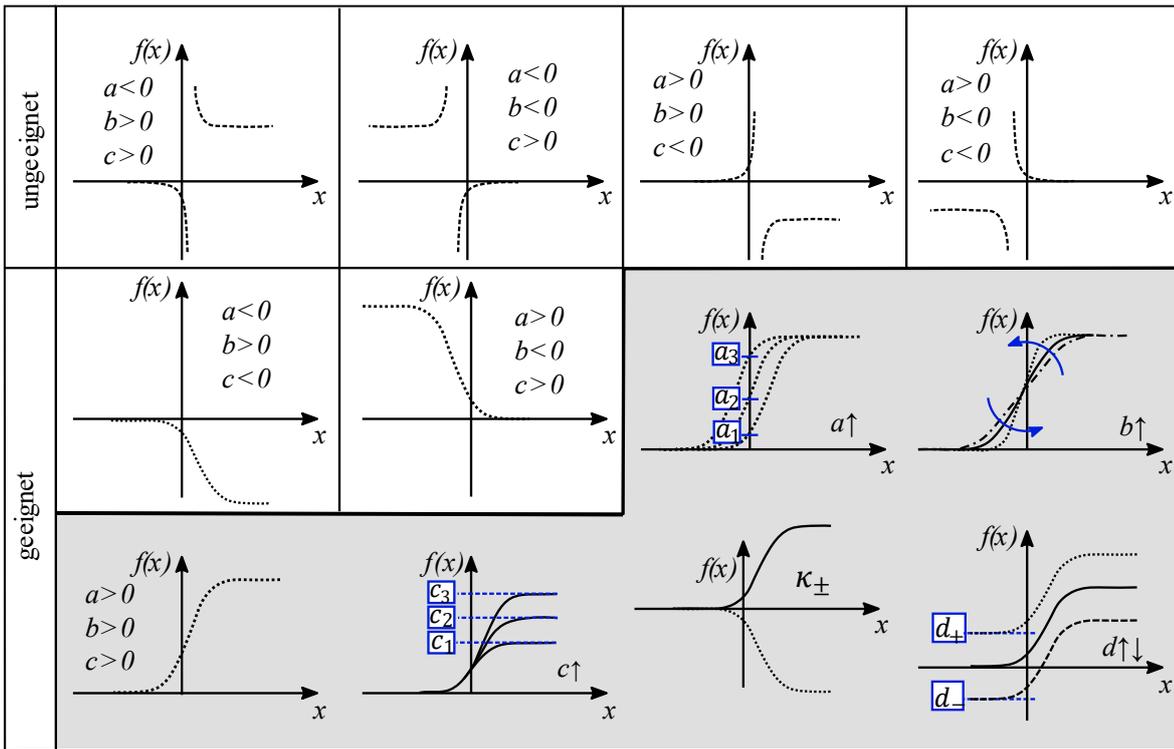


Abbildung 5-14 Darstellung des Parametereinflusses während der Kurveneinleitungsphase nach Scherer und Basten¹²²

Zur Abbildbarkeit kurzer Stagnationspunkte während der Einleitungsphase, die noch nicht dem Erreichen eines ersten Sättigungswertes entsprechen wird die logistische Wachstumsfunktion mit einer Sinusschwingung erweitert. Der Anteil der überlagerten Schwingung an der Gesamtfunktion repräsentiert die Zielstrebigkeit mit der die Einleitung durchgeführt wird. Bei unsicherem, vortastendem Fahrerverhalten ist hier ein Einfluss zu erwarten.

$$f(x) = \kappa_{\pm} \cdot \left(\frac{a \cdot c \cdot e^{b \cdot x}}{c + a \cdot (e^{b \cdot x} - 1)} + d \right) + \tilde{a} \cdot \sin(2\pi \cdot \tilde{f} \cdot (x + \tilde{l})) \tag{5.3}$$

Die Parameter \tilde{a} , \tilde{f} und \tilde{l} stehen in Formel (5.3) für die Amplitude, Frequenz und Phasenverschiebung der überlagerten Schwingung der logistischen Wachstumsfunktion $f(x)$.

Um Kurvenausleitungs- und Kurveneinleitungs Vorgänge miteinander vergleichen zu können, sowie aufgrund der ähnlichen Handlungsabfolge während der Durchführung wird für das dynamische Primitiv der Kurvenausleitung derselbe mathematische Ansatz gewählt wie für die Kurveneinleitung. Dies wird dadurch möglich, dass bei der Unterscheidung je nach Kurvenrichtung vor der Parametrierung eine Spiegelung der Daten vorgenommen wird

Nach Kurveneinleitung und Kurvenausleitung handelt es sich bei der Kurvenüberleitung um das dritte mögliche dynamische Primitiv. Hierbei stellt sich erneut die Frage nach der Symmetrie des abzubildenden Ereignisses. Eine Möglichkeit der Abbildung ist die bereits

¹²² Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 283.

beschriebene Nutzung von Formel (5.2) mit $n \neq 1$. Alternativ hierzu besteht bei besonders unsymmetrischem Verhalten die Nutzung einer sogenannten Gompertz Funktion¹²³, wie in Formel (5.4) aufgezeigt:

$$f(x) = \kappa_{\pm}(a \cdot e^{-b \cdot e^{-c \cdot x}} + d) \quad (5.4)$$

Die Parameter a, b, c und d sind hier ebenfalls als Gestaltungsparameter zu interpretieren. In dieser Arbeit wird aufgrund der schlechten Kompatibilität der Gompertz-Funktion mit überlagerten Schwingungen und der Erkenntnisse aus Kapitel 5.3, dass die betrachtete Kurvenübergangsphase starke Symmetrieeigenschaften aufweist auch für die Kurvenübergangsphase Gleichung (5.3) verwendet. Somit ist besonders im Rahmen der hier vorgestellten Methode eine gute Vergleichbarkeit der verschiedenen dynamischen Phasen gegeben. Bei alternativen Anwendungsfällen kann der Einsatz der Gompertzfunktion Vorteile gegenüber der hier angewandten logistischen Wachstumsfunktion bieten.

Mit der Umsetzung der dynamischen Phasen mittels einer logistischen Wachstumsfunktion werden alle Anforderungen an die Modellbildung aus den vorangegangenen Kapiteln umgesetzt. Es ist möglich sowohl verschiedene Anfangs- und Endwerte der verschiedenen Phasen als auch eine fahrertypische Dynamik abzubilden.

Zur Darstellung des quasistationären Kurvenprimitivs wird unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.2 hergeleiteten Anforderungen sowohl eine Darstellbarkeit der spezifischen Schwellwerte als auch der fahrertypischen Korrekturen innerhalb dieser Phase zunächst wieder der mathematische Ansatz einer linearen Funktion gewählt. Wie in Kapitel 5.3 gezeigt, besteht diese Phase der Kurvenfahrt typischerweise nicht nur aus einer linearen Veränderung der Rollwinkelwerte. Die Korrekturen laufen typischerweise wie in den Phasendiagrammen dargestellt schleifenartig ab. Im Rollwinkelverlauf führt dieses „herantasten“ zu einer anschwellenden und abebbenden Charakteristik. Gut darstellen lässt sich dies durch überlagerte Schwingungen und einer linearen Regression, wie in Formel (5.5) dargestellt.

$$f(x) = base + g \cdot x + \tilde{a}_1 \cdot \sin\left(2\pi \cdot \tilde{f}_1 \cdot (x + \tilde{l}_1)\right) + \tilde{a}_2 \cdot \sin\left(2\pi \cdot \tilde{f}_2 \cdot (x + \tilde{l}_2)\right) \quad (5.5)$$

Hier stellt $base$ den Startwert der linearen Regression und g die Steigung derselben dar. Die Amplituden \tilde{a}_1 und \tilde{a}_2 sind je nach Index repräsentierend für die erste oder zweite überlagerte Schwingung, sowie \tilde{f}_1 und \tilde{f}_2 die zugehörigen Frequenzen. Über \tilde{l}_1 und \tilde{l}_2 lässt sich eine Phasenverschiebung der Schwingungen darstellen.

Eine Hinzunahme weiterer Schwingungsterme ist möglich. Je nach Anwendungsfall und Anforderung an die spätere Fehlertoleranz kann dies sinnvoll sein. Auf der hier verwendeten Datenbasis wird die Anzahl der Schwingungsterme so lange erhöht, bis ein mittlerer Root-

¹²³ Waliszewski, P.; Konarski, J.: A Mystery of the Gompertz Function (2005).

Mean-Square (RMS)-Fehler (RSME) von $\varphi < 1.7^\circ$ und der Geschwindigkeit $v < 1 \text{ m/s}$ erreicht ist. Diese Grenzwerte basieren auf der Untersuchung von Stanglmayer et. al.¹²⁴ zur Nutzung von Smartphones für Fahrdynamikmessungen bei Motorrädern. Die Grenzwerte entsprechen dem besten ermittelten Ergebnis bei dem Vergleich verschiedener Smartphones, eingesetzt für die Messung fahrdynamischer Größen.

Die Anforderung ergibt sich aus der Unterschreitung der Messtoleranz mit der Prozessgenauigkeit bei der Nutzung von Low-Cost Messtechnik.

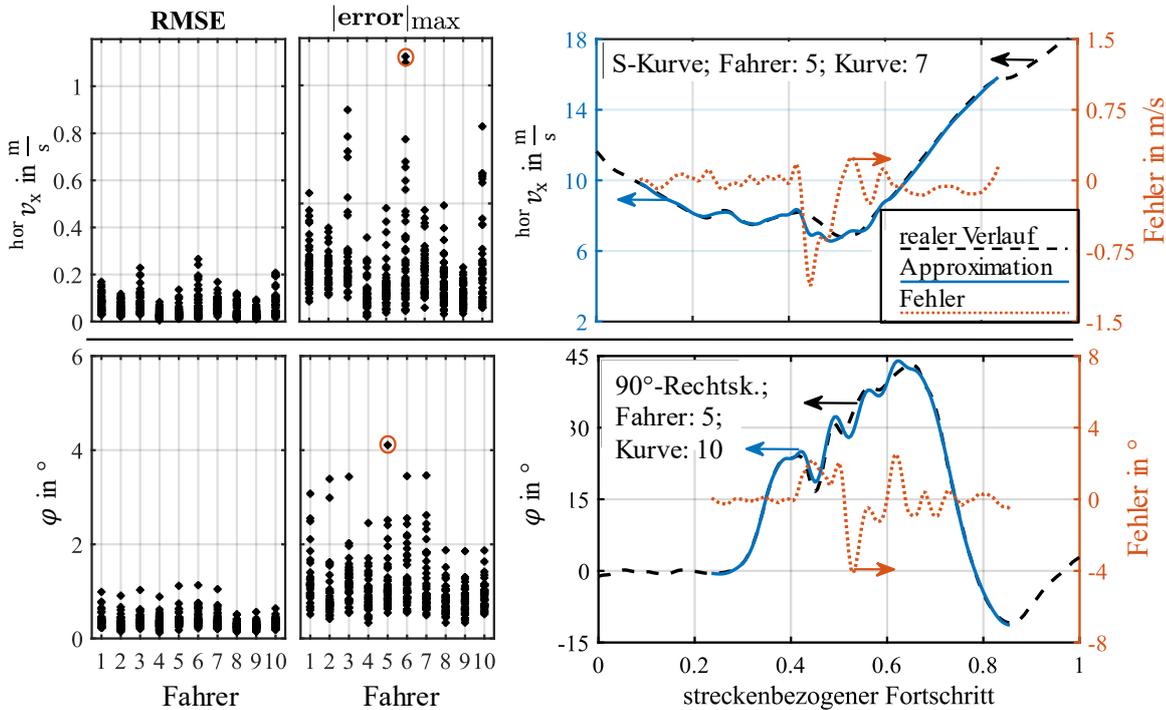


Abbildung 5-15 RMSE und maximaler Fehler der Approximation von Geschwindigkeit und Rollwinkel \diamond

Abbildung 5-15 stellt die Abweichung zwischen den gemessenen Signalen aller Durchfahrten und den mit allen hier aufgestellten mathematischen Funktionen approximierten Verläufen für die Geschwindigkeit (oben) und den Rollwinkel (unten) dar. Im linken Teil ist jeweils der RMSE und der maximale Fehler bei allen 424 untersuchten Kurvensegmenten aufgetragen, im rechten Teil der Abbildung ist der explizite Verlauf jeweils der größten maximalen Fehlerabweichung dargestellt. Verglichen werden hierfür das Messsignal, der approximierter Verlauf und die entsprechende Differenz der Signale als absoluter Fehler. Die Anforderung an die Approximationsgüte ist hiermit erfüllt. Es zeigt sich, dass der maximale Fehler unabhängig vom jeweiligen Kurvensegment ist. Der größte Fehler in der Approximation der Geschwindigkeit wird bei einem dynamischen Kurvenübergangsegment der S-Kurve RE/LI-180/90-12/18 gemacht, was hier genau der Mitte des Kurvensegmentes entspricht. Im Vergleich hierzu tritt der größte Fehler beim Rollwinkel ungefähr in der Mitte eines quasistationären Kurvenprimitivs auf. Der Fehler entsteht durch ein aperiodisches Verhalten während

¹²⁴ Stanglmayer, M. et al.: Messung Motorradfahrdynamik mit Smartphones (2020).

der Korrekturschwingungen in dieser Kurvenphase. Allgemein ist mit den gewählten mathematischen Ansätzen ein zunehmender Fehler bei zunehmender Aperiodizität der Messsignale zu erwarten.

Damit beim Betrachten der Kurvenprimitive als getrennte Segmente keine Verfälschung der errechneten Werte durch die Verschiebung über den Kurvenfortschritt entsteht, wird jedes Segment in Abhängigkeit des prozentualen Startwertes im Kurvenfortschritt in den Ursprung verschoben.

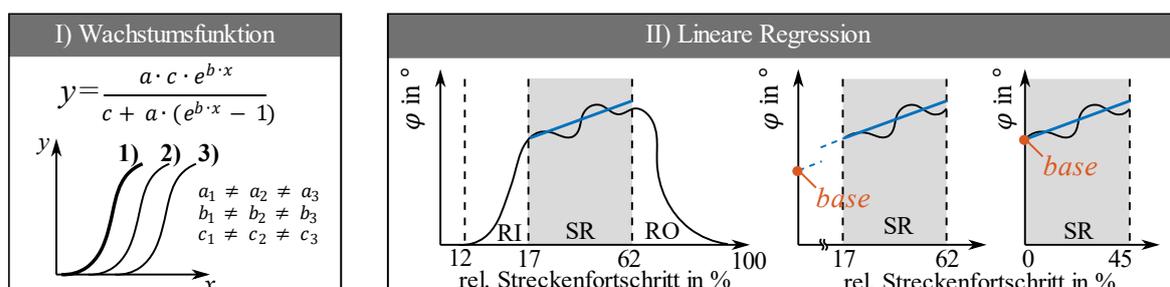


Abbildung 5-16 Verschiebung der Kurvenprimitive in den Ursprung

Dieses Vorgehen ist in Abbildung 5-16 verdeutlicht. Würde man diesen Schritt nicht vor der Analyse vornehmen, wäre der entsprechende approximierte Wert in Abhängigkeit des Startpunktes verfälscht. Abbildung 5-16 links stellt das Vorgehen für die dynamischen Kurvenprimitive dar, Abbildung 5-16 rechts für die Phase des quasistationären Kurvenprimitivs. Die links dargestellten Varianten 2 und 3 werden also immer in den Ursprung (wie in Variante 1 dargestellt) verschoben, ebenso in der Phase im rechten Teil der Abbildung. Hier wird deutlich, inwiefern bei einem beispielhaft gewählten Start der Phase bei 17 % des Kurvenfortschritts der Basiswert der linearen Regression *base* zu niedrig approximiert werden würde. Das Zusammensetzen der einzelnen Phasen zu einem Gesamtverlauf benötigt somit zusätzlich zu den parametrisierten Größen die Werte der Primitivsegmentierung.

Aufgrund dessen, dass es bei den Übergangsstellen zwischen den verschiedenen Kurvenprimitiven zu Sprüngen kommen kann, ist für diese Stellen eine Glättung des Verlaufs zum Erhalt der Differenzierbarkeit der Signale notwendig. Die möglichen Sprünge resultieren aus einer, bis auf die Randbedingungen für die Approximation voneinander getrennten

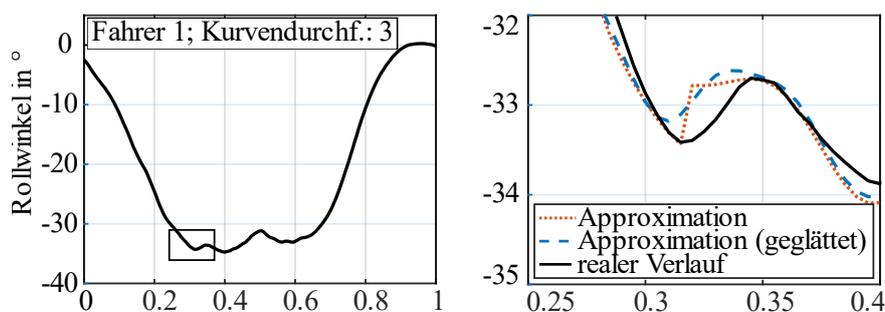


Abbildung 5-17 Tiefpassfilterung der Primitivübergänge der approximateden Signalverläufe LI-180-12 ◊

Betrachtungsweise des jeweiligen Primitivs. Dies wird in dieser Arbeit mittels der Anwendung eines Tiefpassfilters des zusammengesetzten Signals erreicht.

Die Eckfrequenz wird hierfür bei kleiner Filterordnung so hoch gewählt, dass sie höher als die Vorfilterung der Messsignale liegt und somit keine Auswirkung auf das approximierten Gesamtergebnis des Signals hat.

Abbildung 5-17 links zeigt den beispielhaften Verlauf des gemessenen Rollwinkelverlaufs einer LI-180-12 Kurvendurchfahrt von Fahrer 1. In der rechten Darstellung ist die Übergangsphase von Kurvenaufbau zur Kurvenhaltephase im Detail dargestellt. Im gepunkteten, approximierten Signal ist die fehlende Differenzierbarkeit aufgrund des Sprungs zwischen dem Ende der einen Phase und dem Beginn der nächsten Phase sichtbar. Zudem ist gestrichelt das tiefpassgefilterte, approximierte Signal dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich mit den gewählten mathematischen Ansätzen das unterschiedliche Verhalten in der Dynamik und der Schwellwerte sowohl bei der Kurveneinleitung, quasistationären Haltephase, der Kurvenausleitung oder auch einer Kurvenüberleitung approximieren. Die Abweichungen zwischen allen gemessenen und approximierten Signalen liegen innerhalb der Anforderungstoleranz.

5.5 Positionsschätzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur kurvenabhängigen Trajektorienprädiktion von Motorradfahrern. Ein Bestandteil der prädizierten Trajektorie ist die Position. Aus den im vorherigen Kapitel definierten mathematischen Ansätzen wird im folgenden Kapitel eine Methode zur Schätzung der Position entwickelt. Mit den approximierten Verläufen der Geschwindigkeit lässt sich zusammen mit der Position eine Trajektorie berechnen. Anforderung an die Berechnungsmethodik ist die Verwendbarkeit der bisher genutzten Größen Geschwindigkeit und Rollwinkel für die Berechnungsmethodik.

Essenziell für die nachfolgenden Zusammenhänge ist eine vorherige Rücktransformation der nach dem Ansatz in Kapitel 5.4 approximierten Verläufe. Dies ist mittels des in Kapitel 4.4.3 vorgestellten Zusammenhänge möglich. Voraussetzung hierfür ist die Bekanntheit der Gesamtmanöverlänge.

Ein physikalischer Zusammenhang, der die beiden Größen verknüpft, ist die bereits in Kapitel 4 eingeführte Formel für die aus den wirkenden Beschleunigungen hergeleitete Darstellung der stationären Kurvenfahrt, die hier noch einmal in Bezug auf das Fahrzeugkoordinatensystem vorgestellt wird.

$$R_i = |\kappa_i^{-1}| = \left| \frac{\text{hor } v_{x,i}^2}{\tan(-\varphi_i) \cdot g} \right| \quad (5.6)$$

In Gleichung (5.6) steht R für den aktuellen Kurvenradius, der auch als Reziprokwert der Krümmung κ_i steht. Die aktuelle Längsgeschwindigkeit ${}^{\text{hor}}v_{x,i}$ ist im horizontalen Fahrzeugkoordinatensystem angegeben und φ_i bezieht sich in diesem Fall auf den theoretischen Rollwinkel, also ohne Berücksichtigung der Zusatzrollwinkel durch die Reifenkontur oder rotierende Teile. Die Laufvariable i steht im Zusammenhang mit der Prädiktion entweder für den aktuellen Systemzustand oder die aktuelle Position.

Mit dem Bewusstsein der Akzeptanz eines Fehlers während dynamischer Vorgänge bei der Motorradfahrt wird auf Basis dieses Zusammenhangs eine Möglichkeit zur Bestimmung einer zukünftigen Position gesucht.

Eine Möglichkeit hierfür ist unter Annahme einer schwimmwinkelfreien Fahrt, wie sie typischerweise beim Motorradfahren vorliegt und unter Hinzunahme von Formel (5.6) des aktuellen Gierwinkels ψ_i und der Gierrate ${}^{\text{hor}}\dot{\psi}_i$ aus einer aktuellen Position $[x_i; y_i]^T$ eine zukünftige Position $[x_{i+1}; y_{i+1}]^T$ zu berechnen. Dieses Vorgehen deckt sich mit der Literatur nach ¹²⁵ aus Kapitel 3.3.2.

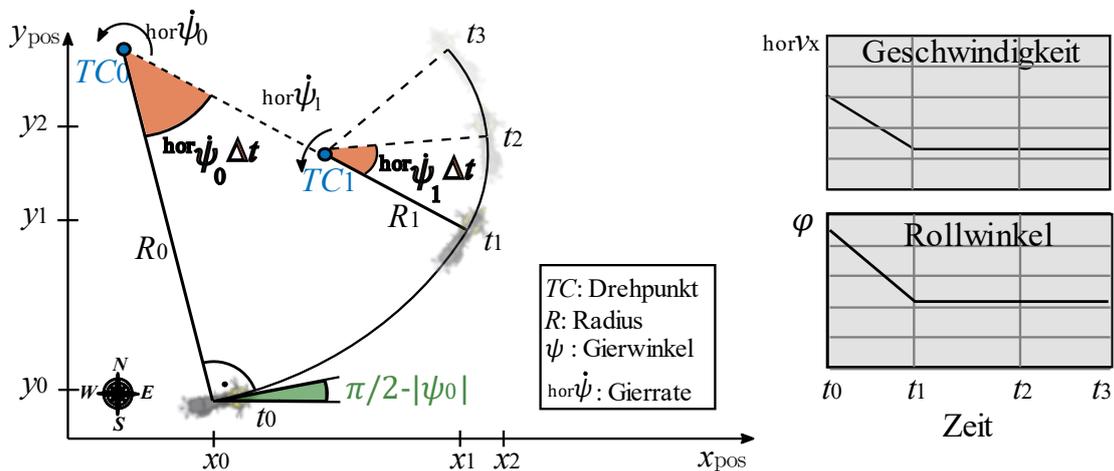


Abbildung 5-18 Schematisches Vorgehen zur Berechnung der zukünftigen Position.

Schematisch dargestellt ist diese Art der Berechnung in Abbildung 5-18. Rechts im Bild ist ein beispielhafter Verlauf von Rollwinkel und Geschwindigkeit während einer Kurvenfahrt dargestellt. Auf eine dynamische Einleitungsphase mit Rollwinkelauflauf von t_0 bis t_1 , bei gleichzeitiger Reduktion der Geschwindigkeit in dieser Phase folgt eine konstante Rollwinkelhaltephase. Die Kurvenausleitung ist in dieser Darstellung nicht mit berücksichtigt. Eine Kurvenfahrt selbst lässt sich wie im linken Teil der Abbildung durch eine Drehung um einen aktuellen Kurvenmittelpunkt mit einem aktuellen Kurvenradius und einer Drehgeschwindigkeit darstellen. Die Veränderung in der Kurvenaufbauphase wird aus Gründen der besseren Erklärbarkeit in der Darstellung links vernachlässigt. Zum nächsten betrachteten Zeitpunkt (z.B. $t = t_1$) lässt sich die ab dann aktuelle Kurvenfahrt als weitere Bewegung, mit neuem Kurvenradius und neuem Kurvenmittelpunkt beschreiben. Eine Integration der

¹²⁵ Hans, S.: Störgrößenkompensation und Trajektorienfolgeregelung Motorrad (2022).

aktuellen Drehgeschwindigkeit ergibt den Drehwinkel der Bewegung, wobei zu Beginn der Kurvenfahrt je nach Ausrichtung des Fahrzeugs ψ eine Anfangsbedingung für ψ_0 gelten kann. Wie hier dargestellt am Zeitpunkt $t = t_0$ zum Beispiel durch eine nordweisend ausgerichtete Karte mit Werten des Gierwinkels zwischen $\psi = -180^\circ$ und $\psi = +180^\circ$. Jede Kurvenfahrt lässt sich somit bei einer inkrementellen Verkleinerung von Δt durch die schrittweise Berechnung des Kurvenmittelpunktes und einem Anteil der Rotation um diesen Punkt beschreiben. Nachfolgend ist dieser Zusammenhang in Formel (5.7) beispielhaft für eine Kurve aufgestellt, wobei die Kurvenrichtung nur bei der Verwendung eines Absolutwertes des Rollwinkels notwendig ist:

$${}^e \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{i+1} = {}^e \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i + \underbrace{R_i \cdot \begin{pmatrix} -\sin(\Delta\psi_i) \\ +\cos(\Delta\psi_i) \end{pmatrix}}_{TC_i} + \underbrace{R_i \cdot \begin{pmatrix} +\sin(\Delta\psi_{i+1}) \\ -\cos(\Delta\psi_{i+1}) \end{pmatrix}}_{\text{Rotation um Drehpunkt}} \quad (5.7)$$

Hierbei sind x und y kartesische Koordinaten der Fahrzeugposition, bezogen auf ein erdfestes Koordinatensystem, R_i der aktuelle Kurvenradius und $\Delta\psi$ der aus dem nordweisenden KS in das kartesische KS transformierte Gierwinkel. Die ersten beiden Summanden der rechten Gleichungsseite beschreiben den aktuellen Drehpunkt und der dritte Summand die Rotation um diesen. Unter Beachtung eines nordweisenden Koordinatensystems ergibt sich für den rotierten Gierwinkel $\Delta\psi_i$ zum aktuellen Zeitpunkt Gleichung (5.8):

$$\Delta\psi_i = \psi_i - \frac{3}{2}\pi \quad (5.8)$$

Für den Anteil der Rotation, wird der zukünftige Gierwinkel wie nachfolgend in Gleichung (5.9) berechnet:

$$\Delta\psi_{i+1} = \psi_i + {}^{\text{hor}}\dot{\psi}_i \Delta t - \frac{3}{2}\pi \quad (5.9)$$

Bei wie hier dargestellten nordweisenden Koordinatensystem wird sich der folgenden trigonometrischen Identität in Formel (5.10) bedient:

$$\sin\left(\psi - \frac{3}{2}\pi\right) = \cos(\psi) \quad (5.10)$$

Der aktuelle Kurvenradius lässt sich durch den Zusammenhang aus Formel (5.6) mit der Kurvenkrümmung und der Beziehung zwischen der aktuellen Gierrate und der Fahrzeuggeschwindigkeit in Formel (5.11) ersetzen:

$${}^{\text{hor}}\dot{\psi}_i = \kappa_i \cdot {}^{\text{hor}}v_{x_i} = \frac{\tan(-\varphi_{\text{th},i}) \cdot g}{{}^{\text{hor}}v_{x,i}} \quad (5.11)$$

Hieraus ergibt sich folgender Zusammenhang, wie er in dieser Arbeit als Positionsberechnungsmethode 1 (PB1) bezeichnet wird:

$${}^e \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{i+1} = {}^e \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i + \kappa_i^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -\cos(\psi_i) + \cos(\psi_i + \text{hor}\dot{\psi}_i \Delta t) \\ -\sin(\psi_i) + \sin(\underbrace{\psi_i + \text{hor}\dot{\psi}_i \Delta t}_{\psi_{i+1}}) \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

Bei dieser Berechnungsmethode wird sowohl für die Berechnung der aktuellen Kurvenkrümmung als auch für die aktuelle Gierrate der Zusammenhang der stationären Kurvenfahrt aus Formel (5.6) angewandt.

Eine zweite Möglichkeit (PB2) zur Berechnung einer Position aus den Größen der Geschwindigkeit und des Rollwinkels orientiert sich an einem Ansatz nach Ziegler¹²⁶, oder Thoma.¹²⁷ Der Ansatz basiert auf einem rutschfrei rollenden Rad auf einer ebenen Fläche, wie in der Literatur in Kapitel 2.3. Hierfür lässt sich die Geschwindigkeit $\text{hor}v_x$ vektoriell in die Bestandteile in die kartesischen Koordinatenrichtungen x -Richtung und y -Richtung zerlegen, was Formel (5.13) ergibt.

$$\begin{aligned} {}^e v_x &= \text{hor}v_x \cdot \cos(\Delta\psi_i) \\ {}^e v_y &= \text{hor}v_x \cdot \sin(\Delta\psi_i) \end{aligned} \quad (5.13)$$

Bei Beachtung der Zusammenhänge für $\Delta\psi_i$ aus Formel (5.10) und (5.12) ergibt sich Formel (5.14) für die Berechnung der zukünftigen Position.

$${}^e \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{i+1} = {}^e \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i + \text{hor}v_{x_i} \cdot \Delta t \cdot \begin{pmatrix} -\sin(\psi_i + \text{hor}\dot{\psi}_i \Delta t) \\ +\cos(\underbrace{\psi_i + \text{hor}\dot{\psi}_i \Delta t}_{\psi_{i+1}}) \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

Hierbei entspricht $\text{hor}v_{x_i}$ der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit welche vektoriell zerlegt und über Δt integriert, beschrieben über die Änderung des Gierwinkels die zukünftige Position ergibt. In der Berechnungsmethode PB2 wird die Annahme der stationären Kurvenfahrt für die Berechnung des zukünftigen Gierwinkels genutzt. Der Einfluss bei der Kurvenkrümmung entfällt.

Beide vorgestellten Berechnungsmethoden zur Schätzung einer zukünftigen Position in Abhängigkeit der Größen Geschwindigkeit und Rollwinkel basieren für die Anwendung auf der Annahme der stationären Kurvenfahrtbedingung aus Kapitel 2.2. Hieraus resultierend weisen beide Varianten Singularitäten auf. Aufgrund der Berechnung eines zukünftigen Gierwinkels mit Hinzunahme der Berechnung der Gierrate nach Formel (5.11) weisen beide

¹²⁶ Ziegler, J.: Dissertation, Optimale Bahn- und Trajektorienplanung für Automobile (2015).

¹²⁷ Thoma, M.; Laumond, J.-P.: Robot Motion Planning and Control (1998).

Variante eine Singularität für niedrige Geschwindigkeiten auf. Formel (5.15) beschreibt den Grenzübergang für die Gierrate.

$$\lim_{\text{hor}v_{x,i} \rightarrow 0} (\text{hor}\dot{\psi}_i) = \infty \tag{5.15}$$

Aus diesem Grund sind beide Ansätze nicht für niedrige Geschwindigkeit oder ein stehendes Fahrzeug geeignet. Zusätzlich besteht für den Ansatz nach PB1 eine weitere Singularität für kleine Rollwinkel aufgrund des Zusammenhangs in Formel (5.6) bei der Berechnung des aktuellen Kurvenradius, bzw. des Reziprokwertes der aktuellen Kurvenkrümmung.

$$\lim_{\varphi_i \rightarrow 0} (\kappa_i^{-1}) = \infty \tag{5.16}$$

Formel (5.16) stellt diese Grenzwertbetrachtung dar und besagt indirekt, dass eine Darstellung des Übergangs von der oder in die Geradeausfahrt mit dieser Methode nicht möglich ist. Aus diesem Grund wird für das weitere Vorgehen PB2 angewendet, also die Berechnungsmethode auf Basis der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit, der aktuellen Gierrate und des aktuellen Gierwinkels, welche über den Zusammenhang der stationären Kurvenfahrt aus Rollwinkel und Geschwindigkeit berechnet werden können.

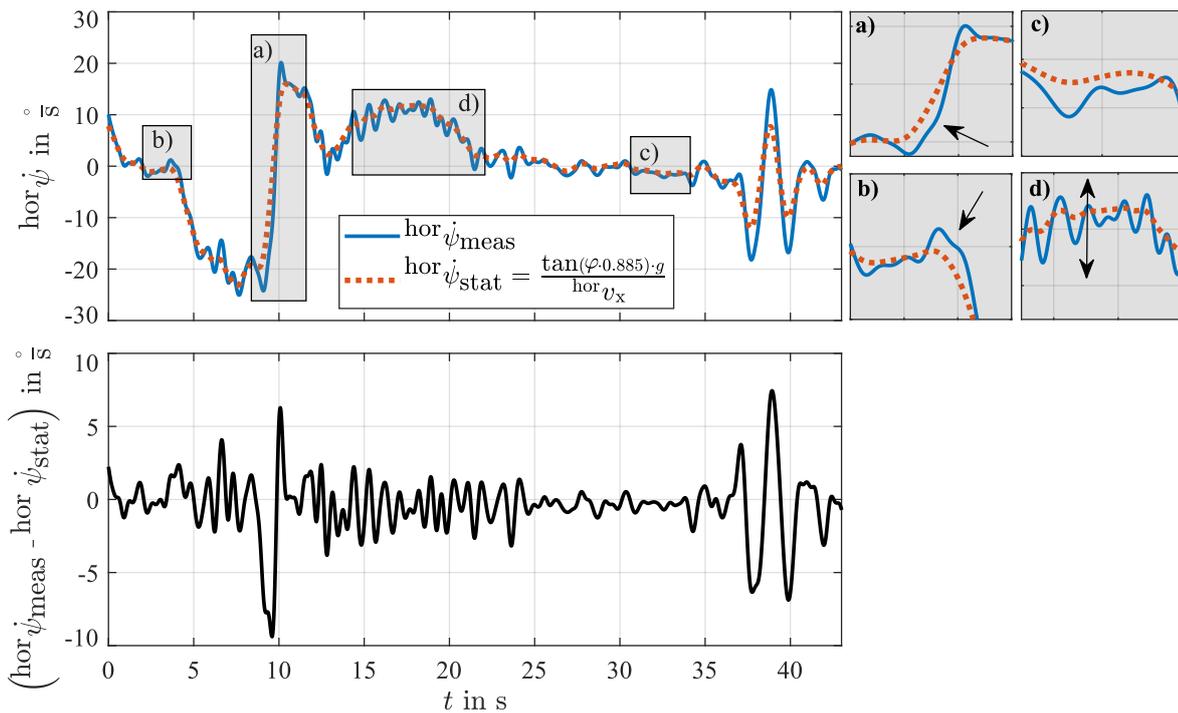


Abbildung 5-19 Abweichung zwischen gemessenem und mittels stationärer Kurvenfahrt berechnetem horizontiertem Gierratenverlauf nach Scherer und Basten¹²⁸ ○

Die Berechnung einer zukünftigen Fahrzeugposition ist dabei als Anfangswertprobleme interpretierbar. Bei Vorgabe eines Startwertes, zum Beispiel von kartesischen Koordinaten $[x_0; y_0]^T$ und einem Gierwinkel ψ_0 zu Beginn einer Kurve wird über eine schrittweise

¹²⁸ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 287.

Berechnung in Abhängigkeit eines aufgrund des jeweils typischen Fahrverhaltens angenommenen theoretischen Rollwinkel- und Geschwindigkeitsverlaufes eine zukünftige Position berechnet.

Aufgrund der Annahme des physikalischen Zusammenhangs der Beschleunigungen, beziehungsweise des Kräftegleichgewichts während der Phase der stationären Kurvenfahrt bei der Berechnung der aktuellen Gierrate werden Fehler in dynamischen Phasen der Kurvenfahrt in die Positionsberechnung übertragen.

Beispielhaft dargestellt sind diese Einflüsse aufgeteilt nach ihrer Detektierbarkeit in der jeweiligen dynamischen Phase in Abbildung 5-19. Als Datenbasis hierfür wird ein beliebiger Messdatensatz der Validierungsmessungen (○) mit der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Messtechnik ADMA verwendet. Die Messwerte der horizontalen Gierrate sind mit der durchgezogenen blauen Linie oben links im Zeitverlauf dargestellt. In orange gepunktet ist der zugehörige Verlauf der berechneten Gierrate, nach Formel (5.11). Dieser wird bereits korrigiert durch den Einfluss der Reifenbreite auf den Messwert des Rollwinkels, um aus dem gemessenen Rollwinkel den hierfür benötigten theoretischen Rollwinkel zu erhalten. Im unteren Teil der Darstellung ist der Fehler als Differenz zwischen dem gemessenen und berechneten Signal aufgetragen. Hier stechen besonders die dynamischen Phasen, zum Beispiel während einer Kurvenausleitung oder Überleitung, hervorgehoben in Teilabschnitt a) heraus. Nachfolgend sind die markierten Phasen a) bis d) nach ihrer Auftretensursache näher erläutert.

a. Gleichgewichtsbedingung

Die gesamte Berechnung beruht auf der Annahme des physikalischen Zusammenhangs des Kräftegleichgewichts während der Phase der stationären Kurvenfahrt. Die Bezeichnung dieser Annahme legt bereits nahe, dass jedweder instationärer Anteil der Kurvenfahrt hierdurch nicht abgebildet werden kann. Im hier hervorgehobenen Fall wird die Phase der Kurvenausleitung, beziehungsweise Kurvenüberleitung näher betrachtet. In dieser Phase herrscht kein Gleichgewicht zwischen den wirkenden Beschleunigungen am Schwerpunkt des Gesamtsystems. Die dynamische Änderung während der Kurvenfahrt bedarf genau des Gegenteils, also eines Ungleichgewichts der Kräfte. Ansonsten würde der Bereich der stationären Kurvenfahrt nie verlassen werden.

b. Countersteering Effekte

Die Einleitung und auch die Ausleitung einer Kurvenfahrt unterliegt beim Einspurfahrzeug dem Countersteering Effekt. Um das bereits beschriebene Ungleichgewicht der wirkenden Kräfte am Schwerpunkt hervorzurufen ist eine Störung der Gleichgewichtsbedingung, zum Beispiel durch das Iniziiieren der Kurvenfahrt mittels der Schräglaufseitenkraft am Vorderrad notwendig. Diese Störung, bzw. das Aufbringen eines Lenkmomentes nach Kurvenaußen führt zu einer kurzzeitigen Bewegung des Gesamtfahrzeuges entgegen der geplanten Kurvenrichtung. Dies ist im Messwert der Gierrate sichtbar, wird jedoch durch die stationäre Gleichgewichtsbedingung nicht abgebildet.

c. Fehlerfortpflanzung aus Rollwinkelsignal und Geschwindigkeitsmessung

In dem hier hervorgehobenen Teil ist messsystembedingte bzw. prozessbedingte Ungenauigkeit feststellbar. Durch zum Beispiel eine fehlerhafte Kalibrierung der Messtechnik oder auch die Annahme des Korrekturfaktors zum Einbezug der Reifenbreite wird bei der Berechnung des theoretischen Rollwinkels aus einem gemessenen oder teils geschätzten Rollwinkelsignal ein Fehler in das berechnete Gierratensignal übertragen. Zudem kann hier ein falsches Geschwindigkeitsmesssignal Auswirkungen zeigen.

d. Systemträgheit

Wie in diesem Datenabschnitt hervorgehoben sind hochdynamische, zum Beispiel aus der stetigen Korrektur Eingabe durch den Fahrer resultierende Einflüsse aufgrund der relativen Unempfindlichkeit von Rollwinkel und Geschwindigkeitssignal auf diese nicht abgebildet. Dies ist hier insbesondere hervorgehoben, da es sich auch um messprozessbedingte Schwingungen im Drehratensignal handeln kann.

Die Klassifizierbarkeit der Fehler ermöglicht die Entwicklung eines Kompensationsansatzes auf Basis der aufgestellten Fehlereinflüsse in Form einer Vorsteuerung. Die Berücksichtigung der bekannten und abschätzbaren Fehlereinflüsse ermöglicht eine Reduktion des prozessbedingten Fehlers.

$$\begin{aligned} \text{hor}\dot{\psi}_{\text{corr}} = & \frac{\tan(\varphi_{\text{th}}) \cdot g}{\text{hor}\dot{v}_x} + \dots & (5.17) \\ & \dots a_{1,\text{corr}} \cdot \text{sign}(\text{hor}\dot{\psi}_{\text{stat}}) \cdot |\text{hor}\dot{\psi}_{\text{stat}}|^{a_{2,\text{corr}}} + \dots \\ & \dots b_{1,\text{corr}} \cdot \text{sign}(\text{hor}\ddot{\psi}_{\text{stat}}) \cdot |\text{hor}\ddot{\psi}_{\text{stat}}|^{b_{2,\text{corr}}} + \dots \\ & \dots c_{\text{corr}} \cdot \text{sign}(-\text{hor}\ddot{\psi}_{\text{stat}}) \cdot |\text{hor}\ddot{\psi}_{\text{stat}}| + d_{\text{corr}} \end{aligned}$$

Formel (5.17) beschreibt dieses korrektive Vorgehen. Insgesamt vier Korrekturterme auf Basis der berechneten Gierratenwerte und zugehöriger Ableitungen sowie der statischen Abweichung werden eingeführt. Durch die Anwendung der Signum- und der Betragsfunktion in Kombination werden die Basiswerte der Exponenten entdimensioniert, bei gleichzeitigem Erhalt der gesamten Information des Wertes.

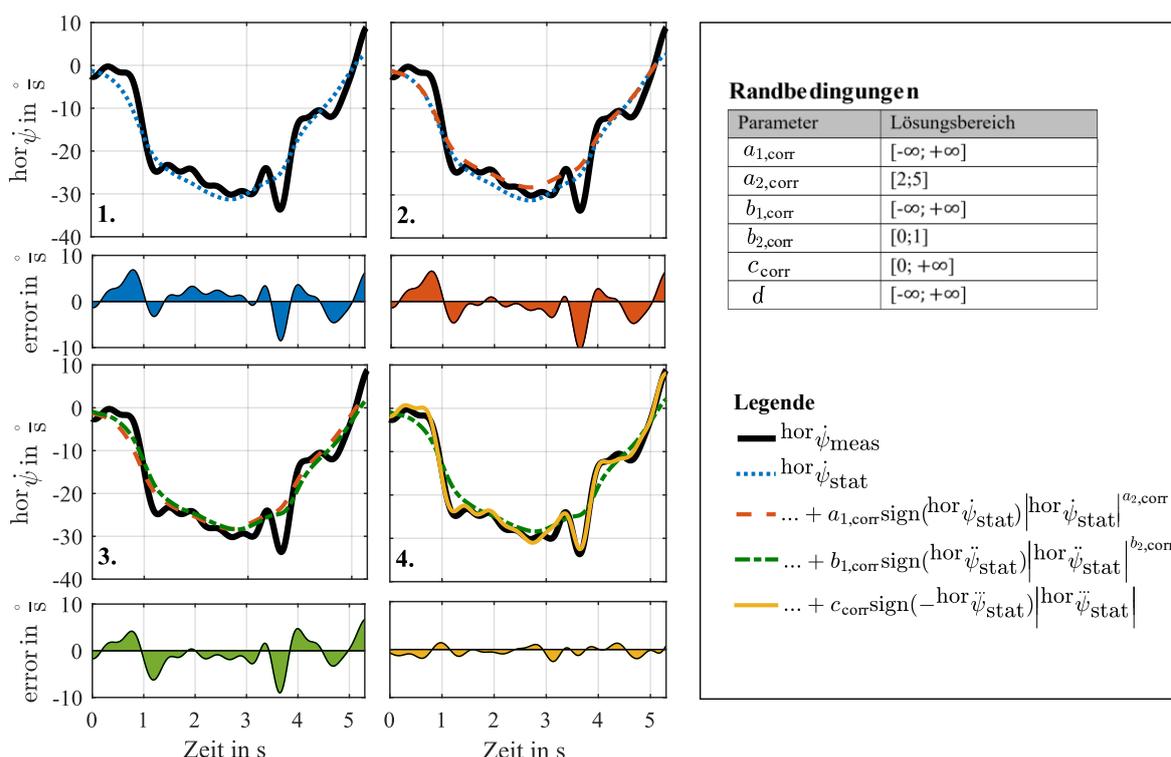


Abbildung 5-20 Beschreibung des Vorgehens zur Korrektur des Gierratschätzwertes nach Scherer und Basten¹²⁹ ○

Die Koeffizienten $a_{1,corr}$, $b_{1,corr}$, c_{corr} und d_{corr} werden zum Erhalt der Einheitlichkeit mit der Einheit der Gierrate (rad/s) angegeben. Zur Erzeugung der Koeffizienten wird der Korrekturterm als mathematisches Optimierungsproblem mit möglichst geringer Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Gierratensignal betrachtet. Die Optimierung basiert auf der Minimierung der euklidischen Norm zwischen Referenzvektor (gemessene horizontierte Gierrate) und Schätzung (Korrekturglied basierend auf der stationär berechneten Gierrate).

Abbildung 5-20 verdeutlicht den Einfluss durch die stückweise Hinzunahme der einzelnen Korrekturterme. In allen Abbildungen mit dicker schwarzer Linie dargestellt ist der Verlauf des Messsignals der Gierrate einer beliebigen Durchfahrt eines Probanden der LI-180-12 Kurve. Beginnend oben links in der Abbildung (1.) ist der Verlauf des gemessenen und des über Formel (5.11) berechneten Gierratensignals, sowie die jeweilige Differenz des Signals als Fehler, dargestellt direkt unter der Verlaufsdarstellung. Durch die Hinzunahme des ersten Korrekturterms mit den Koeffizienten $a_{1,corr}$ und $a_{2,corr}$ wird eine Reduktion des Fehlers in Abbildung 5-20 (2.) verdeutlicht. Dieser Term bewirkt eine gierratenproportionale Korrektur der errechneten Stationärannahme. Somit nimmt der Einfluss der Korrekturfaktoren mit der Zunahme des Originalsignals zu. Die proportionale Korrektur ermöglicht gleichzeitig eine Analyse und Korrektur der Kurvenphasen mit großen Gierwinkeländerungen, also insbesondere der stationären Haltephasen. Abweichungen zwischen gemessenem Signal und dem

¹²⁹ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 294.

Signal aus der Quasistationärannahme sind hier zum Beispiel auf eine Schwerpunktverschiebung während der Kurvenfahrt zurückzuführen. Die Schwerpunktlage wird beim Motorradfahren zum Beispiel durch die Oberkörperlage des Fahrers beeinflusst. Somit ist die Ausprägung des Korrekturfaktors $a_{1,corr}$ ein Indiz für die Stärke der Oberkörperbewegung während der Kurvenfahrt das Vorzeichen gibt die allgemeine Tendenz, also das mit in die Kurve (lean in) oder entgegen der Kurvenmitte (lean out) Lehnen an.

Unter Hinzunahme des zweiten Korrekturglieds, mit den Parametern $b_{1,corr}$ und $b_{2,corr}$ ist eine Verringerung des Fehlers während der Kurveneinleitungsphase zu beobachten, dargestellt in Teil (3.) unten links der Abbildung 5-20 im Zeitraum $t = 0$ s bis $t = 1$ s. Der Einfluss dieses Korrekturterms kommt einer Dämpfung des Signals gleich und kommt somit bei langanhaltenden Änderungen im Ausgangssignal zum Tragen.

Der dritte Korrekturterm, dargestellt in Abbildung 5-20 Teil (4.) auf Basis der zweiten Ableitung des quasistationären Gierratensignals entspricht einer kurvenunabhängigen Berücksichtigung der unbekanntenen Trägheit im Gesamtsystem.

Somit sind die ersten beiden Korrekturterme als kurven-, beziehungsweise durchfahrtabhängige Größen interpretierbar, c_{corr} und d_{corr} entsprechen eher einer allgemeinen Korrektur der nicht berücksichtigten Systemträgheit oder eines statischen Messfehlers.

Die hier vorgestellte Fehlerkompensation wird in dieser Arbeit je Durchfahrt und Fahrer angewendet und dient insbesondere der Korrektur nicht berücksichtigter dynamischer Einflüsse mit der vorgestellten Methode. Die parametrisierten Werte bieten eine weitere Interpretationsmöglichkeit des jeweiligen spezifischen Verhaltens, z.B. des Lehnverhaltens je Kurvendurchfahrt und Fahrer.

Allgemein wird darauf hingewiesen, dass die vorgestellte Korrektur sowohl messtechnisch bedingte Fehler korrigiert als auch fahrerspezifische Verhaltensinterpretation ermöglicht. Bei der Anwendung alternativer Messtechnikkonzepte - zum hier für die Validierung genutzten präzisen ADMA Messgerät ist vor der Nutzung der Korrekturfaktoren zur Interpretation fahrerspezifischen Verhaltens eine Verifizierung der Datenqualität von Rollwinkel und Geschwindigkeitssignal durchzuführen. Fehler bei diesen Messgrößen gehen bei der Annahme der stationären Kurvenfahrt in den berechneten Wert der Gierrate über.

5.6 Interpretierbare Zusatzgrößen aus Modell

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten, stark vereinfachten dynamischen Modell ist die Darstellung des spezifischen Verhaltens durch parametrierbare Funktionen des Rollwinkels und der Geschwindigkeit möglich. Zusätzlich wird im vorherigen Kapitel 5.5 ein Ansatz zur Parametrierung von Korrekturfaktoren zur dynamischen Beschreibbarkeit eines geschätzten Gierraten-Signals vorgestellt. Nachfolgend wird eine Interpretationsmöglichkeit dieser Signale gegeben.

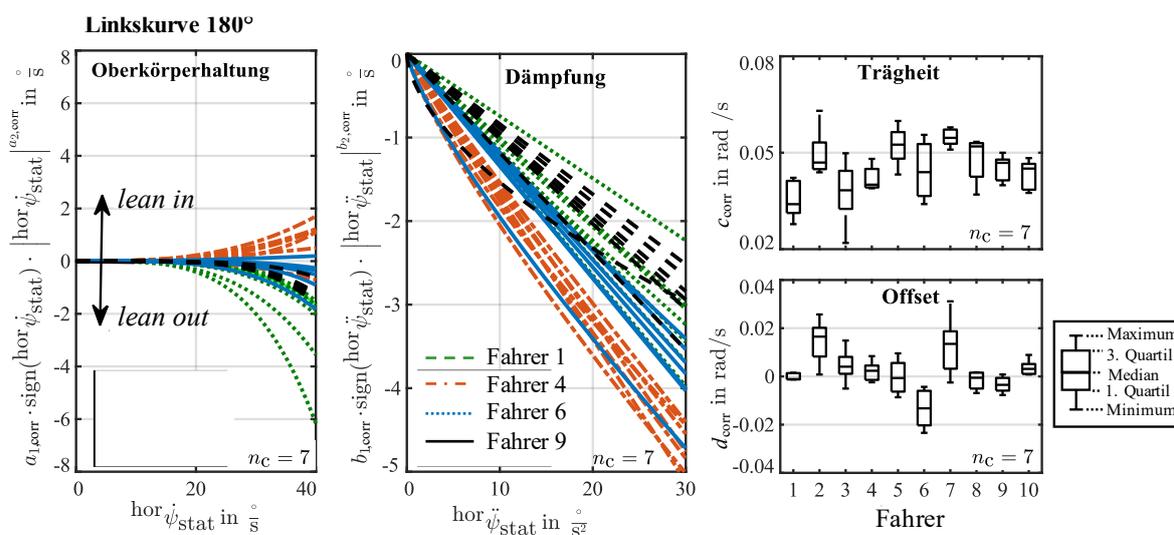


Abbildung 5-21 Oberkörperhaltung (links), Dämpfung (Mitte), Trägheit und Offset (rechts) aus den Gierraten-Korrekturfaktoren \diamond

In Abbildung 5-21 sind die Korrekturparameter für die Kurvendurchfahrten der LI-180-12 von Fahrer 1, 4, 6 und 9 dargestellt. Für jeden Fahrer liegen $n_c = 7$ Kurvendurchfahrten vor, wobei die Abszissenwerte typische Wertebereiche repräsentieren, die bei dieser Kurve erreicht werden (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \diamond siehe Kapitel 4.3.5).

Auf der linken Seite von Abbildung 5-21 ist der Einfluss des ersten Korrekturterms der Formel (5.17) über der stationären Gierrate zu sehen. Klare Bereiche sind für die vier Fahrer abgrenzbar. In einer Linkskurve weisen positive Werte des Summanden auf ein "lean-in" und negative Werte auf ein "lean-out" hin. Fahrer 1 und 6 neigen dazu, das Fahrzeug in die Kurve zu drücken (lean out), während Fahrer 4 ein gegenteiliges Verhalten zeigt. Fahrer 9 variiert seinen Fahrstil, neigt jedoch tendenziell zum "lean-out". Die Höhe des Summanden ermöglicht die Bewertung der Ausprägungsstärke, wobei Fahrer 6 das Fahrzeug stärker in die Kurve drückt als Fahrer 1, da die Höhe des additiven Gliedes mit zunehmender Gierrate betragsmäßig wächst. Die über die Korrekturfaktoren ermittelte Oberkörperhaltung lässt sich in dem Teststreckendatensatz \diamond nur qualifiziert überprüfen. Die Fahrer sind mit einem Messsystem zur Bestimmung der Oberkörperposition ausgestattet. Aufgrund der Messgenauigkeit des Systems sind keine qualifizierten Aussagen möglich. Die Tendenz der mit den Korrekturfaktoren ermittelten Oberkörperpositionen stimmt mit den Messungen überein.

In der Mitte von Abbildung 5-21 ist der Einfluss des dämpfenden Summanden über der Ableitung der stationär berechneten Gierrate dargestellt. Klare Bereiche sind ebenfalls für die betrachteten Fahrer erkennbar, wobei es bei einigen Fahrern Überschneidungsbereiche gibt. Mögliche Ursachen dafür könnten eine fahrerübergreifende Ähnlichkeit des physikalischen Effekts oder der Einfluss der Oberkörperposition bei der Kurvenerleitung sein.

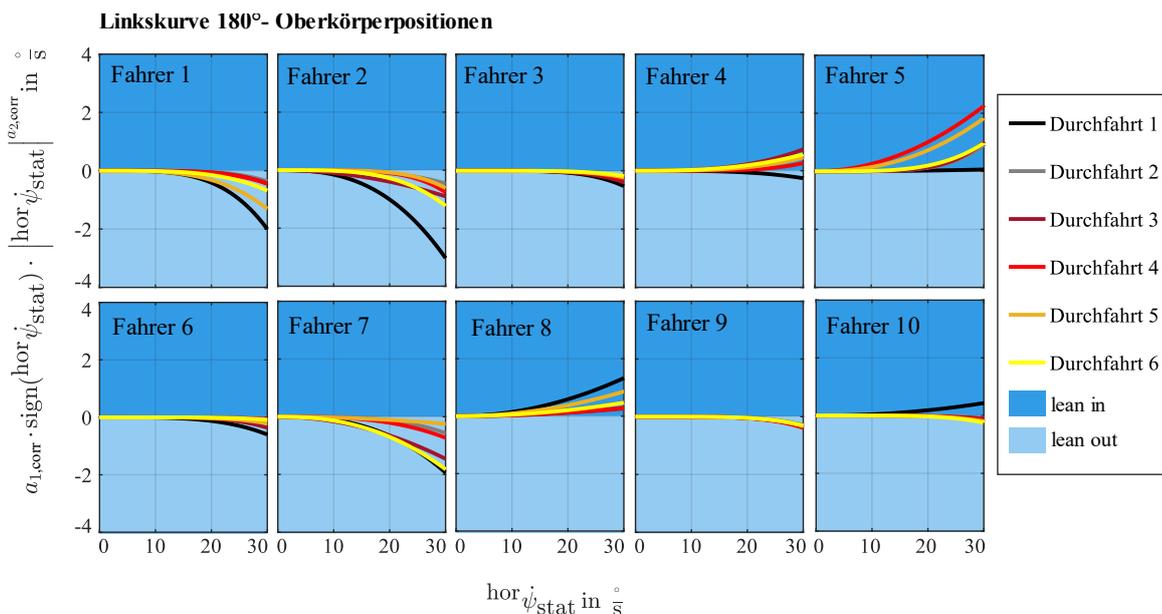


Abbildung 5-22 Vergleich der Oberkörperposition aller zehn Fahrer und jeweils sieben Durchfahrten der LI-180-12 Bewertungskurve, ermittelt aus den Korrekturparametern der Gierratenschätzung \diamond

Parameter c_{corr} , der die Trägheit des Gesamtsystems repräsentiert, zeigt erkennbare Unterschiede zwischen den Fahrern. Rechts oben in Abbildung 5-21 sind die Schwankungsbereiche dieses Parameters aller Fahrer dargestellt, wobei Fahrer 6 den größten Streuungsbereich aufweist. In der rechten unteren Ecke sind die Boxplots des Offsetparameters aller zehn Fahrer aufgetragen, wobei auch hier fahrerindividuelle Unterschiede zu erkennen sind.

Aufgrund der Vermutung, dass mit zunehmenden Kurvendurchfahrten ein Trend in der Veränderung des Fahrstils besteht, zeigt Abbildung 5-22 die Höhe des Parameters der Oberkörperposition in Verbindung mit der jeweiligen Kurvendurchfahrtsnummer für alle zehn Fahrer. Es zeigt sich, dass nur drei von zehn Fahrern ein ausgeprägtes "lean-in" Verhalten zeigen, bei drei Fahrern ist ein eindeutiges "lean-out" zu erkennen, und bei den übrigen Fahrern liegt ein "lean-with" vor. Besonders hervorzuheben sind Fahrer 3 und 9, welche über alle Durchfahrten eine hohe Ähnlichkeit der Oberkörperpositionen aufweisen.

Bei sechs von zehn Fahrern liegt der Summand der Oberkörperhaltung bei der ersten Kurvendurchfahrt unter dem aller übrigen Durchfahrten. Fahrer 8 und 10 zeigen bei der ersten Durchfahrt den höchsten Wert aller Durchfahrten. Die farbliche Codierung verdeutlicht, dass kein allgemeiner Trend zwischen der Oberkörperposition und Kurvendurchfahrtsnummer bei den 180°-Linkskurven feststellbar ist.

Im Vergleich zu den Durchfahrten der Linkskurven sind in Abbildung 5-23 die Oberkörperparameter aller Durchfahrten der RE-180-12 Kurven dargestellt. Alle zehn Fahrer weisen bei der ersten Durchfahrt ein "lean-out" auf, wobei bei acht von zehn Fahrern das drückende Verhalten am stärksten ausgeprägt ist. Bei über der Hälfte der Teilnehmer ist mit zunehmender Anzahl an Durchfahrten ein Trend zum "lean-in" zu erkennen (siehe gestrichelte Pfeile). Analog zu den 180°-Linkskurven zeigen die Fahrer 1, 2, 3, 6 und 7 dauerhaft ein "lean-out" (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \diamond siehe Kapitel 4.3.5).

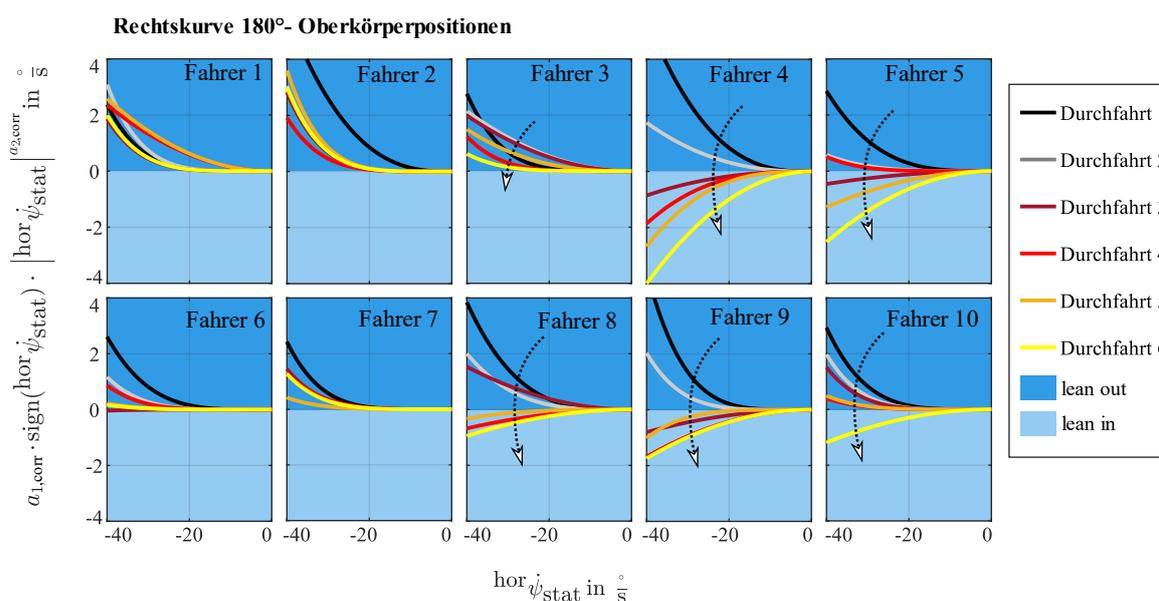


Abbildung 5-23 Vergleich der Oberkörperposition aller 10 Fahrer und jeweils 6 Durchfahrten der RE-180-12 Bewertungskurve, ermittelt aus den Korrekturparametern der Gierratenschätzung \diamond

Zusätzlich zur Interpretation des Lehnverhaltens ist mit den Modellannahmen eine Analyse möglicher Informationen aus den ermittelten Größen unter Hinzunahme weiterer Messgrößen einer IMU möglich. Wie in Kapitel 3.2.2 vorgestellt ist eine alternative Betrachtungsweise aus der Literatur zur Bewertung fahrerischer Grenzwerte oder Schwellwerte die Betrachtung von g-g-Diagrammen, bzw. Darstellungen mittels kammscher Kreise. Mit dem entwickelten Modell ist eine Schätzung der Reifenkräfte, aufgeteilt nach Längs- und Querkraft möglich. Da diese Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit keinen zusätzlichen Mehrwert für die Verifikation oder Validierung des Modells liefert wird auf eine nähere Beschreibung verzichtet. Bei Interesse befindet sich zusätzliche Information hierzu im Anhang A.3.

5.7 Modellgrenzen

Das in Kapitel 5.4 beschriebene Modell zur Abbildung fahrerspezifischen Verhaltens ist aufgrund des gewählten mathematischen Ansatzes, wie auch des allgemeinen Vorgehens geeignet zur Beschreibung der Wiederholbarkeit und Streuung beim mehrfachen Durchfahren einer Kurve. Hieraus ergibt sich die erste Grenze des Modells, eine direkte Anwendbarkeit auf eine andere Kurve ist nur bedingt möglich. Aufgrund der Parametrierung einer wiederholten Durchfahrt derselben Kurve kann sehr gut die Wiederholbarkeit des Verhaltens bewertet werden. Zudem sind Trends und fahrertypische Schwankungen darstellbar, diese beziehen sich aber exakt auf den Zeitpunkt der Erzeugung der Daten. Ein Wiederholen derselben Untersuchung mit veränderten Randbedingungen (Witterung, Straßenzustand) kann somit andere Koeffizienten hervorrufen.

Eine weitere Eingrenzung ist die Erzeugung eines Parametersatzes einer expliziten Fahrer-Fahrzeug Kombination. Ein Wechseln des Fahrzeuges kann somit aufgrund eines veränderten Verhaltens des Fahrers durch veränderte Geometrie- oder Leistungsverhältnisse auch zu anderen Ergebnissen in der Parametrierung der fahrerspezifischen Kenngrößen führen.

Zudem ist über die Einführung der Korrekturfaktoren eine Abhängigkeit von der Anzahl der Kurvendurchfahrten erkennbar. Das durch die Faktoren korrigierte Verhalten kann sich in Abhängigkeit der Anzahl der Kurvenfahrten oder auch der Bekanntheit einer Strecke verändern.

Somit ist vor einer Anwendung eines solchen Modells eine weitreichende Untersuchung der Zusammenhänge und Unterschiede zwischen verschiedenen Kurvengeometrien, Umwelteinflüssen und Fahrzeugen notwendig.

6 Verifikation und Validierung

Nachfolgend werden die Verifikation und Validierung des entwickelten Modells vorgestellt. Diese werden jeweils getrennt voneinander betrachtet.

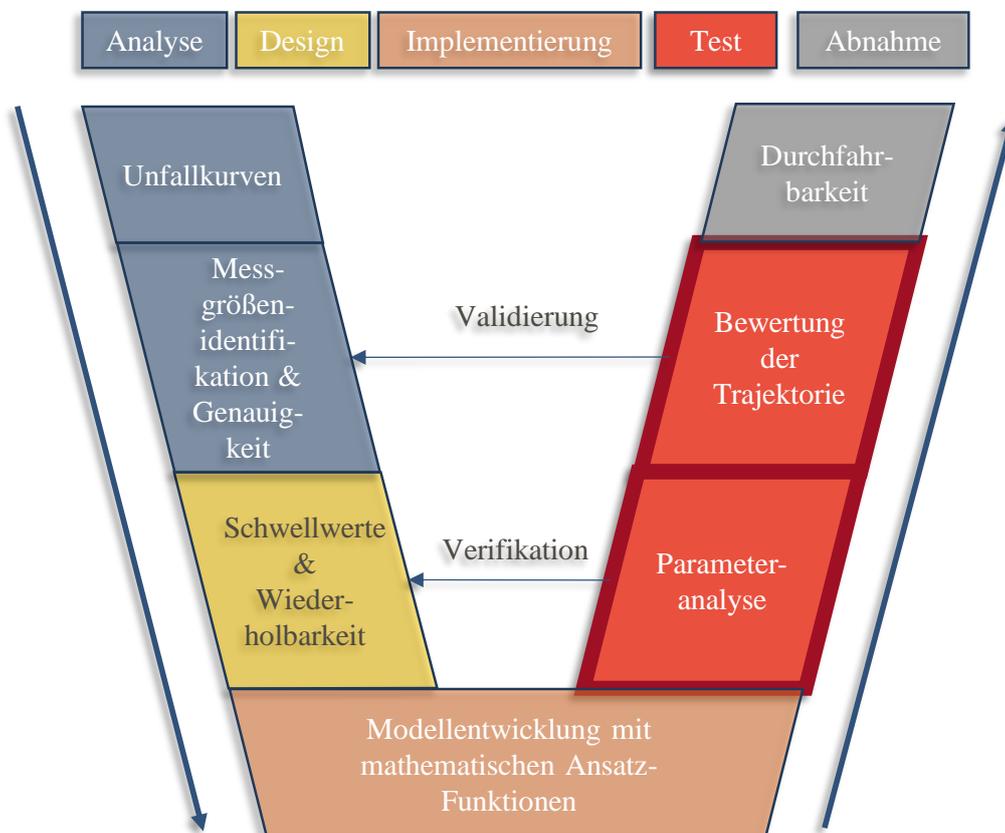


Abbildung 6-1 Methodisches Vorgehen der Modellentwicklung, Kapitel 6, Verifikation und Validierung

Nach Abbildung 6-1 folgt in Kapitel 6 die Phase des Tests der V-Modell-Entwicklung.

Das Modell wird als verifiziert angesehen, wenn alle Anforderungen der Parametrierbarkeit fahrspezifischen Verhaltens erreicht werden. Hierfür wird in die dynamischen, instationären Kurvenphasen der Kurveneinleitung, Kurvenausleitung sowie Kurvenüberleitung und die stationären, bzw. quasistationären Anteile der Rollwinkelhaltephasen unterschieden.

Zur Validierung des Gesamtmodells wird das Erreichen der Anforderung an die Genauigkeit der mittels des Modells erzeugten Trajektorie im Verhältnis zum Messsignal untersucht. Die Validierung erfolgt mittels des Vergleiches der Messdaten und berechneten Daten auf abgesperrtem Gelände. Der Datensatz zur Validierung wird mit der präzisen Messtechnik ADMA erzeugt.

6.1 Verifikationsansatz mittels Parameteranalyse

Das Modell wird als verifiziert betrachtet, wenn die aus Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3 erarbeiteten Anforderungen an die Abbildbarkeit von Schwellwerten und wiederholbarem Verhalten sowie Abweichungen zum typischen Verhalten bei Anomalieereignissen in den Parameterwerten erreicht werden.

Die Zuordnung der Koeffizienten der Ansatzfunktionen zu der jeweils betrachteten Größe wird im folgenden Abschnitt für die Koeffizienten der Ansatzfunktionen mit der Nomenklatur gemäß Formel (6.1) dargestellt.

$${}_{i_2}^{i_1} k_{i_3} \quad (6.1)$$

Hierbei steht k für den Koeffizienten der Ansatzfunktion. Der Index i_1 repräsentiert die approximierten Messgröße (Rollwinkel oder Geschwindigkeit) und der Index i_2 gibt eine Information über das betrachtete Kurvenprimitiv. Existieren für einen der Koeffizienten mehrere Ausprägungen wird dies durch den Index i_3 dargestellt. Tabelle 6-1 gibt eine Übersicht der Bedeutung der Indizes.

Tabelle 6-1 Erklärung der verwendeten Indizes zur Verifikation der mathematischen Ansatzfunktionen nach Scherer und Basten¹³⁰

Variable		Bedeutung	
k	Koeffizient der Ansatzfunktion	κ_{\pm}	Richtung der Wachstumsfunktion
		b	Exponentenkoeffizient der Wachstumsfunktion
		$s_s = vz(a + d)$	Startschränke der Wachstumsfunktion
		$s_e = vz(c + d)$	Endschränke der Wachstumsfunktion
		$base$	Basis der linearen Regression
		g	Steigung der linearen Regression
		\tilde{a}	Amplitude überlagerte Schwingung
		\tilde{f}	Frequenz überlagerte Schwingung
		\tilde{l}	Phasenverschiebung überlagerte Schwingung
Index		Bedeutung	
i_1	Approximiertes Signal	roll	Rollwinkelsignal
		vel	Geschwindigkeitssignal
i_2	Betrachtetes Primitiv	LI/RI	Kurveneinleitung (Links-/Rechtskurve)
		LO/RO	Kurvenausleitung (Links-/Rechtskurve)
		LR/RL	Richtungswechsel S-Kurve
		SL/SR	Stationäre Kurvenfahrt (Links-/Rechtskurve)
i_3	Ausprägung	1	Erste überlagerte Schwingung
		2	Zweite überlagerte Schwingung
		s	Start(-schränke)
		e	End(-schränke)

¹³⁰ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 283.

Beispielhaft sind folgende Lesarten dargestellt: Die Bezeichnung $\overset{\text{roll}}{\underset{\text{SL}}{\tilde{f}}}_2$ repräsentiert die Frequenz (\tilde{f}) der zweiten überlagerten Schwingung (2) des Rollwinkelsignals während der stationären Linkskurven-Primitives (SL). Die Bezeichnung $\overset{\text{vel}}{\underset{\text{LO}}{s_e}}$ steht für die Endschränke (s_e) des Geschwindigkeitssignals (vel) im dynamischen Kurvenausleitungsprimitive einer Linkskurve (LO-Primitiv). $\overset{\text{roll}}{\underset{\text{SR}}{\text{base}}}$ bezeichnet den Basiswert (Schnittpunkt der linearen Regression mit y-Achse) des Rollwinkelverlaufes im stationären Rechtskurven-Primitiv (SR).

6.1.1 Instationäre Kurvenfahrt - Parameteranalyse

Der erste Teil der Verifikation behandelt die dynamische Kurvenphase der instationären Kurvenfahrt. Diese lässt sich unterteilen in die Phase der Kurveneinleitung und der Kurvenausleitung, sowie des besonders dynamischen Kurvenübergangs.

6.1.1.1 Kurveneinleitung

Das Einleiten einer Kurvenfahrt wird durch das dynamische Manöverprimitive LI/RI repräsentiert. Die mathematische Darstellung erfolgt mittels einer logistischen Wachstumsfunktion und einer überlagerten Schwingung (siehe Kapitel 5.4). Die Wachstumsfunktion beschreibt den Übergang von einem kleinen Rollwinkelwert, der Startschranke zu Beginn der Kurve über ein exponentielles Wachstum hin zu einem betragsmäßig größeren Wert, der Endschränke. Statt einer getrennten Betrachtung der Parameter a, c oder d wird der in Tabelle 6-1 aufgestellte Zusammenhang in Form der Startschranke und Endschränke zur Interpretation der Koeffizienten verwendet.

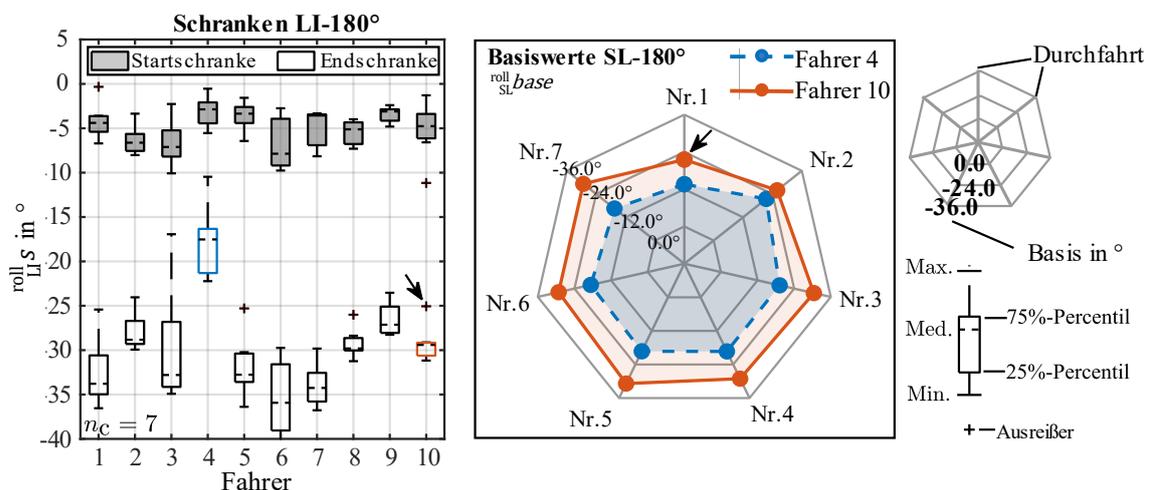


Abbildung 6-2 Schwellwerte der logistischen Wachstumsfunktion aller zehn Fahrer (links), Schrankenwerte der Basiswerte des Stationärteils Fahrer 4 und 10 nach Scherer und Basten¹³¹ ◇

¹³¹ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 285.

Abbildung 6-2 links illustriert die Schwellenwerte der logistischen Wachstumsfunktion für Rollwinkelverläufe des LI/RI-Primitives $roll_{LI}^{roll}$ während der LI-180-12-Bewertungskurven für alle Fahrer. In Abbildung 6-2 rechts sind zudem die Basiswerte der Regression $roll_{SL}^{base}$ des stationären Primitives beispielhaft für Fahrer 4 und Fahrer 10 dargestellt. In dieser Darstellungsart wird jeder einzelne Koeffizient der sieben Durchfahrten in der Reihenfolge der Durchfahrten dargestellt (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \diamond siehe Kapitel 4.3.5). Dies ist auch bei der Betrachtung der Kurveneinleitungsphase ein relevanter Vergleich, da Anforderung *Anf-Mod-Fah-3* eine Beschreibbarkeit des Übergangs der einzelnen Primitive definiert. Stimmt der Basiswert des auf die Einleitung folgenden Primitives mit dem Endwert des vorausgegangenen Primitives überein, ist hier ein Zusammenhang erkennbar. Dies ist möglich durch einen Vergleich der Endschränkenwerte der Kurveneinleitung (links) mit den Basiswerten der darauffolgenden Stationärphase (rechts).

Die Startschwelle in der Abbildung links (grau) markiert den Schnittpunkt der Wachstumsfunktion mit der Ordinate, während die Endschwelle (weiß) den Unendlichkeitswert der Wachstumsfunktion repräsentiert. Deutliche Unterschiede in den Start- und Endschwellen des LI-Manöverprimitives zwischen den Fahrern sind erkennbar. Die Endschwellen des Primitives korrelieren mit den Basiswerten des SL-Primitives. Dies zeigt sich besonders bei Fahrer 4 und 10. Die Netzplots der Basiswerte des SL-Primitives für diese Fahrer sind in der rechten Abbildung dargestellt. Die Endschwellen (links) stimmen tendenziell mit den Basiswerten des angrenzenden SL-Primitives (rechts) überein. Es sind jedoch vereinzelt Unterschiede feststellbar. Die geringste Endschwelle von Fahrer 10 beträgt etwa 25° Rollwinkel (siehe Pfeil), während der kleinste Basiswert des stationären Primitives etwa 22° beträgt. Diese Differenz resultiert aus verschiedenen Ursachen, einschließlich der Optimierung der Parametrierung der Fahrerkoefizienten für das gesamte Primitiv sowie der Vorgabe von Randbedingungenbereichen für die Wachstumsfunktion (siehe Anhang A.4). Daher repräsentiert die Endschwelle den Unendlichkeitswert, der dem realen Endwert im Rahmen der gesetzten Grenzen entspricht. Zudem wird der Basiswert der linearen Regression des SL/SR-Primitives durch die Regression selbst vorgegeben. Daher weichen insbesondere die Basiswerte der Regressionen stärker von den realen Startwerten des SL/SR-Primitives ab. Dennoch zeigt sich, dass sich die Näherungswerte an den Rändern der Primitives ähneln.

Zusätzlich zu den Schwellenwerten gibt der Exponentenoeffizient b einen Eindruck über die Ausbildung der S-Form des Rollwinkelverlaufs in der Einleitungsphase.

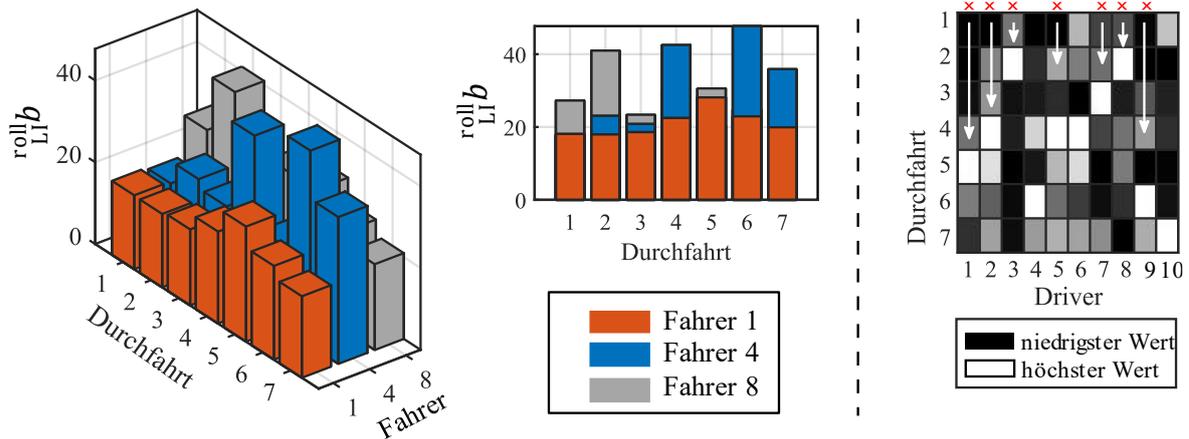


Abbildung 6-3 links und Mitte: Exponentenkoeffizienten der Kurveneinleitungsphase, rechts Verteilung der Werte in Abhängigkeit der Durchfahrt nach Scherer und Basten¹³² ◇

In Abbildung 6-3 links und in der Mitte sind die Exponentenkoeffizienten des Rollwinkels der Kurveninitiierung $roll_{LI}b$ für die LI-180-12 Kurven der Fahrer 1, 4 und 8 im Vergleich dargestellt. Der Wert der Exponentenkoeffizienten variiert fahrerspezifisch. Eine fahrerunabhängige Abgrenzung ist für die vorliegende Linkskurve nicht möglich. Die Schwankung der Koeffizientenwerte in Abhängigkeit der Durchfahrt folgt keinem eindeutig identifizierbaren, fahrerübergreifenden Muster. Im mittleren Teil von Abbildung 6-3 wird deutlich, dass die Koeffizienten der Fahrer 1, 4 und 8 in der ersten Durchfahrt nicht den Maximalwert im Vergleich zu allen Durchfahrten erreichen. Der Maximalwert wird komplett individuell erreicht, jedoch niemals bei der ersten oder letzten Durchfahrt. In Abbildung 6-3 rechts sind die fahrerspezifisch normierten Exponentenkoeffizienten aller Fahrer dargestellt. Die Normierung erfolgt anhand des höchsten Parameterwerts aller Durchfahrten des jeweiligen Fahrers (weiß). Bei der Betrachtung aller Fahrer (Abbildung 6-3 rechts) ist eine anfängliche Steigerung der Exponentenkoeffizienten mit zunehmender Anzahl der Durchfahrten bei sieben von zehn Fahrern zu beobachten (siehe Pfeil). Ein ähnlicher Effekt ist bei den Rechtskurven nicht erkennbar. Insgesamt kann keine allgemeingültige Korrelation zwischen der Nummer der Durchfahrt und dem Wert des Exponentenkoeffizienten gefunden werden.

Beim Vergleich der Exponentenkoeffizienten der Fahrer des Kurveneinleitungs-Primitives bezüglich der Kurvenrichtung zeigen sich Unterschiede sowohl in Bezug auf die Parameterwertestreuung als auch auf die Größe der Werte.

¹³² Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 285.

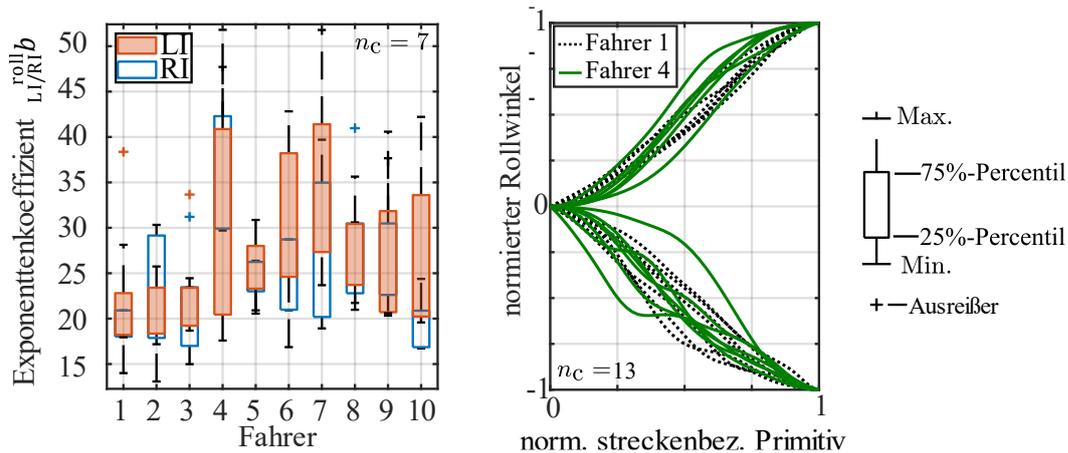


Abbildung 6-4 links: Exponentenkoeffizienten des dynamischen Übergangs, rechts: normierter Rollwinkel der Fahrer 1 und 4 nach Scherer und Basten¹³³ ◇

Abbildung 6-4 links zeigt die Exponentenkoeffizienten des Rollwinkelverlaufs des LI/RI-Primitives für 180°-Rechts- und Linkskurven aller zehn Fahrer im Vergleich. Rechts in der Abbildung sind die offsetbereinigten, normierten Rollwinkelverläufe über dem normierten streckenbezogenen Manöverprimitiv dargestellt. Zum Vergleich der Form der approximierten Verläufe werden alle Durchfahrten in der rechten Darstellung auf einen Wertebereich von -1 bis 1 normiert.

Am Beispiel von Fahrer 1 und 4 wird deutlich, dass die Höhe der Exponentenkoeffizienten (siehe Abbildung 6-4 links) mit der Form der Messdatenverläufe korreliert. So ist die Grundform der Rollwinkelverläufe von Fahrer 4 s-förmiger, was einem hohen Wert für $\text{roll}_{LI/RI} b$ entspricht, während der Rollwinkelaufbau bei Fahrer 1 linearer erfolgt und mit einem kleineren Wert für $\text{roll}_{LI/RI} b$ korreliert.

Hieraus geht hervor, dass mit dem gewählten Ansatz die Anforderung *Anf-Mod-Fah-5* der Abbildbarkeit unterschiedlicher Dynamik in der Einleitungsphase möglich ist.

Zu beachten ist, dass lediglich die Form der Verläufe verglichen wird, und Aussagen über Absolutwerte in dieser Betrachtung nicht möglich sind. Zudem ist zu berücksichtigen, dass auch die übrigen Koeffizienten der Wachstumsfunktion die Steigung beeinflussen (siehe Übersicht der Parametereinflüsse in Abbildung 5-14). Die Streuung der Exponenten gibt einen Eindruck über die Wiederholbarkeit mit der eine Person eine Kurveneinleitung immer wieder vergleichbar durchführt. So ist auch hier beim Vergleich der beispielhaft gewählten Fahrer mit der kleinsten Streuung (Fahrer 1) und der größten Streuung (Fahrer 4) ein Unterschied bei der Wiederholbarkeit der Durchführung der Kurveneinleitung im rechten Teil der Abbildung erkennbar.

¹³³ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 286.

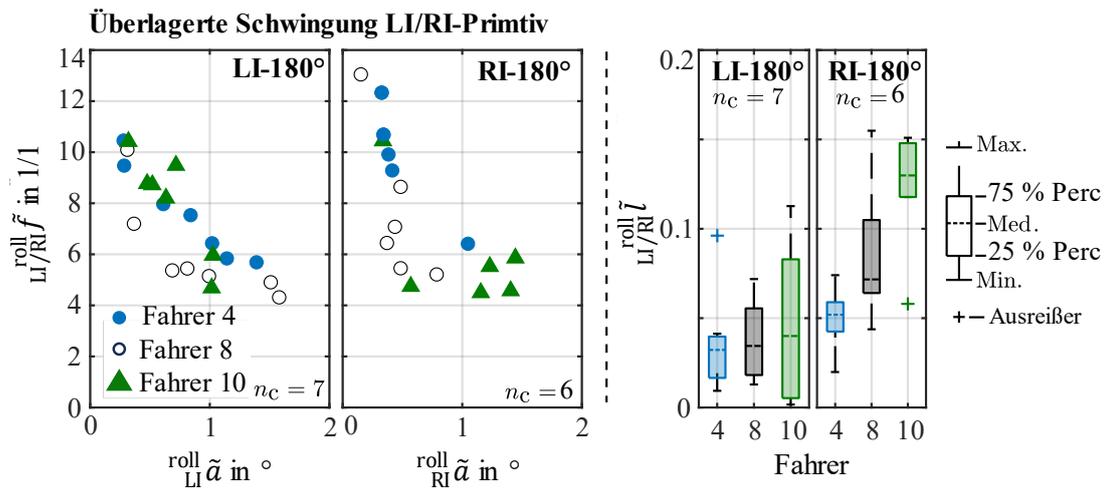
Abbildung 6-5 Überlagerte Schwingungen des Kurveneinleitungsprimitivs \diamond

Abbildung 6-5 zeigt die Koeffizienten der überlagerten Schwingungen des approximierten Rollwinkelverlaufs des Kurveneinleitungs-Primitives für die drei Fahrer 4, 8 und 10. Aufgetragen im linken Teil der Abbildung sind getrennt nach der Kurvenrichtung der LI-180-12 und RE-180-12 jeweils die Werte der Frequenzen über denen der Amplitude. Jeder Datenpunkt repräsentiert eine Kurvendurchfahrt.

Die Amplitudenkoeffizienten der überlagerten Schwingung der Kurveninitiierung der Rechtskurve $\text{roll}_{RI}^{\sim} \alpha$ von Fahrer 4 und 8 sind geringer im Vergleich zu Fahrer 10. Dies lässt darauf schließen, dass der Rollwinkelaufbau von niedrigeren Regelamplituden überlagert wird bzw. die Rechtskurven mit geringeren Korrekturen eingeleitet werden. Bei den Linkskurven weist Fahrer 10 geringere Amplituden im Vergleich zu den beiden anderen Fahrern auf. Die dazugehörigen Phasenverschiebungen $\text{roll}_{RI/LI}^{\sim} \tilde{l}$ in Abbildung 6-5 rechts dargestellt weisen ebenfalls fahrerspezifische Unterschiede auf. Auffällig ist, dass die Phasenverschiebungen der Rechtskurve höhere Werte aufweisen im Vergleich zur Linkskurve. Eine mögliche Ursache liegt in der Grundform der überlagerten Sinusschwingung. Falls die Abweichung der Wachstumsfunktion bei Linkskurven und Rechtskurven phasenverschoben auftreten, spiegelt sich dies auch in den Koeffizienten wider. Generell ist zu berücksichtigen, dass die Amplitudenhöhen der dargestellten Fahrer gering sind. Dies unterstreicht, dass die Grundform des Rollwinkels der Kurveninitiierung für die betrachteten Fahrer und Kurven bereits durch die Wachstumsfunktion realitätsnah abgebildet wird. Aus diesem Grund wird keine Hinzunahme weiterer Schwingungsterme für die dynamische Kurveneinleitungsphase empfohlen.

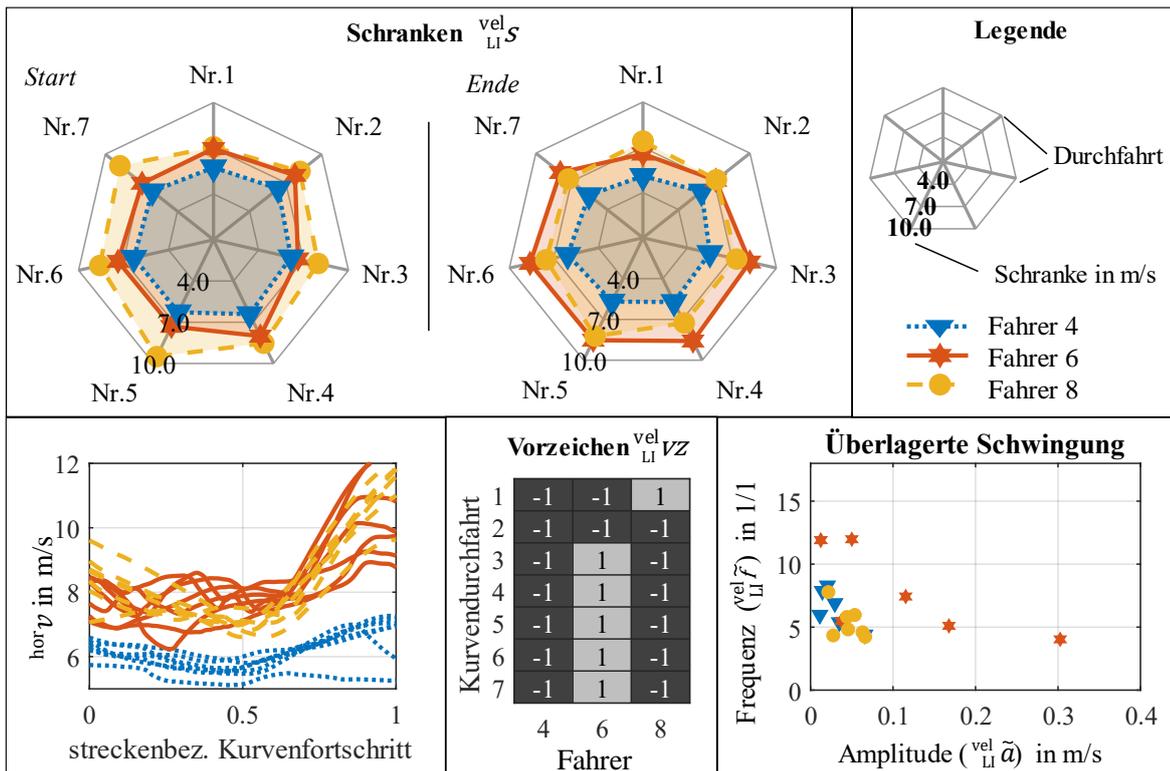


Abbildung 6-6 Fahrer 4, 6, 8 Geschwindigkeits-Schranken, Vorzeichen und überlagerte Schwingungen \diamond

Abbildung 6-6 veranschaulicht die Parameter des Kurveneinleitungs-Primitives der Geschwindigkeitssignale für die Fahrer 4, 6 und 8 bei allen sieben Durchfahrten der LI-180-12 Kurve (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \diamond siehe Kapitel 4.3.5). Die Schwellenwerte sind im oberen Teil der Abbildung dargestellt. Anhand der Schwellen wird deutlich, dass Fahrer 4 sowohl zu Beginn als auch am Ende der Kurveneinleitung die geringste Geschwindigkeit aufweist. Fahrer 8 zeigt zu Beginn die höchsten Startgeschwindigkeiten unter den dargestellten Fahrern; am Ende des Primitives ist keine eindeutige Unterscheidung zwischen Fahrer 6 und 8 möglich. Dies bedeutet wiederum, dass sowohl in den Messdaten der Geschwindigkeit, als auch den Koeffizienten ein deutlicher Unterschied zu Beginn der Kurve besteht, der im Verlauf der Kurveneinleitungsphase abgebaut wird.

Die Vorzeichen der Wachstumsfunktionen verdeutlichen, dass Fahrer 6 die Geschwindigkeit bei fünf von sieben Durchfahrten während der Kurveneinleitung der LI-180-12-Kurven erhöht. Dieses Verhalten ist bei keinem der übrigen zehn Fahrer in dieser Häufigkeit zu beobachten. Die niedrige Startgeschwindigkeit von Fahrer 6 und 8 bei der ersten Durchfahrt und den im weiteren Verlauf der Durchfahrten gesteigerten Werten weisen auf ein Herantasten an eine höhere Geschwindigkeit je Durchfahrt hin. Unten rechts in der Abbildung 6-6 sind die Koeffizienten der überlagerten Schwingung des Geschwindigkeitssignals für das LI-Primitiv dargestellt. Der Koeffizientenbereich von Fahrer 4 weist die geringste Streuung im Vergleich zu Fahrer 6 und 8 auf. Dies ist auf die niedrige Geschwindigkeit zurückzuführen. Die Höhe der Amplituden der überlagerten Schwingung sind im Verhältnis zur Fahrzeuggeschwindigkeit bei allen Fahrern gering ausgeprägt.

Aufgrund der Unterscheidbarkeit der beispielhaft aufgeführten drei Fahrer durch die Koeffizienten, sowie das jeweils unterschiedliche dynamische Verhalten in der Kurvenaufbau-phase gilt Anforderung *Anf-Mod-Fah-2* als für diese Phase erfüllt

6.1.1.2 Kurvenausleitung

Der folgende Abschnitt behandelt das dynamische Kurvenprimitiv der Kurvenausleitung. Es wird auf die Exponentenkoeffizienten, Schrankenwerte und die überlagerte Schwingung des Rollwinkels sowie der Geschwindigkeit der logistischen Wachstumsfunktion für die LI-180-12 und RE-180-12 Kurven eingegangen.

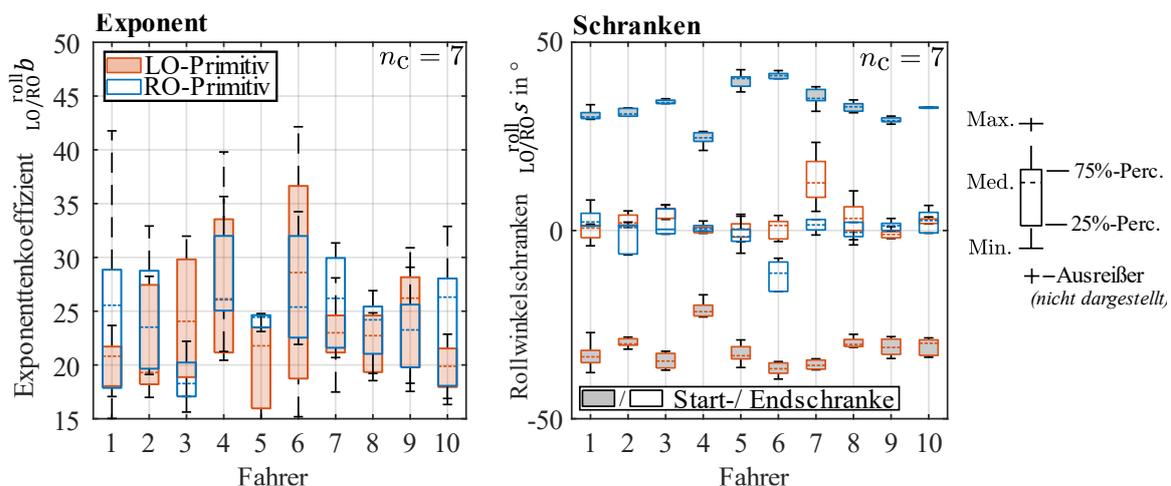


Abbildung 6-7 Exponentenkoeffizienten, Schranken der Kurvenausleitungsphase aller 10 Fahrer \diamond

Abbildung 6-7 links zeigt die Exponentenkoeffizienten, wobei fahrer- und richtungsspezifische Unterschiede erkennbar sind. Die farbliche Trennung nach Links- und Rechtskurven ermöglicht einen Vergleich zwischen der Dynamik des Verhaltens bei Ein- und Ausleitung, sowie in Abhängigkeit der Kurvenrichtung. Hierbei fällt auf, dass die Schwankung der Exponentenwerte über alle Fahrer hinweg ähnlicher als bei der Kurveneinleitung ist. *Anf-Mod-Fah-5* gilt damit auch für die Kurvenausleitung als bestätigt.

Die zugehörigen Schrankenwerte der Wachstumsfunktion für Links- und Rechtskurven sind in Abbildung 6-7 rechts dargestellt. Die Farbe der Boxen repräsentiert die Kurvenrichtung, während gefüllte Boxen für die jeweilige Startschranke und nicht ausgefüllte Boxen für die Endschranke der jeweiligen Koeffizienten stehen. Die Kurvenausleitung startet von einem größeren, absoluten Wert über den exponentiellen Verlauf auf einen kleineren Endschrankenwert, der theoretisch der Geradeausfahrt mit $\varphi = 0^\circ$ entspricht. Wie in der Abbildung rechts zu sehen, beendet nicht jeder der 10 Fahrer die Kurvenausleitung mit einer aufrechten Fahrt. Fahrer 6 und Fahrer 7 lassen durch ihre wiederholbaren Endschrankenwerte im Bereich der gegenteiligen Kurvenrichtung auf einen Gegenpendler bei der Ausleitung schließen. Ersichtlich ist dieses Verhalten in Abbildung 6-7 rechts zum Beispiel beim Vergleich der Werte von Fahrer 7. Die Ausleitung der Linkskurve beginnt bei einem Medianwert von $\varphi = -35^\circ$ (rot umrandet, grau gefüllt) und endet bei einem positiven

Rollwinkelmedianwert von $\varphi = +12^\circ$ (rot umrandet, weiß gefüllt), während die Ausleitung der Rechtskurven (blau umrandet, weiß gefüllt) bei $\varphi = +2^\circ$ endet.

Dieses Verhalten ist bei beiden Fahrern kurvenrichtungsabhängig, das heißt es tritt entweder nur bei Rechtskurven auf (Fahrer 6) oder bei Linkskurven (Fahrer 7). Somit wird Anforderung *Anf-Mod-Fah-3*, mit der Darstellbarkeit des wiederholten Verhaltens beim Phasenübergang als erreicht angesehen.

In Bezug auf den Startschrankenwert sind kurvenrichtungsunabhängige, fahrerspezifische Merkmale erkennbar. Insgesamt ist die Streuung der Startschrankenwerte, also der Wert der Koeffizienten bei Beginn der Kurvenausleitung, sehr gering. Die Streuung zu Beginn der Ausleitung von Linkskurven ist größer als die Streuung beim Ausleiten von Rechtskurven. In Bezug auf den in Kapitel 5.3 erarbeiteten Zusammenhang einer sehr geringen Streuung des örtlichen Bezugs des Beginns der Kurvenausleitung von Fahrer 3, 9 und 10 ist die geringe Streuung ebenso in den Koeffizienten der Startschranken zu finden.

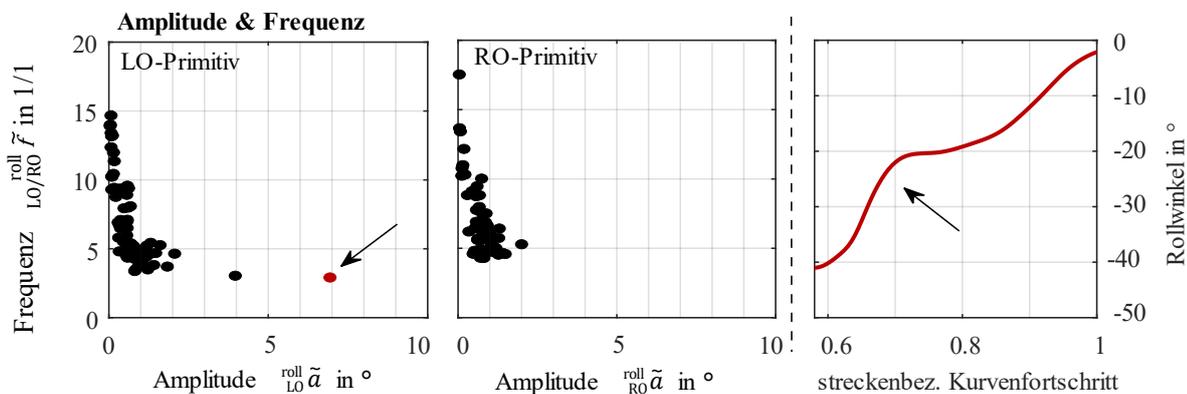


Abbildung 6-8: Überlagerte Schwingungen in der Kurvenausleitungsphase, Frequenz über Amplitude, Maximalfehler rechts \diamond

Abbildung 6-8 zeigt die Koeffizientenpaare der Frequenzen über der Amplitude für alle zehn Fahrer. Der Großteil ($> 97\%$) der logistischen Funktionen ist durch eine Schwingung mit niedriger Amplitude ($< 2^\circ$) überlagert. Dies belegt, dass der Rollwinkelverlauf während der Kurvenausleitung, wie bereits bei der Kurveneinleitung, durch die Wachstumsfunktion realitätsnah abgebildet wird. Ein Koeffizientenpaar sticht mit einer hohen Amplitude bei gleichzeitig niedriger Frequenz hervor (siehe Pfeil). Die Betrachtung des Messdatenverlaufs (siehe Abb. rechts) zeigt eine ausgeprägte Schwankung des Rollwinkelverlaufs während des LO-Primitives, welche durch das entsprechende Koeffizientenpaar abgebildet wird. Hierdurch werden die Anforderungen *Anf-Mod-Fah-4* und *Anf-Mod-Fah-1* als bestätigt angesehen.

Nachfolgend wird die Anwendung der Approximationsfunktionen auf die Geschwindigkeitsverläufe bei der Kurvenausleitungsphase diskutiert.

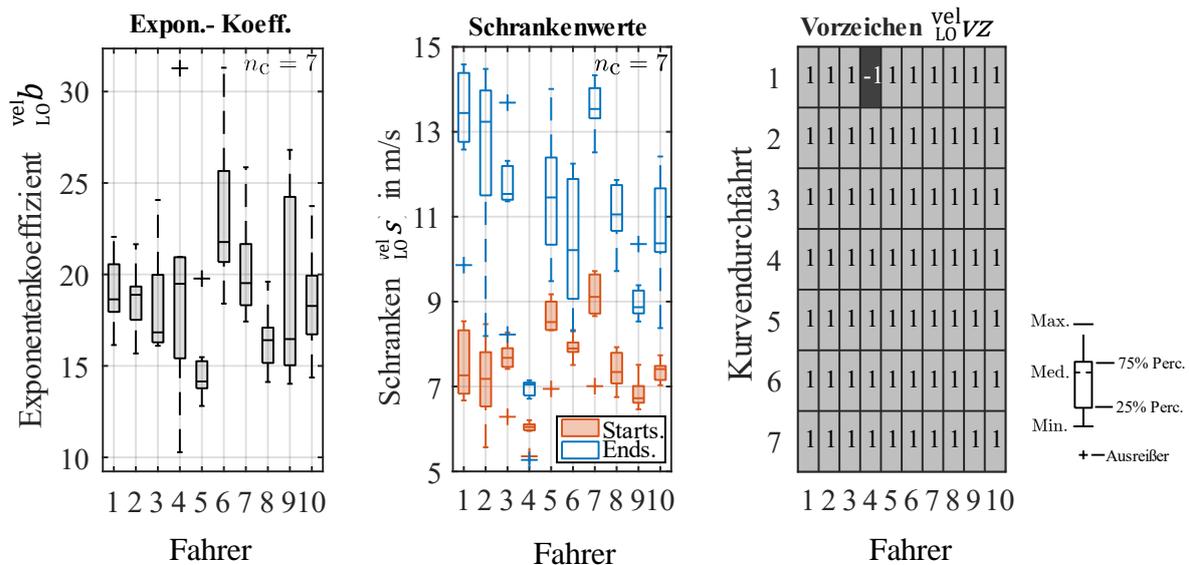
Abbildung 6-9 Wachstumsfunktionsparameter der Kurvenausleitung \diamond

Abbildung 6-9 bietet einen Überblick über die Parameter der Wachstumsfunktion des LO-Primitives. Links in der Abbildung sind die Exponentenkoeffizienten, in der Mitte die Schranken der Wachstumsfunktionen und rechts die Vorzeichen der Wachstumsfunktionen der Geschwindigkeitsverläufe dargestellt. Die Exponentenkoeffizienten weisen Unterschiede zwischen den Fahrern auf. Eine differenzierte Betrachtungsmöglichkeit der Exponentenkoeffizienten bietet neben den Absolutwerten auch die Streuung der Parameter, die sich in einer entsprechenden Bandbreite äußert. Auch die Schrankenwerte weisen Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrern auf, sowohl in Höhe als auch in der Differenz zwischen Start- und Endschrankenbereichen. Neben den Absolutwerten bietet auch die Größe des Streuungsbandes eine Möglichkeit, die Fahrer hinsichtlich der Reproduzierbarkeit zu beurteilen. Auffällig ist, dass die Bandbreiten der Startschranken des Geschwindigkeitssignals des LO-Primitives schmalere sind als die der Endschranken. Es sind zudem Unterschiede in den Bandbreiten zwischen den Fahrern erkennbar. So ist die Streuung der Start- und Endschrankenwerte von Fahrer 4 im Vergleich zu allen anderen neun Fahrern am geringsten. Bei Fahrer 6 hingegen unterscheiden sich die Bandbreiten von Start- und Endschranken stark. Dies deutet daraufhin, dass zu Beginn der Kurvenausleitung ein fahrertypischer Schwellwert in der Wahl der Geschwindigkeit besteht, wohingegen beim Beenden der Ausleitung größere Schwankungen ersichtlich sind.

Wie im rechten Teil der Abbildung dargestellt, ist im Zusammenhang mit dem Vorzeichen der Exponentialfunktion ein Erhöhen der Geschwindigkeit am Kurvenausgang als fahrerübergreifend typisches Verhalten zu interpretieren. Bis auf eine Ausnahme erhöhen alle Fahrer die Geschwindigkeit am Kurvenausgang. Bei den Koeffizienten der überlagerten Schwingung des Geschwindigkeitssignals des LO-Primitives zeigen sich große Überschneidungsbereiche der Parameter zwischen den Fahrern (hier nicht dargestellt). Es ist zu berücksichtigen, dass die Kurvenausleitung beim Geschwindigkeitssignal sichtbar davon beeinflusst wird, welche Manöver an die betrachtete Kurve anschließen. In der hier betrachteten

Kurve LI-180-12 und RE-180-12, die jeweils aus der Geradeausfahrt kommend nach der Kurve wieder in eine Geradeausfahrt übergehen, ist das Beschleunigen zum Kurvenausgang als typisch anzunehmen. Mit den hier gezeigten Zusammenhängen gilt Anforderung *Anf-Mod-Fah-2* der Abbildbarkeit dynamischer Geschwindigkeitsverläufe für die Kurvenausleitung als erreicht.

6.1.1.3 Kurvenüberleitung

Eine Besonderheit der instationären Kurvenfahrt stellt das Primitiv des Kurvenübergangs, oder der Kurvenüberleitung dar.

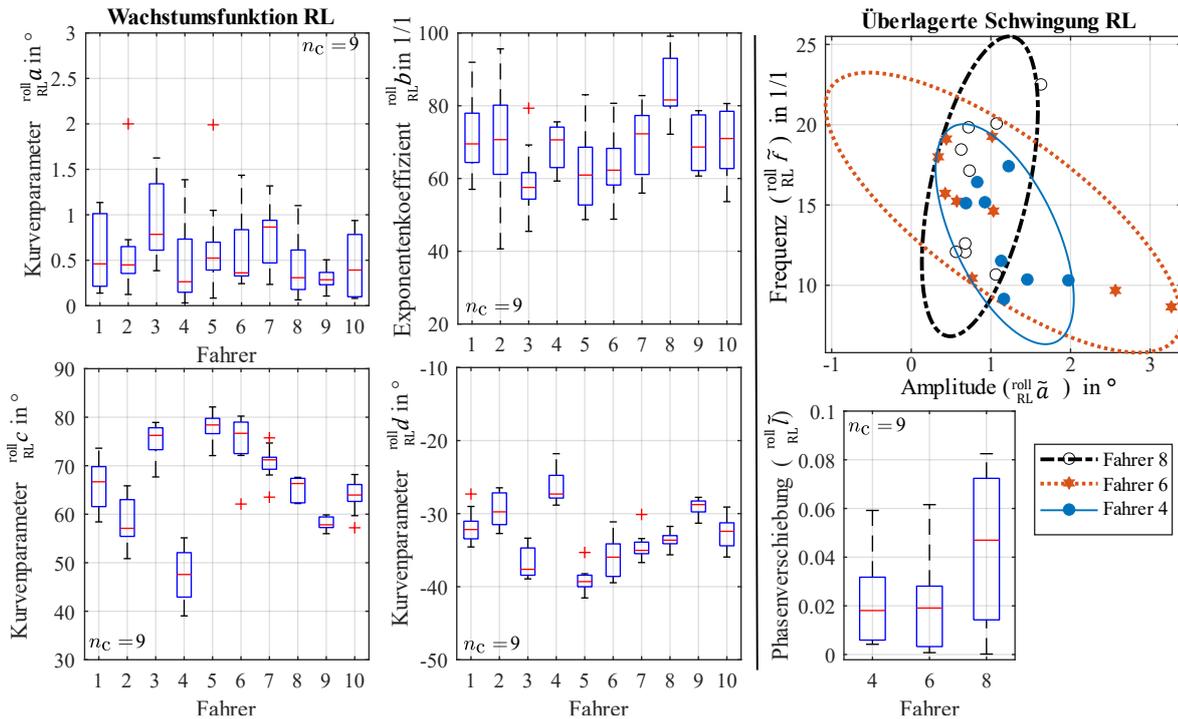


Abbildung 6-10 Koeffizienten der Kurvenüberleitung \diamond

Abbildung 6-10 links stellt alle Parameter a , b , c und d der exponentiellen Wachstumsfunktion dar. Dargestellt sind jeweils 9 Durchfahrten aller 10 Fahrer des Kurvenübergang-Elementes RE/LI-180/90-12/18 (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \diamond siehe Kapitel 4.3.5). Im rechten Teil der Abbildung sind beispielhaft von Fahrer 4, 6 und 8 die Koeffizienten der überlagerten Schwingung dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit sind jeweils die Vertrauensellipsen mit einem 90 % Vertrauensintervall mit eingezeichnet. Alle gezeigten Koeffizienten weisen fahrerspezifische Streuungen auf. Insbesondere die Werte der Parameter b sind ein Indiz für die hohe Dynamik des Übergangs. Ein hoher Wert des Parameters b entspricht einer hohen maximalen Steigung am Mittelpunkt der Exponentialfunktion. Wie aus Abbildung 6-10 (oben Mitte) ersichtlich leitet Fahrer 8 dementsprechend mit einer höheren Dynamik die Kurve über als Fahrer 4. Die Notwendigkeit hierfür resultiert aus dem in Kapitel 5 erarbeiteten typischen Verhalten von Fahrer 8, einem direkten Erreichen des Zielrollwinkels nach der Kurveneinleitungsphase.

Für b sind im Vergleich zur einfachen Kurveneinleitung oder Kurvenausleitung ungefähr doppelt so hohe Werte zu erwarten. Dies bestätigt sich beim Vergleich zum Beispiel der Kurveneinleitungsphase oder Kurvenausleitungsphase von Fahrer 1 mit der Kurvenüberleitung. Insgesamt sind die fahrerspezifischen Unterschiede bei der Schwankung des Wertes geringer. Die Parameter c und d sind bei der Kurvenüberleitung nicht so einfach in einen Start- oder Endschränkenwert umzurechnen. Aus diesem Grund sind sie in der Abbildung einzeln aufgeführt. Die Größe c gibt dabei eine Tendenz der Gesamtrollwinkeländerung an, wobei d ungefähr dem Endwert der Kurvenüberleitung entspricht. Hier sind deutliche fahrertypische Bereiche mit geringer Streuung identifizierbar. Hieraus geht hervor, dass auch für das Primitiv der Überleitung die Anforderungen *Anf-Mod-Fah-1* (Abbildbarkeit dynamischer Änderungen in allen Kurvensegmenten), *Anf-Mod-Fah-3* (Darstellbarkeit der Wiederholbarkeit bei Phasenübergängen) und *Anf-Mod-Fah-5* (Dynamik zwischen Start und Endpunkt eines Segmentes) aufgrund der Darstellbarkeit der Dynamik des Übergangs als erfüllt angesehen werden. Die Abbildbarkeit dynamischer Änderungen wird aus den fahrerspezifischen Koeffizienten für die überlagerten Schwingungen ersichtlich, Wiederholbarkeit bei Phasenübergängen wird durch die fahrerspezifischen Wertebereiche von b , c und d ersichtlich und die Dynamik zwischen Start und Endpunkt wird insbesondere durch b abgedeckt.

Die im rechten Teil der Abbildung dargestellten Einflüsse durch Korrekturen innerhalb der Phase sind wie hier beispielhaft dargestellt aufgrund der nur kleinen Amplituden bei hohen Frequenzen als nicht relevant einzustufen. Ebenso sind die Werte der Phasenverschiebung aufgrund der absoluten Größe als vernachlässigbar anzusehen. Auch bei der geringen Ausprägung wird die Anforderung für das Kurvenübergangsprimitiv *Anf-Mod-Fah-3* aufgrund der allgemeinen Darstellbarkeit der Korrekturen als erfüllt angesehen.

6.1.2 Stationäre Kurvenfahrt

Im nachfolgenden Abschnitt wird nach der Untersuchung der instationären Kurvenprimitive das stationäre, bzw. quasistationäre Kurvenprimitive der Rollwinkelhaltephase untersucht.

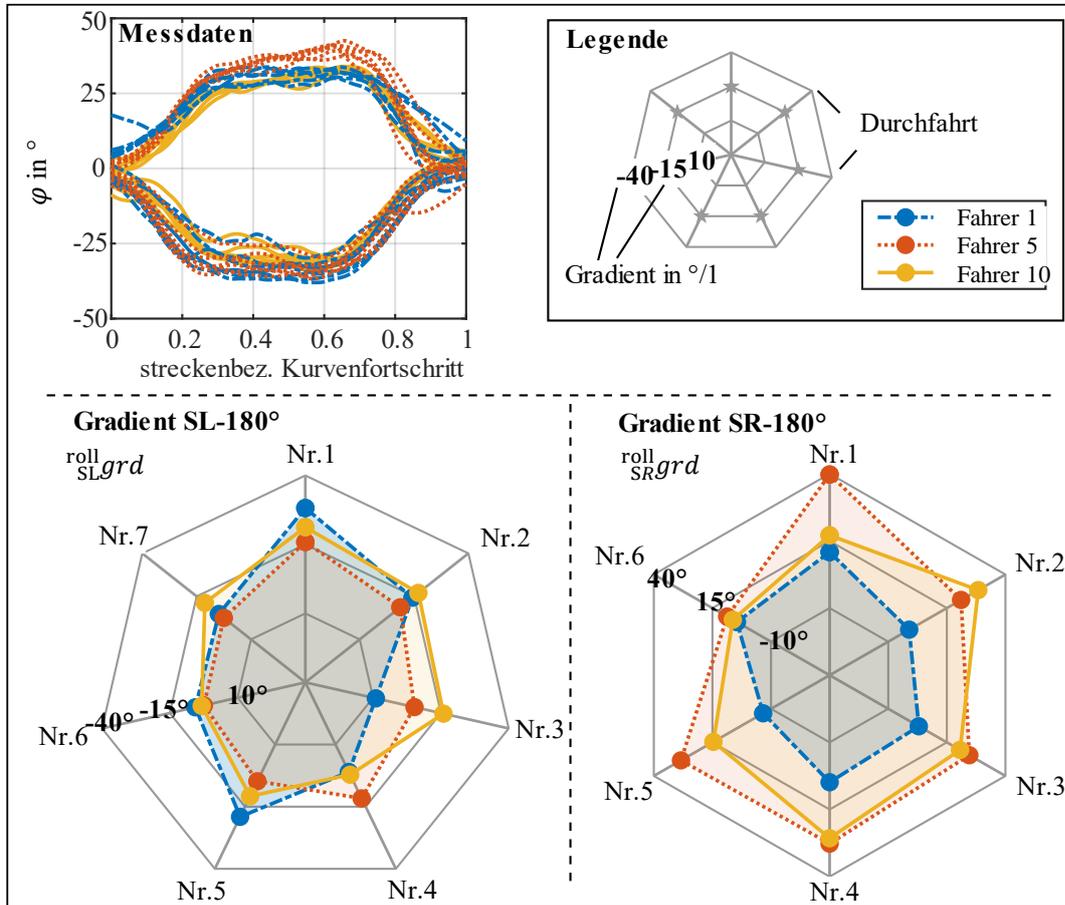


Abbildung 6-11 Gradient der Stationären RE-180-12 und LI-180-12 Kurven nach Scherer und Basten ¹³⁴ ◇

Abbildung 6-11 stellt beispielhaft die Verläufe der Messdaten oben links, sowie die Netzdiagramme der Rollwinkelgradienten des Stationär-Primitives ${}_{SL/SR}^{roll}g$ der drei Fahrer 1, 5 und 10 dar. Aufgeteilt in jeweils $n_c = 7$ Durchfahrten der LI-180-12- und $n_c = 6$ Durchfahrten der RE-180-12 Bewertungskurven (nähere Beschreibung des Messdatensatzes ◇ siehe Kapitel 4.3.5).

Durch die Netzdiagramme ist eine Darstellung der Entwicklung der Rollwinkelgradienten eines Fahrers mit zunehmender Durchfahrtsanzahl möglich. Gleichzeitig erlauben sie eine relative Einordnung im Vergleich zu den übrigen Fahrern. Durch die Wahl des jeweiligen Wertebereichs ist gleichzeitig eine zunehmende, gleichbleibende oder abnehmende Tendenz in der stationären Phase darstellbar. Die Diagramme zeigen, dass sich die Rollwinkelgradienten sowohl hinsichtlich der Fahrer als auch der Kurvenrichtung unterscheiden.

¹³⁴ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 288.

Insbesondere weisen die Rollwinkelgradienten der Rechtskurven im Vergleich zu den Linkskurven größere Unterschiede auf. Fahrer 1 zeigt dabei in allen Rechtskurven die geringsten Gradienten, während bei Fahrer 5 und 10 keine eindeutige Reihenfolge der Gradientenwerte festzustellen ist. Vor allem bei Fahrer 5 sind die Absolutwerte der Gradienten in den Linkskurven geringer im Vergleich zu den Rechtskurven. Eine Korrelation zwischen der Durchfahrtsnummer und der Gradientenhöhe ist nicht erkennbar. Der Vergleich der Gradienten mit den kurvenfortschrittsbezogenen Messdaten (Abbildung 6-11 oben links) bestätigt, dass die Gradienten den Trend der Rollwinkelentwicklung während der stationären Phase der Kurvenfahrt abbilden. Insbesondere das unterschiedliche Verhalten von Fahrer 5 bei Rechts- oder Links-Kurven wird in der Darstellung der Rollwinkelgradientenwerte sichtbar. Zeigt der Fahrer bei Linkskurven eher neutrales, gleichbleibendes Verhalten ist bei Rechtskurven wiederholbar eine Zunahme des Rollwinkels erkennbar.

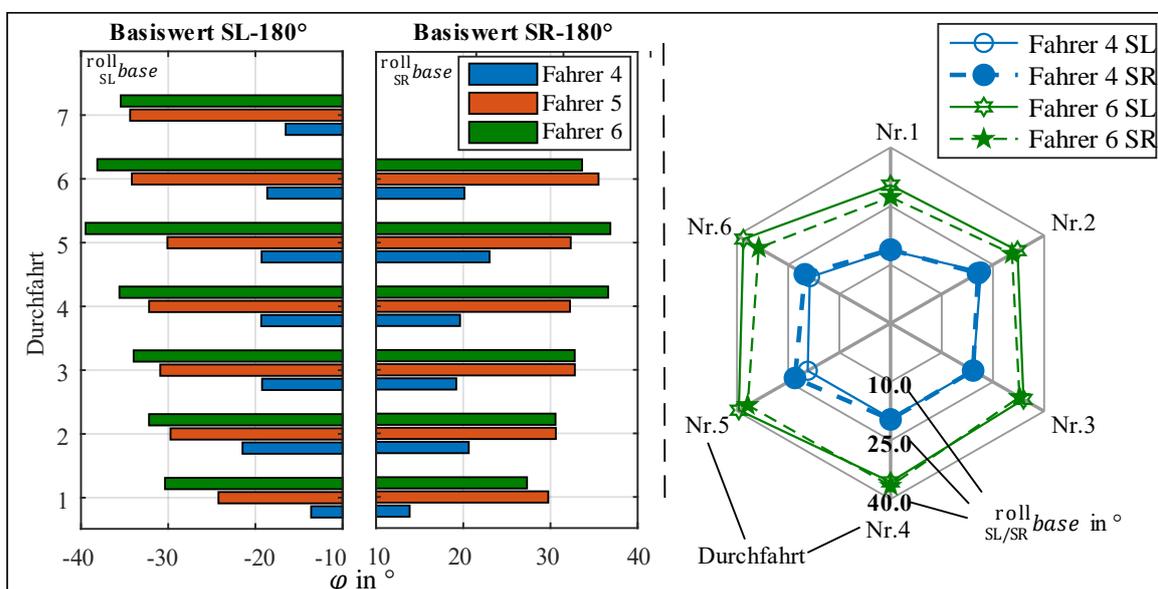


Abbildung 6-12 Basiswerte der linearen Regression in der stationären Kurvenfahrt nach Scherer und Basten¹³⁵ \diamond

Ein weiterer Parameter der stationären Phase ist der Basiswert der linearen Regression. Abbildung 6-12 zeigt die Basiswerte des SL/SR-Primitives des Rollwinkels $\text{roll}_{\text{SL/SR}}^{\text{base}}$ für die drei beispielhaft gewählten Fahrer 4, 5 und 6 in den 180°-Kurven (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \diamond siehe Kapitel 4.3.5).

Die Basiswerte weisen fahrerspezifische Unterschiede auf. Der Basisrollwinkel von Fahrer 4 liegt, unabhängig von der Kurvenrichtung, betragsmäßig unter den Werten der beiden anderen Fahrer. Abbildung 6-12 links zeigt, dass die Basiswerte von Fahrer 5 und 6 mit steigenden Durchfahrten einen zunehmenden Trend aufweisen. Die Netzplots der betragsmäßigen Basiswerte von Fahrer 4 und 6 sind rechts in Abbildung 6-12 dargestellt. Die Werte von Fahrer 6 liegen in den Linkskurven - bis auf eine Ausnahme - über denen der Rechtskurven.

¹³⁵ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 289.

Bei Fahrer 4 ist eine Korrelation zwischen den Basiswerten und der Kurvenrichtung erkennbar. Lediglich in der vorletzten Durchfahrt (Nr.5) unterscheiden sich die Basiswerte der Links- und Rechtskurve von Fahrer 4. Auffällig ist hier der sehr ähnliche Startwert der ersten Durchfahrt. Dieser ist quasi identisch je Kurvenrichtung. Wenn man die Art der Datenerfassung hinzunimmt, das wiederholte Durchfahren in einer Richtung, Wechsel und Durchfahren in die andere Richtung ist das Vortasten zu höheren Werten erkennbar.

Durch die vorgestellten Beobachtungen gilt Anforderung *Anf-Mod-Fah-1*, der Darstellbarkeit dynamischer Änderungen, sowie der unterschiedlichen Dynamik zwischen Start und Ende eines Segments *Anf-Mod-Fah-5* als erfüllt. Der Nachweis der Darstellbarkeit der Phasenübergänge *Anf-Mod-Fah-3* ist zudem erbracht.

Nachfolgend werden die Parameter $\tilde{\alpha}_1$, \tilde{f}_1 und \tilde{l}_1 der ersten überlagerten Schwingung der linearen Regression im Stationärteil des Rollwinkelverlaufs der 180°-Rechts- und Linkskurven untersucht.

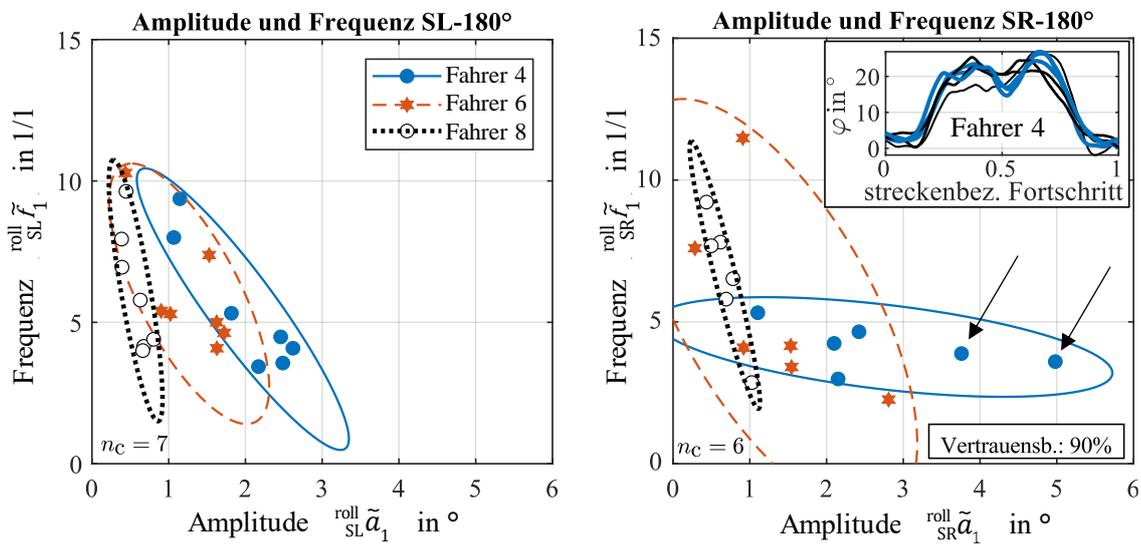


Abbildung 6-13 Überlagerte Schwingungen, Frequenz und Amplitude in der Stationärphase nach Scherer und Basten¹³⁶ ◇

Abbildung 6-13 zeigt die Koeffizientenpaare aus Frequenz \tilde{f}_1 und Amplitude $\tilde{\alpha}_1$ sowie dem zugehörigen 90 %-Vertrauensintervall für die Fahrer 4, 6 und 8. Die Amplituden- und Streuungsbereiche von Fahrer 4 weisen kurvenrichtungsabhängige Unterschiede auf. Weiterhin treten bei der Rechtskurve zwei auffällig hohe Amplituden auf (siehe Pfeile in Abbildung rechts). Diese sind auch in den Messdaten erkennbar (siehe Abbildung 6-13 oben rechts). Die Schwingungsparameter von Fahrer 6 weisen in der Rechtskurve im Vergleich zur Linkskurve einen größeren Streuungsbereich auf. Fahrer 8 besitzt von den dargestellten Fahrern die geringsten Amplituden, unabhängig von der Kurvenrichtung. Da dieser Fahrer die größte Fahrerfahrung aller Probanden aufweist, wird davon ausgegangen, dass sich die Erfahrung

¹³⁶ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 290.

in einer geringen Ausprägung der Korrekturamplituden bei gleichzeitig hohen Korrekturfrequenzen widerspiegelt. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Literatur.¹³⁷

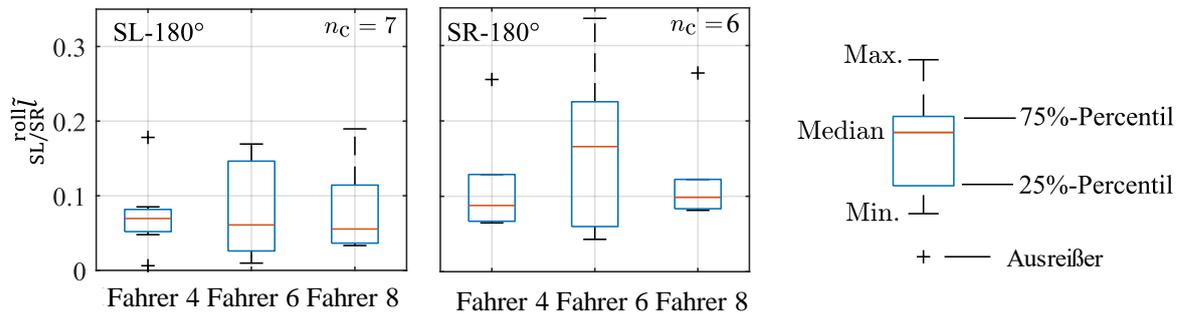


Abbildung 6-14 Phasenverschiebung während der stationären Kurvenfahrt, Streuung bei wiederholter Durchfahrt \diamond

Die Phasenverschiebungen der ersten überlagerten Schwingung des Rollwinkels $\text{roll}_{SL/SR} l_1$ sind in Abbildung 6-14 dargestellt. Die Medianwerte der Phasenverschiebungen weisen keine signifikanten Unterschiede unter den Fahrern auf. Die Streubreite der Phasenverschiebungen zeigt jedoch, dass die Phasenverschiebung der ersten überlagerten Schwingung des Rollwinkels des stationären Primitives bei Fahrer 6 im Vergleich zu den beiden anderen Fahrern sowohl bei den Links- als auch bei den Rechtskurven am stärksten variiert.

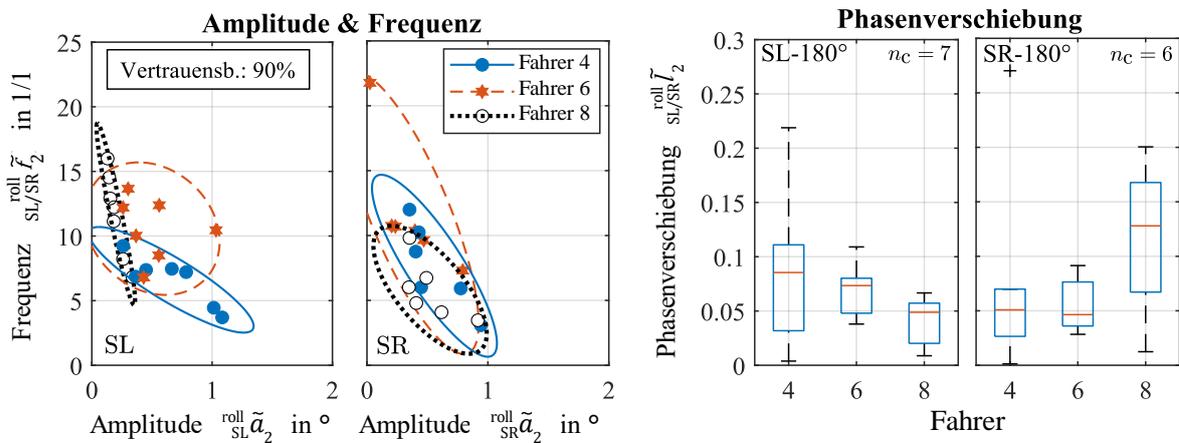


Abbildung 6-15 Überlagerte Schwingungen im Vergleich zur Phasenverschiebung der zweiten überlagerten Schwingung in der Stationärphase \diamond

Abbildung 6-15 stellt die approximierten Werte der Frequenzen \tilde{f}_2 über der Amplitude \tilde{a}_2 (links und Mitte) und der Phasenverschiebungen \tilde{l}_2 (rechts) der zweiten überlagerten Schwingung des approximierten Rollwinkelverlaufs im Stationär-Primitiv der LI-180-12 Kurvendurchfahrten (Abbildung 6-15 links) und der RE-180-12 Kurvendurchfahrten (Abbildung 6-15 Mitte) dar. Beispielhaft ausgewählt werden hier wieder Fahrer 4, 6 und 8 (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \diamond siehe Kapitel 4.3.5).

¹³⁷ Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020).

Analog zur ersten überlagerten Schwingung unterscheiden sich die Fahrer bezüglich der auftretenden Amplituden und Frequenzen. Fahrer 8 zeigt besonders in der Linkskurve niedrigere Amplituden im Vergleich zu den beiden anderen dargestellten Fahrern. Fahrer 6 und 8 besitzen in der Linkskurve tendenziell höhere Frequenzen im Vergleich zu Fahrer 4. Bei den Rechtskurven überschneiden sich die Bereiche von Fahrer 4 und 8 nahezu vollständig. Die auftretenden Schwingungen der Rechtskurve von Fahrer 6 variieren stärker als in der Linkskurve. Zusätzlich weist Fahrer 6 bei den Frequenz-Amplitudenkoeffizienten der Rechtskurven einen Ausreißer auf, welcher eine vernachlässigbar kleine Amplitude bei gleichzeitig hoher Frequenz besitzt. Die sichtbar größere Streuung der Frequenz- und Amplitudenwerte in der Rechtskurve von Fahrer 6 deuten, verglichen mit den Fahrern 4 und 8, auf eine geringere Reproduzierbarkeit der Kurvendurchfahrten hin. Die Phasenverschiebungen der zweiten überlagerten Schwingung (siehe Abbildung 6-15 rechts) unterscheiden sich teilweise fahrer- und richtungsspezifisch. Auffällig ist, dass Fahrer 4 bei den Links- und Rechtskurven einen ähnlichen Phasenverschiebungsbereich aufweist, während Fahrer 6 und 8 kurvenrichtungsabhängig abweichende Medianwerte und Streuungsbandbreiten besitzen.

Zusammenfassend lässt sich mit den hier vorgestellten Erkenntnissen nachweisen, dass die Anforderung der Erkennbarkeit von Korrekturamplituden *Anf-Mod-Fah-4* in der stationären Rollwinkelphase erfüllt ist.

Die Geschwindigkeitsverläufe des stationären Primitives weichen teils erheblich von der Grundform der Ansatzfunktionen der Rollwinkelverläufe ab. Daher gestaltet sich die Interpretation der Parameter der Fahrerkoefizienten des Geschwindigkeitssignals als aufwendiger bzw. abstrakter. Als Beispiel sei hier der Gradient der Geschwindigkeit während der stationären Phase genannt.

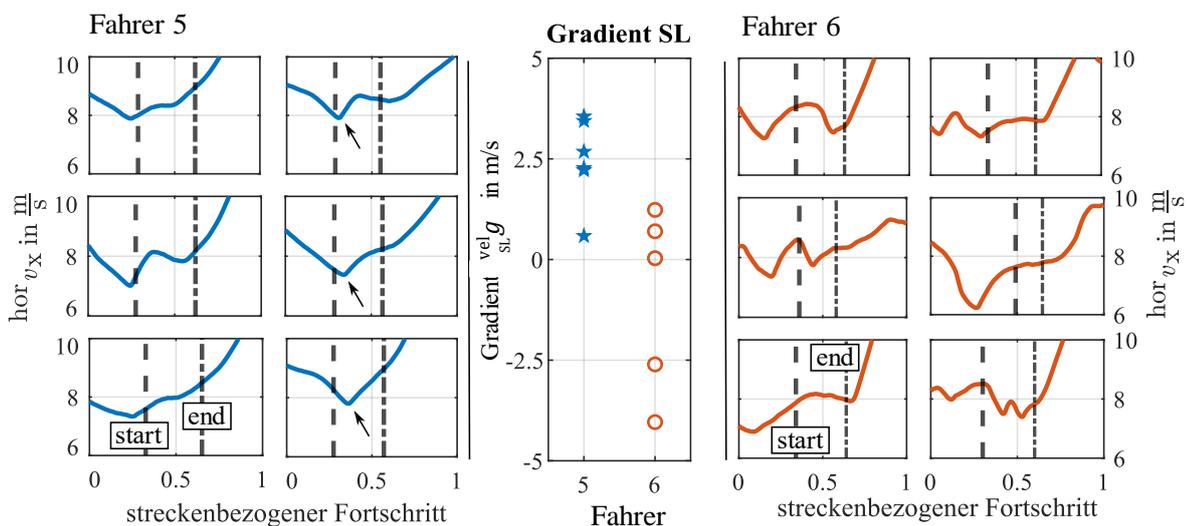


Abbildung 6-16 Geschwindigkeitsgradienten Fahrer 5 und 6 ◊

Abbildung 6-16 zeigt die Messdatenverläufe über dem Kurvenfortschritt für Fahrer 5 (Abbildung links) und 6 (Abbildung rechts) aller gemessenen Geschwindigkeitsverläufe der LI-180-12 Kurven, die hier beispielhaft für beide Kurvenrichtungen steht. Die jeweiligen Start-

und Endpunkte des stationären Primitives sind durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. In der Mitte der Abbildung sind die Geschwindigkeitsgradienten des SL-Primitives der beiden Fahrer dargestellt. Während Fahrer 5 einen klaren Trend zur Steigerung des Wertes der Geschwindigkeit bei allen Durchfahrten aufweist (alle Gradienten sind positiv), sind bei Fahrer 6 jeweils Geschwindigkeitszu- und -abnahmen über verschiedene Kurvendurchfahrten hinweg zu beobachten.

Bei Fahrer 5 ist zu beachten, dass bei der Hälfte der Durchfahrten zunächst eine Geschwindigkeitsreduktion auftritt (siehe Pfeile in Abbildung 6-16), bevor der gemessene Signalwert wieder steigt. Dies ist allein aus den Gradienten nicht ersichtlich, sondern wird erst durch die Berücksichtigung der überlagerten Schwingung deutlich. Somit ist besonders bei dem Geschwindigkeitssignal die Hinzunahme der Schwingungsterme für eine exaktere Approximation notwendig.

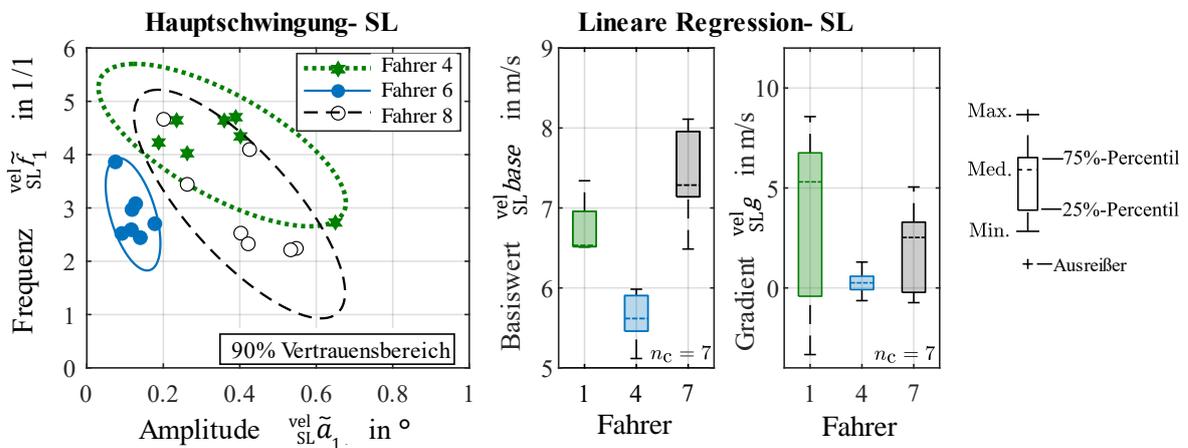


Abbildung 6-17 Frequenz und Amplitude der Hauptschwingungen und linearen Regression im Stationärteil \diamond

Analog zu den Rollwinkelapproximationen sind auch bei den Koeffizienten der überlagerten Schwingungen der Geschwindigkeitsverläufe des stationären Primitives Unterschiede zwischen den Fahrern feststellbar. Abbildung 6-17 zeigt die Frequenz- und Amplitudenkoeffizienten der ersten überlagerten Schwingung des approximierten Geschwindigkeitssignals am Beispiel der Fahrer 1, 4 und 7. In Abbildung 6-17 links ist die Frequenz über der Amplitude mit dem 90 %-Vertrauensintervall aufgetragen. Rechts im Bild sind die Basiswerte und Gradienten der linearen Regression der betrachteten Fahrer dargestellt.

Die Vertrauensbereiche der Schwingungskoeffizienten zwischen Fahrer 4 und 7 zeigen keine Überschneidung. Fahrer 1 und 7 weisen höhere Amplituden im Geschwindigkeitssignalverlauf auf verglichen mit Fahrer 4. Eine mögliche Ursache für die auftretenden Schwingungen liegt in den allgemeinen Geschwindigkeitsverläufen im betrachteten Stationär-Primitiv begründet. In Abbildung 6-17 rechts sind die Basis- und Gradientenkoeffizienten des Geschwindigkeitssignals des SL-Primitives dargestellt. Auffällig ist, dass die Basiswerte und Gradienten von Fahrer 4 deutlich geringer sind und ein kleineres Streuungsband aufweisen. Dies deutet auf eine niedrigere Dynamik und höhere Reproduzierbarkeit hin. Bezüglich des

Geschwindigkeitsgradienten ist zu beachten, dass ein betragsmäßig niedriger Gradient keineswegs ein Indiz für ein undynamisches Signal ist.

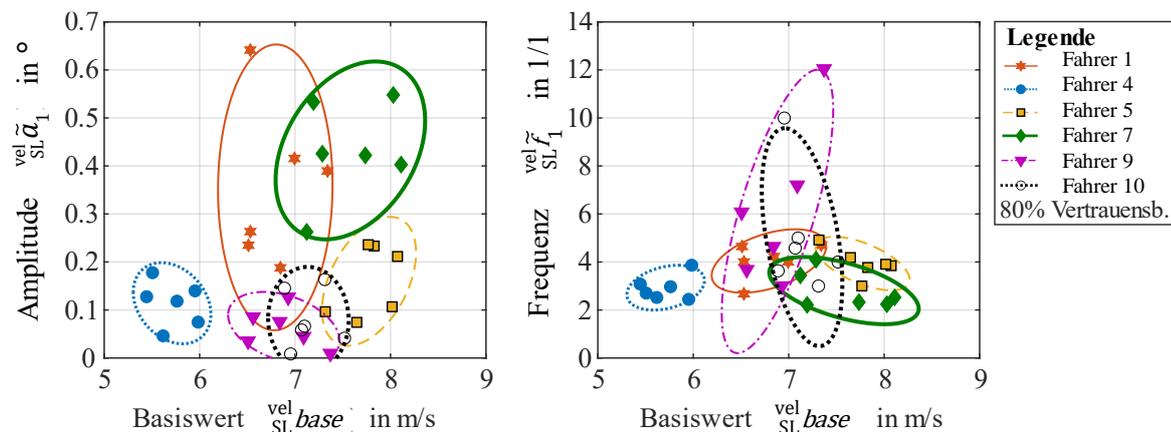


Abbildung 6-18 Amplitude der überlagerten Schwingung des Geschwindigkeitssignals über dem Basiswert der Regression, Stationärteil \diamond

Zur weiteren Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Höhe der auftretenden Amplitudenkoeffizienten der ersten überlagerten Schwingung und den Basis- und Startwerten der linearen Regression sind in Abbildung 6-18 links die Amplitudenkoeffizienten von sechs verschiedenen Fahrern über den jeweiligen Basiswerten der linearen Regression dargestellt. Rechts in Abbildung 6-18 sind die Frequenzen der gleichen Fahrer über dem Regressionsbasiswert abgebildet. Die erste Kurvendurchfahrt wird nicht berücksichtigt, da diese bei vielen Fahrern aufgrund des Versuchsaufbaus unterdurchschnittlich langsam gefahren wurde.

Links in Abbildung 6-18 ergeben die 80 % Vertrauensintervalle fahrerspezifische Bereiche. Die Größe der Ellipsen ist ein Maß für die Streuung und somit Reproduzierbarkeit der betrachteten Größen. Ein allgemeiner Trend zwischen Amplitudenhöhe und Basiswert der Regression des Geschwindigkeitssignals ist nicht feststellbar. Gleiches gilt für die Frequenzen. Dennoch bietet die Darstellungsform der Amplitudenhöhen über den Basiswerten die Möglichkeit, fahrerindividuelle Bereiche und Parametergebiete voneinander abzugrenzen bzw. eine mögliche Fahrereinteilung vorzunehmen.

Zusammenfassend lässt sich auch für den stationären Kurvenbereich die Anforderung *Anf-Mod-Fah-2* als erfüllt ansehen, auch wenn die Parametrierung der Geschwindigkeitsverläufe aufgrund der deutlich dynamischeren Veränderbarkeit zum Beispiel durch einen starken Eingriff in die Bremse während der stationären Kurvenfahrt zu großen Abweichungen von einem linearen, schwingungsüberlagerten Signal führen kann. Hier ist für weitere Forschungsarbeit ein relevanter zu untersuchender Bereich offen.

6.1.3 Übertragbarkeit in Straßenverkehr

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel auf den Straßenverkehr wird nachfolgend die Durchfahrt der RE-90-30 Kurve betrachtet. Der

Kurvenverlauf ist mit einer stetigen Krümmungsänderung im Vergleich zu den konzipierten restlichen Kurven der Datengrundlage und konstantem Radius deutlich realitätsnäher zu betrachten (die detaillierte Beschreibung der verschiedenen Kurven befindet sich in Kapitel 4.3.2). Die RE-90-30-Rechtskurve wird im Vergleich zu den 180°-Kurven bei höheren Geschwindigkeiten durchfahren. Zusätzlich zu den normalen Kurvendurchfahrten wird in einer speziellen Fahrsituation ein Anomalieereignis in die Kurvendurchfahrt integriert, bei dem der Fahrer gezwungen wird, auf ein unerwartetes Ereignis zu reagieren (siehe Kapitel 4.3.3). Um die Sichtbarkeit der Anomalie in den fahrerspezifischen Parametern zu erhöhen, ist in allen nachfolgenden Darstellungen die Durchfahrt mit Anomalieereignis durch eine Sternform der Markierungen visualisiert.

6.1.3.1 Instationäre Kurveneinleitung – Übertragbarkeit in Straßenverkehr

Zunächst wird das Kurvenprimitiv der dynamischen Kurveneinleitung aus der Geradeausfahrt kommend betrachtet.

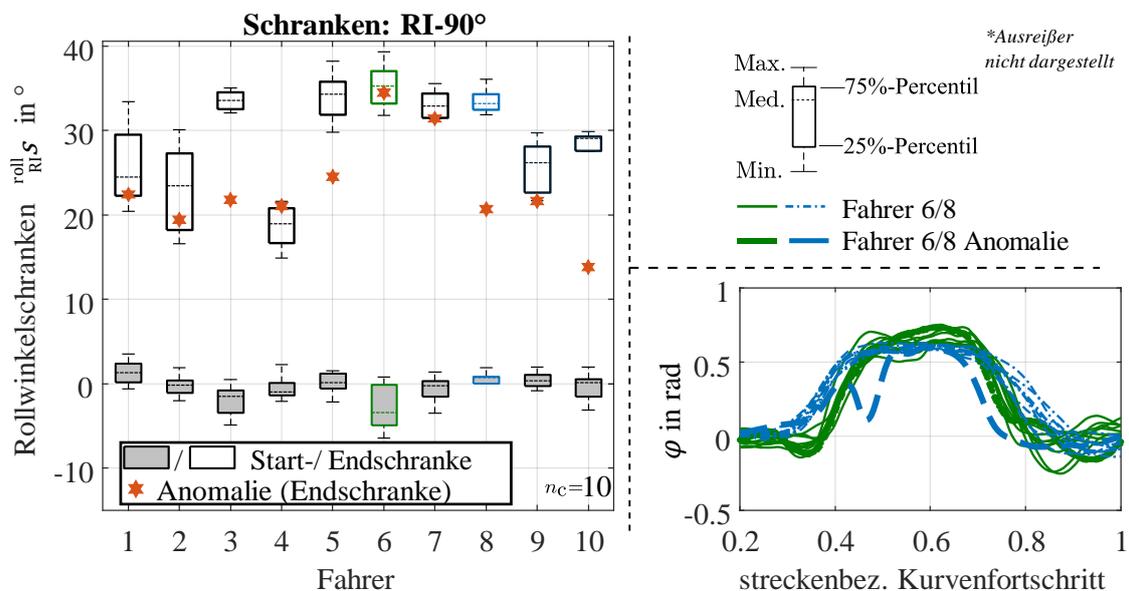


Abbildung 6-19 Schranken der Kurveneinleitung, Übertragbarkeit Straßenverkehr und Anomalie ◊

Die Schranken der kurveneinleitenden logistischen Wachstumsfunktion des Rollwinkelsignals der RE-90-30-Kurve sind für alle zehn Fahrer in Abbildung 6-19 links dargestellt. Es zeigen sich Unterschiede sowohl zwischen den Fahrern als auch zwischen normalen Durchfahrten und dem Anomalieereignis. Während die Startschranken bei allen Fahrern ähnlich sind (was bei einem Beginn der Kurveneinleitung aus der Geradeausfahrt kommend zu erwarten ist), variieren die Endwerte deutlich. Die Endschranken bei dem Anomalieereignis fallen bei neun von zehn Fahrern niedriger aus als der Medianwert der normalen Kurvendurchfahrten. Die Diskrepanz zwischen dem oberen Schrankenwert bei Normalfahrten und dem Anomalieereignis variiert fahrerspezifisch. In der Abbildung 6-19 rechts unten sind die Rollwinkelverläufe von Fahrer 6 und 8 über dem Kurvenfortschritt dargestellt. Diese

verdeutlichen die unterschiedlichen Werte der oberen Schranke in normalen Durchfahrten und Anomalieereignis. Bei den übrigen Rollwinkelkoeffizienten des RI-Primitives zeigen sich Unterschiede zwischen den Fahrern sowohl bei der überlagerten Schwingung als auch bei den Exponentenkoeffizienten. Die hier dargestellten Zusammenhänge decken sich mit den Erkenntnissen der Untersuchung der Schwellenwerte in Kapitel 5.2. Insbesondere der sehr späte Beginn der Kurveneinleitung von Fahrer 6 führt zu einer Einsicht in die gesamte Kurve schon zu Beginn der Einleitung, was bei allen anderen Fahrern nicht der Fall ist. Somit ist der Überraschungseffekt des Anomalieereignisses bei diesem Fahrer möglicherweise nicht gegeben. Ein Beweis dieser Behauptung ist mit der zugrundeliegenden Datenbasis nicht möglich.

Bei der Betrachtung der approximierten Werte des Geschwindigkeitssignals fällt das insgesamt höhere Niveau der Werte im Vergleich zu allen anderen untersuchten Kurven auf.

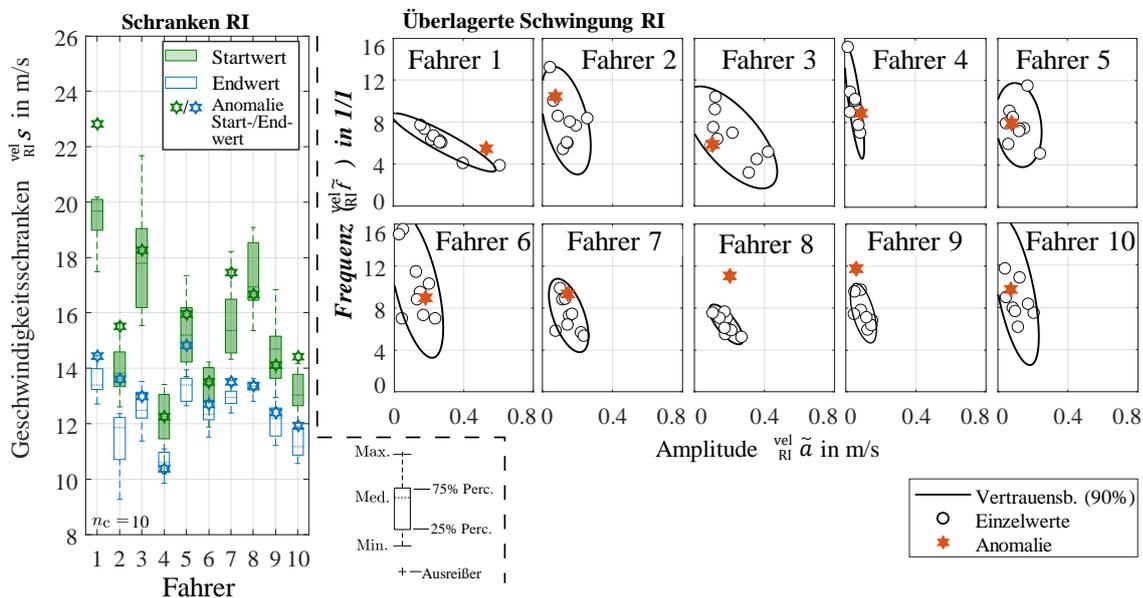


Abbildung 6-20 Schranken, überlagerte Schwingungen Geschwindigkeit, Übertragbarkeit in Straßenverkehr \diamond

Abbildung 6-20 links gibt einen Überblick über die Start- und Endschranken der Wachstumsfunktion des Geschwindigkeitssignals während der Kurveneinleitung. Die Schranken visualisieren das unterschiedliche Anbremsen einzelner Fahrer. Die Startgeschwindigkeiten der Fahrer unterscheiden sich um bis zu 30 % voneinander. Fahrer 1 sticht dabei mit den durchschnittlich höchsten Startgeschwindigkeiten hervor, während Fahrer 4, 6 und 10 die geringsten Startschrankenwerte aufweisen. Die Betrachtung der Endschranken ergibt, dass eine Unterscheidung der Fahrer sowohl hinsichtlich der Höhe als auch der Bandbreiten möglich ist. Fahrer 8 zeigt beispielsweise eine Schwankungsbreite der Endgeschwindigkeitsschranke des Kurveneinleitungsprimitives von $<1,4$ m/s, während bei Fahrer 2 die Schwankungsbreite mehr als doppelt so hoch ausfällt. Beim Vergleich der Start- und Endschranken der Geschwindigkeitssignale eines Fahrers ergeben sich unterschiedlich starke Verzögerungen während der Kurveneinleitung. Die geringsten Unterschiede bzw. sogar

Überschneidungen der Start- und Endschranksbereiche weist Fahrer 6 auf. Im Gegensatz zu den Durchfahrten der LI-180-12 Kurve ist bei keiner der Durchfahrten der RE-90-30 von Fahrer 6 ein ausgeprägtes Beschleunigungsverhalten zu beobachten (alle Vorzeichenkoeffizienten der Wachstumsfunktion sind negativ). Die Betrachtung der Schrankenwerte des Anomalieereignis (Sterne in Abbildung 6-20 links) verdeutlicht, dass die Endgeschwindigkeiten der Kurveneinleitung beim Anomalieereignis tendenziell höher ausfallen als bei den Standardmanövern. Eine mögliche Ursache besteht darin, dass die Fahrer weniger stark bei der Kurveneinleitung verzögern, um auf das unbekannte Ereignis in Form von Rollwinkeländerungen zu reagieren. Weiterhin ist zu beachten, dass einige Fahrer eine höhere Startgeschwindigkeit bei den Anomalieereignissen aufweisen, was auch eine höhere Endgeschwindigkeit im Einleitungsprimitiv erklärt. In der Abbildung 6-20 rechts sind die Frequenz- und Amplitudenkoeffizienten der überlagerten Schwingungen des RI-Primitives aufgetragen. Analog zu den überlagerten Schwingungen des Rollwinkels ergeben sich für die Geschwindigkeitssignale unterschiedlich große, fahrerspezifische Bereiche. Die Anomalieereignisse rufen in der überlagerten Schwingung allerdings keine außergewöhnlichen Schwingungskoeffizienten hervor. Lediglich bei Fahrer 8 weicht die Frequenz der überlagerten Schwingung des Geschwindigkeitssignals beim Anomalieereignis signifikant von den Frequenzen der normalen Durchfahrten ab.

6.1.3.2 Stationäre Kurvenfahrt - Übertragbarkeit in Straßenverkehr

Nach der Kurveneinleitung wird die hierauf folgende Phase der stationären Kurvenfahrt betrachtet.

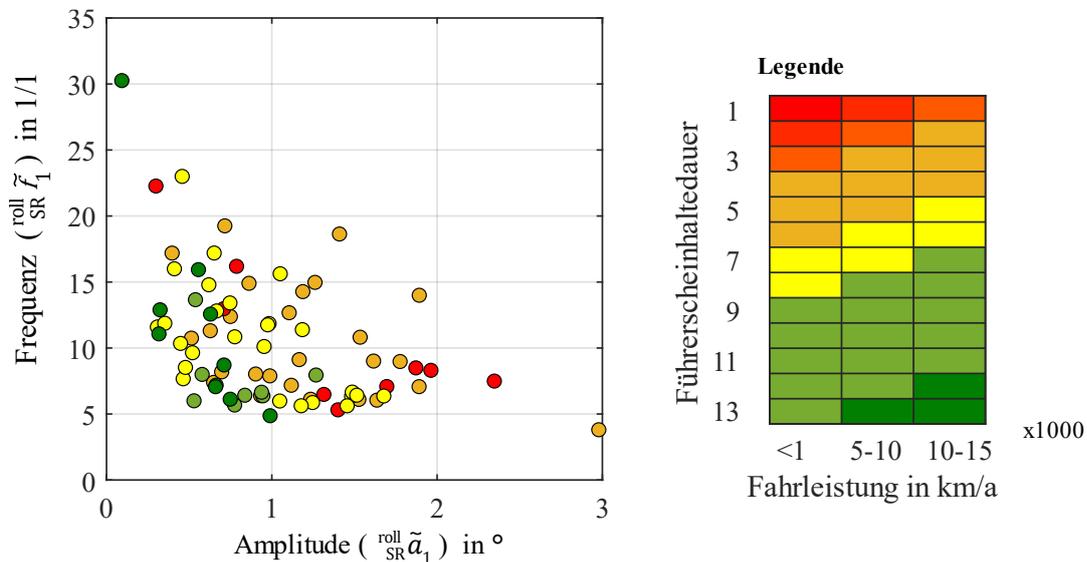


Abbildung 6-21 Zusammenhang zwischen den Frequenzen und Amplituden in der stationären Kurvenfahrt mit der Führerscheinhaltedauer und der jährlichen km-Fahrleistung \diamond

Abbildung 6-21 zeigt die Frequenzen und Amplituden der ersten überlagerten Schwingung des Stationär-Primitives der approximierten Rollwinkelverläufe ohne Anomalieereignis. Die Wertepaare jedes Fahrers wurden entsprechend der vorhandenen Fahrerfahrung (siehe Abbildung rechts) eingefärbt. Die Fahrerfahrung setzt sich aus der jährlichen Fahrleistung und der Gesamtdauer des Motorradführerscheins (Haltedauer) zusammen.

Es zeigt sich, dass Fahrer mit hoher Fahrerfahrung (grün) geringere Amplituden im Rollwinkelsignal aufweisen im Vergleich zu Fahrern mit geringeren jährlichen Fahrleistungen und kürzerem Führerscheinbesitz (orange und rot). Weiterhin steigen die Frequenzen mit zunehmender Erfahrung des Fahrers an. Insgesamt ist festzustellen, dass geübtere Fahrer tendenziell geringere Korrekturamplituden bei gleichzeitig höherer Frequenz aufweisen.

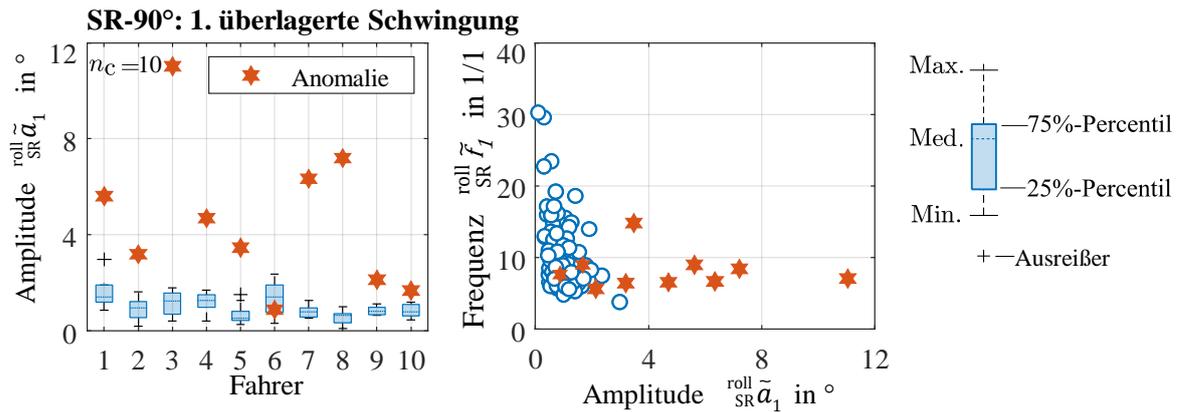


Abbildung 6-22 Überlagerte Schwingungen, Übertragbarkeit in Straßenverkehr, Frequenz und Amplitude, Anomalie \diamond

Abbildung 6-22 zeigt die Koeffizienten der ersten überlagerten Schwingung des approximierten Rollwinkelverlaufs im stationären Primitiv der RE-90-30 Kurve. Neben den Koeffizienten der normalen Kurvendurchfahrten sind auch die Koeffizienten der Anomalieereignisse dargestellt.

Bis auf eine Ausnahme (Fahrer 6) weichen die Amplituden des Anomalieereignis aller Fahrer signifikant von den Standardparametern ab. Bei den normalen Manövern ist, analog zu den 180°-Kurven, eine Unterscheidung der Fahrer anhand der Parameter möglich. Im Frequenz-Amplituden-Diagramm (siehe Abbildung 6-22 rechts) wird deutlich, dass die Frequenzkoeffizienten der Anomalieereignisse nicht signifikant von den Koeffizienten der Normalmanöver abweichen. Eine mögliche Ursache liegt in den hohen Rollwinkelamplituden, sodass die Frequenzen durch die Trägheitskräfte begrenzt werden. Die Untersuchung der Phasenverschiebungskoeffizienten der ersten überlagerten Schwingung zeigt, dass die Anomalieereignisse keine außergewöhnlichen Werte im Vergleich zu den Standardmanövern aufweisen. Bei der zweiten überlagerten Schwingung sind bei acht von zehn Fahrern signifikante Unterschiede in den Rollwinkelamplituden zwischen normaler und pseudokritischer Kurvendurchfahrt feststellbar. Alle Parameter der zweiten überlagerten Schwingung des Rollwinkels im stationären-Primitiv der RE-90-30 Kurve finden sich im Anhang A.5.1 wieder.

Bei der Bewertung der Rollwinkelgradienten sind die Anomalieereignisse eindeutig identifizierbar. Die Parameter der linearen Regression sind in Abbildung 6-23 dargestellt. Die Gradienten des Rollwinkels (siehe Abbildung 6-23 links) des stationären Primitives weichen im pseudokritischen Fall bei neun von zehn Fahrern signifikant und bei sieben von zehn Fahrern um mehr als das Doppelte vom Median der Standardmanöver ab.

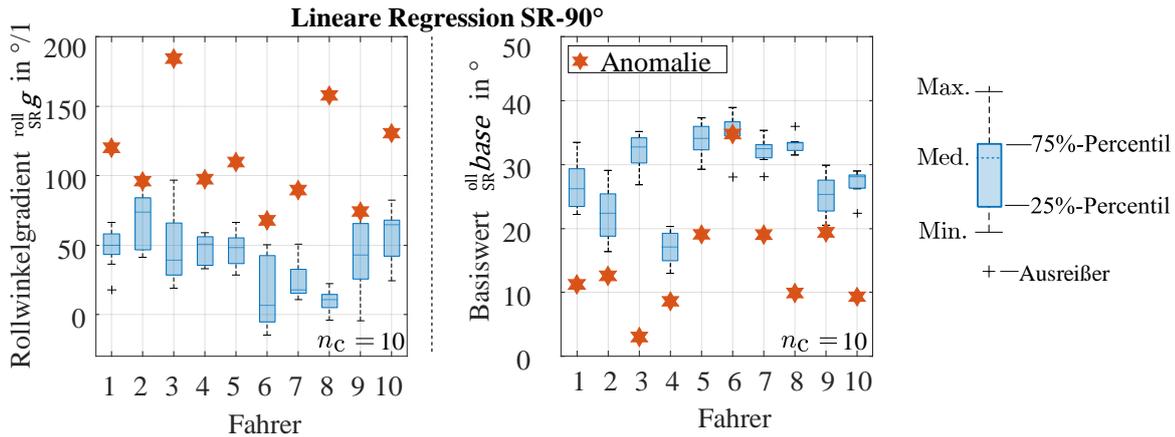


Abbildung 6-23 Rollwinkelgradient und Basiswert der linearen Regression, Übertragbarkeit in Straßenverkehr und Anomalie \diamond

Rechts in Abbildung 6-23 sind die Basiswerte der linearen Regression der stationären Phase der Rollwinkelverläufe dargestellt. Neun von zehn Fahrern weisen beim Anomalieereignis einen niedrigeren Basiswert auf. Dies deutet darauf hin, dass die Kurveneinleitung der RE-90-30-Rechtskurve unterbrochen wird, um die Trajektorie des Fahrzeugs an die neuen Begebenheiten anzupassen. Lediglich Fahrer 6, der bereits bei den Korrekturamplituden des SR-Primitives keinen Unterschied zwischen normal- und pseudokritischem Manöver erkennen lässt (siehe Abbildung 6-23), zeigt auch bei dem Basiswert keinen signifikanten Unterschied. Somit ist in beiden bisher betrachteten Phasen in den Koeffizienten der Einfluss durch das Anomalieereignis ersichtlich.

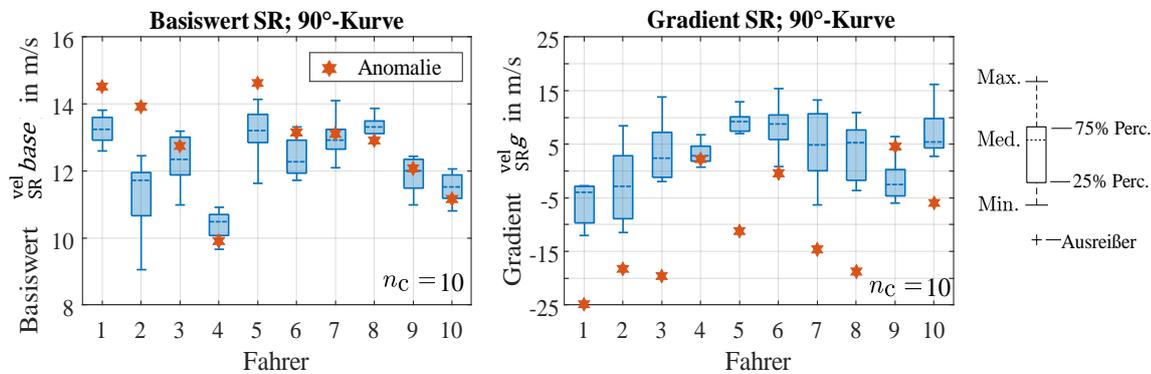


Abbildung 6-24 Geschwindigkeits-Basiswert und -Gradient der linearen Regression, Übertragbarkeit in Straßenverkehr und Anomalie \diamond

Die Darstellung in Abbildung 6-24 veranschaulicht die Basiswerte (links) und Gradienten (rechts) des Geschwindigkeitssignals für alle Fahrer im Stationär-Primitiv während der RE-90-30-Kurve (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \diamond siehe Kapitel 4.3.5).

Die Basiswerte der linearen Regression während des Anomalieereignisses weichen lediglich bei drei von zehn Fahrern erkennbar von den Basiswerten der normalen Manöver ab. Auf der anderen Seite ermöglicht der Gradient der linearen Regression (siehe Abbildung 6-24 rechts) bei acht von zehn Fahrern eine eindeutige Identifizierung der kritischen Manöver. Es fällt dabei auf, dass bei den betroffenen Fahrern diese Gradienten im Vergleich zu den

Standarddurchfahrten alle niedriger sind. Dies weist auf eine stärkere Verringerung der Geschwindigkeit während des Anomalieereignisses hin. Die Analyse der Koeffizienten der ersten und zweiten überlagerten Schwingungen zeigt keine relevanten Unterschiede zwischen den Parametern der normalen Durchfahrt und des Anomalieereignisses für die Geschwindigkeitsverläufe im SR-Primitiv. Insgesamt spiegeln sich die Anomalieereignisse daher nicht so stark in den Geschwindigkeitskoeffizienten im Vergleich zu den Rollwinkelkoeffizienten wider. Die Parameter der Standardmanöver sind jedoch fahrerindividuell unterscheidbar. Folglich ist die Fahrerspezifität in den Geschwindigkeitskoeffizienten im betrachteten SR-Primitiv vorhanden, wobei die Unterscheidung zwischen normaler Durchfahrt und Anomalieereignis nur durch einen Geschwindigkeitskoeffizienten (Gradient) erfolgt.

6.1.3.3 Kurvenausleitung – Übertragbarkeit in Straßenverkehr

Nachfolgend wird das letzte Primitiv für die Bewertung einer Übertragbarkeit in den Straßenverkehr, die Kurvenausleitung untersucht.

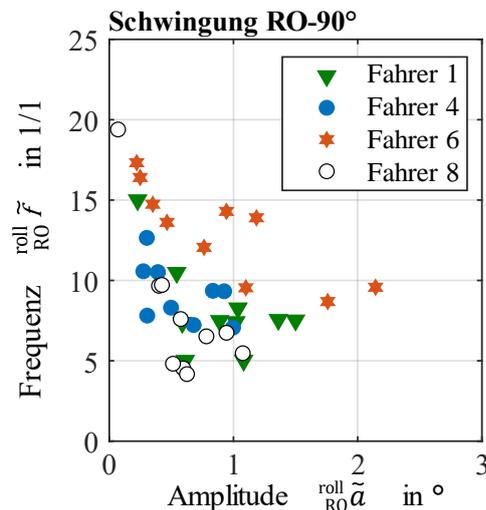


Abbildung 6-25 Kurvenausleitung, Rollwinkel Frequenz und Amplitude \diamond

In Abbildung 6-25 sind die Koeffizienten der überlagerten Amplituden und Frequenzen der Wachstumsfunktionen des Rollwinkelverlaufs während der Kurvenausleitung der RE-90-30-Kurve dargestellt.

Die Koeffizienten der überlagerten Schwingung des Kurvenausleitungs-Primitives weisen individuelle Unterschiede in den Rollwinkelverläufen der Fahrer auf. Die Amplituden der überlagerten Rollwinkelschwingungen während der Kurvenausleitung in der RE-90-30-Kurve sind, ähnlich wie bei den Kurvenausleitungen der 180°-Kurven, gering. Dies lässt auf einen gleichmäßigen Abbau des Rollwinkels am Ende der Rechtskurve schließen.

Die Schwingungskoeffizienten ermöglichen eine Unterscheidung zwischen den Fahrern. Wie bereits bei den zuvor untersuchten Kurven weist Fahrer 8 niedrige Rollwinkelamplituden auf, während die Amplituden von Fahrer 6 durchfahrtsabhängig variieren und größer sind. Auch die Exponentenkoeffizienten der Wachstumsfunktion des Rollwinkelverlaufs

weisen fahrerspezifische Unterschiede auf. Die entsprechende Abbildung befindet sich im Anhang A.5.2.

Die Geschwindigkeitskoeffizienten während der Kurvenausleitung der RE-90-30-Rechtskurve unterscheiden sich je nach Fahrer im RO-Primitiv.

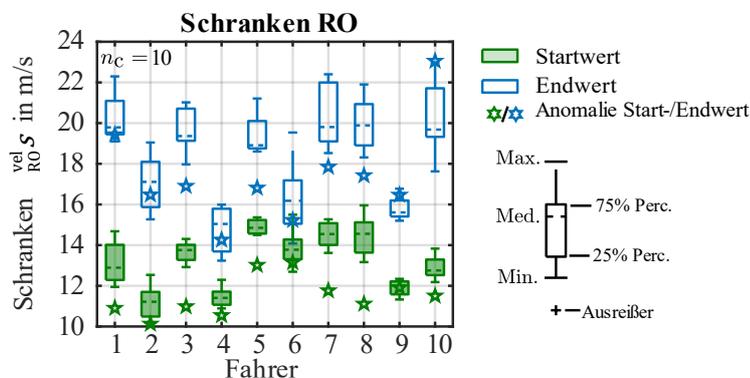


Abbildung 6-26 Rollwinkelschranken in Kurvenausleitung ◇

Abbildung 6-26 zeigt die Schrankenwerte der Fahrer des Kurvenausleitungs-Primitives. Sowohl die Start- als auch die Endwertbereiche der Wachstumsfunktion (Schranken) weisen fahrerspezifische Werte auf. Es zeigt sich, dass Fahrer mit niedrigeren Startschranken auch geringere Endschränken aufweisen. Die Schrankenwerte des pseudokritischen Manövers sind in Abbildung 6-26 als Sterne dargestellt. Anhand der Schrankenwerte ist eine Identifizierung der pseudokritischen Manöver teilweise möglich. Bei acht von zehn Fahrern liegt die Startschranke des pseudokritischen Manövers im Kurvenausleitungs-Primitiv signifikant unter den Geschwindigkeitsbereichen der Standardmanöver. Somit reduzieren die Fahrer die Geschwindigkeit bei einem unvorhersehbaren Ereignis und erhöhen sie nicht unmittelbar innerhalb des Stationär-Primitives wieder. Die Geschwindigkeiten am Ende des Kurvenausleitungs-Primitives liegen nur bei vier Fahrern unter dem Endschränkenbereich der Standardmanöver. Die Amplituden und Frequenzkoeffizienten der überlagerten Schwingungen des Geschwindigkeitssignals sind fahrerübergreifend ähnlich. Die Amplitudenhöhen stehen dabei in einem geringen Verhältnis zur Höhe der Geschwindigkeit. Die Amplituden der überlagerten Schwingung der Geschwindigkeitsverläufe des Kurvenausleitungs-Primitives sind im Anhang A.5.3 dargestellt.

Zusammenfassend ist durch die gezeigten Zusammenhänge die Erfüllung der allgemeinen Modellanforderung einer Übertragbarkeit in den Straßenverkehr *Anf-Mod-All-7*, wie auch der spezifischen Anforderung an die Erkennbarkeit von Anomalieereignissen in den Modellparametern *Anf-Mod-Fah-6* gegeben.

6.2 Validierungsansatz der Trajektorienprädiktion

Der Ansatz der Validierung der berechneten Trajektorien basiert auf einem Vergleich der mittels des Modells berechneten Größen für Rollwinkel, Geschwindigkeit, Gierrate und Position mit den zugehörigen Messgrößen. Die genutzte Messtechnik (ADMA, Validierungsmessdatensatz \circ nach Kapitel 4.3.5) wird in Kapitel 4.2.1 vorgestellt. Zudem wird in Kapitel 4.2.2 die Anforderung an die maximale Abweichung von 0,5 m zwischen dem gemessenen und dem berechneten Signal definiert. Die maximale Abweichung wird hierbei aus dem Einzelwertvergleich in lateraler Richtung zur Bewegungsrichtung des Fahrzeuges berechnet. Als Bewertungsgröße für die Validierung wird die Genauigkeit der Positionsberechnung im zeitlichen Zusammenhang betrachtet. Somit wird gleichzeitig die örtliche Abweichung wie auch die zeitliche Abweichung untersucht. Das Vorgehen beruht darauf, den über den Prozess der Modellierung entstandenen Gesamtfehler bewerten zu können und bei Erreichen der Fehleranforderung die Methodik als insgesamt valide anzusehen.

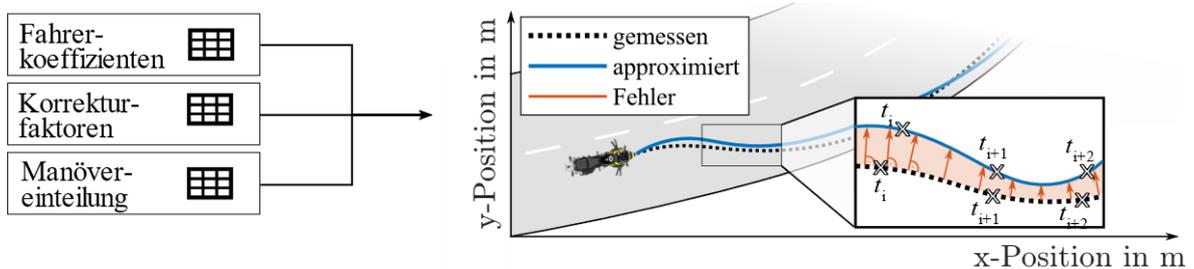


Abbildung 6-27 Schematisches Vorgehen zur Validierung der Trajektorienprädiktion¹³⁸

Abbildung 6-27 stellt das Vorgehen zusammengefasst dar. Aus den in den Kurvenfortschrittsbereich transformierten Messdaten werden segmentweise für die Einleitung, Stationärphase und Ausleitung die Koeffizienten der mathematischen Ansatzfunktionen aus Kapitel 5.4 ermittelt. Nach der Rücktransformation in den Zeitbereich, der Ermittlung der Korrekturfaktoren für die Gierrate nach Kapitel 5.5 und der hierauf basierenden Berechnung der Positionswerte im zeitlichen Bezug liegen alle Größen zur Durchführung der Validierung vor. Die Ausrichtung des Fahrzeuges und die Position zu Beginn der Kurve werden als gegeben vorausgesetzt. Dieses Vorgehen wird für alle Durchfahrten der in Kapitel 4.3.4 vorgestellten drei Fahrer wiederholt. Hierbei wird darauf hingewiesen, dass Fahrer 1 und Fahrer 3 nicht an den Messungen der Datenbasis der Modellerzeugung teilgenommen haben, Fahrer 2 ist Teil beider Messreihen. Somit wird zum einen ein Nachweis der Unabhängigkeit des Modells vom genutzten Messsystem, wie auch der Fahrer angestrebt. Fahrer 1 und Fahrer 3 weisen eine hohe Fahrpraxis, wie auch eine sportliche Selbsteinschätzung auf. Fahrer 2 wird repräsentativ für den Vergleich mit einer defensiven Selbsteinschätzung und geringer Fahrpraxis herangezogen.

¹³⁸ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 295.

Die für die Validierung des Modells auf dem Testgelände genutzten Kurven sind identisch mit den in Kapitel 4.3.2 vorgestellten Kurven zur Erzeugung der Datenbasis des Modells. Die berechneten Positionen beziehen sich bei allen gezeigten Darstellungen, außer wenn anders angegeben, auf den Schwerpunkt des Fahrzeuges. Die abweichende Position des Messtechnikaufbaus am Fahrzeugheck zum Fahrzeugschwerpunkt wird über eine durch den Messtechnikhersteller Genesys bereitgestellte Transformation ausgeglichen.

Die Validierung des Modells auf Basis der Testgelände-Untersuchung gliedert sich wie auch schon die Modellentwicklung in drei Schwerpunkte. Die Betrachtung der symmetrischen RE-180-12 und LI-180-12 Kurven, die Analyse des dynamischen Kurvenübergangs mittels der RE/LI-180/90-12/18 und die Übertragbarkeit auf den Straßenverkehr mittels der Untersuchung der RE-90-30 Kurve (nähere Beschreibung des Messdatensatzes ◦ siehe Kapitel 4.3.5).

Im ersten Teil der Validierung werden die Ergebnisse der Bewertungskurven der RE-180-12 und LI-180-12 Kurven vorgestellt. Die Kurven werden jeweils 10-fach je Kurvenrichtung durchfahren.

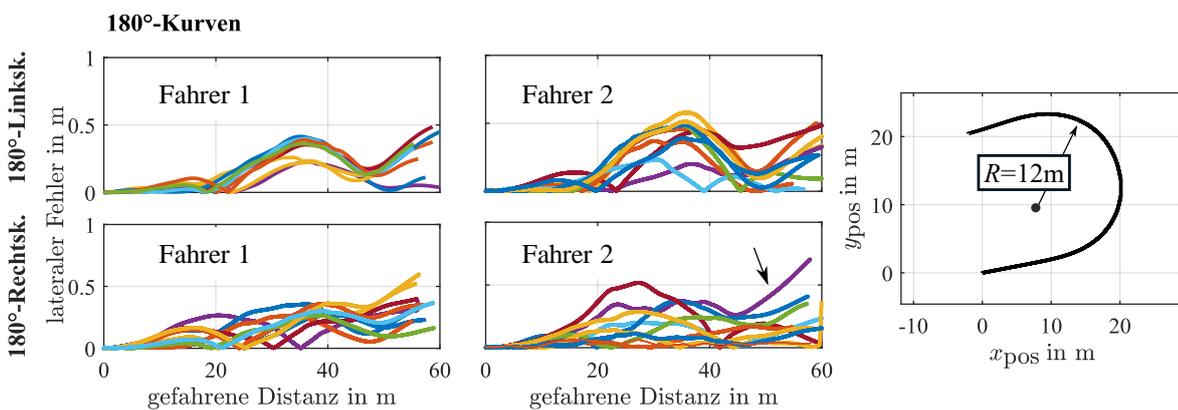


Abbildung 6-28 Lateraler Fehler aller Durchfahrten der LI-180-12 Kurven (oben) und RE-180-12 Kurven (unten) von Fahrer 1 und Fahrer 2 der Validierungsfahrten, 10 Durchfahrten je Fahrer und Richtung, jede Farbe stellt eine Kurvendurchfahrt dar ◦¹³⁹

In Abbildung 6-28 ist der laterale Fehler aller insgesamt 40 Durchfahrten von Fahrer 1 und Fahrer 2 beider Kurvenrichtungen dargestellt. In der Abbildung rechts ist ein beispielhafter Verlauf des berechneten Positionsverlaufs von Fahrer 1 dargestellt. Fahrer 3 wird aus Überichtsgründen nicht dargestellt, der berechnete Fehler ist vergleichbar mit den Ergebnissen von Fahrer 1 (nähere Beschreibung des Messdatensatzes ◦ siehe Kapitel 4.3.5).

Wie zu erwarten steigen die lateralen Fehler mit zunehmender Vorhersagedistanz oder Vorhersagezeit an. Der Fehler bei Fahrer 1 nimmt bei Linkskurven gegen Ende der Kurve wieder ab um anschließend wieder anzusteigen. Dieses Phänomen ist ähnlich bei Fahrer 2 in den Linkskurven, bei keinem der Fahrer in den Rechtskurven beobachtbar. Der zunehmende Fehler gegen Manöverende ist bereits dem in die Geradausfahrt übergehenden Teil der

¹³⁹ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 296.

Kurvenfahrt zuzuordnen der hier gezeigte Kurvenausschnitt beinhaltet sowohl Anteile der Kurvenanfahrt, als auch der Geradeausfahrt nach Kurvenende. Über alle Durchfahrten hinweg liegt der laterale, maximale Fehler für die Fahrer 1 und Fahrer 3 bei unter 0,5 m. Der Maximalfehler von Fahrer 2 beträgt 0,7 m und ist in Abbildung 6-28 mit einem Pfeil markiert. Insgesamt weist Fahrer 2 einen größeren Fehler auf. Bei einer Betrachtung des Fehlers bis zum Primitiv der Kurvenausleitung liegen 97 % aller Durchfahrten bei einer fahrerunabhängigen Abweichung von weniger als 0,5 m.

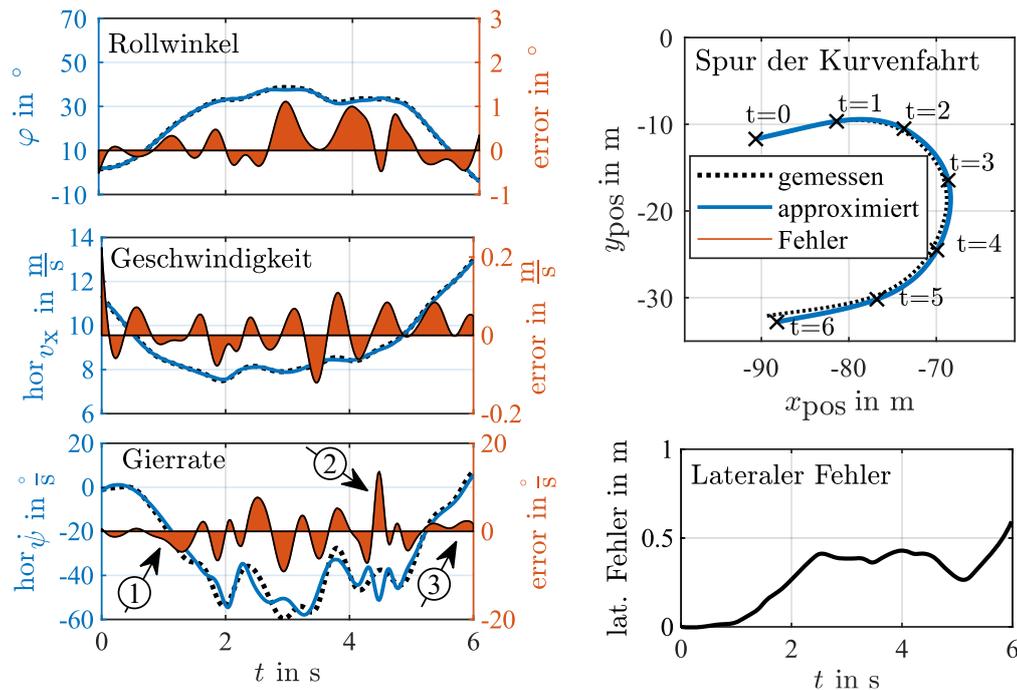


Abbildung 6-29 Detaildarstellung des Maximalfehlers der Trajektorien von Fahrer 2, RE-180-12 Kurven links Rollwinkel, Geschwindigkeit und Gierrate, rechts Positionsberechnung und lateraler Fehler ¹⁴⁰

Die Durchfahrt mit dem größten maximalen Fehler aller Durchfahrten der 180°-Kurven ist in Abbildung 6-31 detailliert dargestellt (nähere Beschreibung des Messdatensatzes ¹⁴⁰ siehe Kapitel 4.3.5). In Abbildung 6-29 sind links (von oben nach unten) der approximierten Rollwinkel- und Geschwindigkeitsverlauf sowie die daraus abgeleitete Gierrate zusammen mit den Fehlerwerten dargestellt. Die x-Achse der Fehlerdarstellung schneidet dabei die y-Achse des betrachteten Wertes im Mittelwert des betrachteten Ausschnitts. Jeweils gepunktet aufgetragen ist das gemessene Ursprungssignal, in blau das approximierte Signal und in roter Fläche die Differenz als Fehler der beiden Werte aufgetragen. Rechts oben ist die gemessene Trajektorie im Vergleich zur geschätzten Trajektorie zu sehen. Die Fehler in der Approximation des Rollwinkel- und Geschwindigkeitssignals sind gering. Die Untersuchung der Gierrate zeigt jedoch, dass besonders während der Kurveneinleitung ein Gierratenfehler auftritt, der nicht um die Nulllage schwankt (siehe Pfeil Nr. 1). Dadurch nimmt der Positionsfehler

¹⁴⁰ Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022), S. 297.

bereits zu Beginn der Kurveneinleitung zu. Während des stationären Kurventeils bleibt der laterale Versatz nahezu konstant. Am Ende der stationären Phase und beim Übergang zur Kurvenausleitungsphase treten höhere Gierratenfehler im Vergleich zu anderen Bereichen auf (siehe Pfeil Nr. 2). Dies ist auf Näherungsungenauigkeiten im Rollwinkel- und Geschwindigkeitsverlauf zurückzuführen. Zusätzlich führen die Segmentübergänge der approximierten Verläufe zu einer fehlerhaften Dynamik. Ab etwa $t = 5$ s am Ende des Gesamtmanövers zeigt der Gierratenfehler einen positiven Trend (siehe Pfeil Nr. 3), was eigentlich zu einer Reduzierung des lateralen Fehlers führen sollte. Da die Betrachtung des lateralen Positionsfehlers zwischen der gemessenen und berechneten Trajektorie unabhängig vom zeitlichen Verlauf des berechneten Signals ist und die zurückgelegte Wegdifferenz zwischen der realen und approximierten Kurvendurchfahrt mit zunehmender Simulationsdauer zunimmt, wird der Zusammenhang zwischen zeitlichem Gierratenfehler und Positionsabweichung insbesondere am Ende des Manövers nicht mehr direkt erkennbar.

Aufgrund der maximalen lateralen Abweichungen < 0.5 m in 97 % aller Kurvendurchfahrten bis zum Primitiv der Kurvenausleitung gilt *Anf-Mod-Tra-1* in diesem Bereich für die betrachteten Kurven konstanten Radius als erfüllt. Insgesamt ist bis auf Einzelfälle eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen mit den geschätzten Trajektorien zu beobachten und somit die Anforderung erreicht.

Das Manöver des dynamischen Kurvenübergangs, dargestellt durch die RE/LI-180/90-12/18 Kurvendurchfahrten wird nachfolgend stellvertretend durch die Darstellung der Ergebnisse der Fahrer 2 und Fahrer 3 in Abbildung 6-30 repräsentiert (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \circ siehe Kapitel 4.3.5).

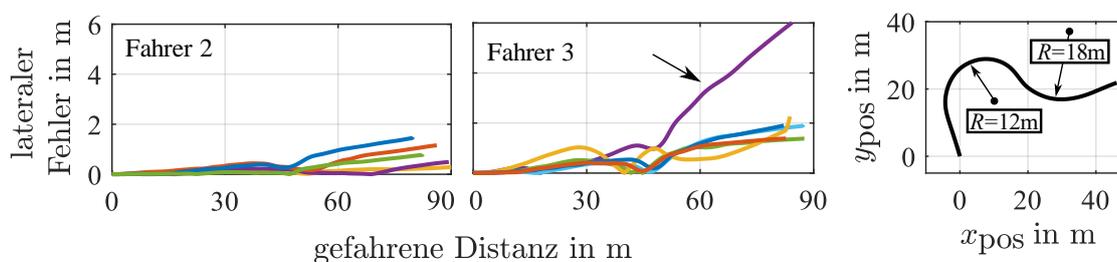


Abbildung 6-30 Lateraler Fehler aller Durchfahrten der RE/LI-180/90-12/18 Kurven von Fahrer 2 und Fahrer 3 der Validierungsfahrten, 5 Durchfahrten je Fahrer, jede Farbe stellt eine Kurvendurchfahrt dar \circ

Die Lateralfehler in der dynamischen Kurvenkombination fallen deutlich höher aus im Vergleich zu den 180° -Kurven, insbesondere zeigen die berechneten Trajektorien von Fahrer 3 erhebliche Abweichungen, die während und nach dem Richtungswechsel stark zunehmen. In Abbildung 6-31 wird die Ursache und Wirkung der Fehlerfortpflanzung im Detail dargestellt, wobei der größte auftretende Fehler in der Positionsberechnung hervorgehoben ist (siehe Pfeil in Abbildung 6-31 Mitte, rechts).

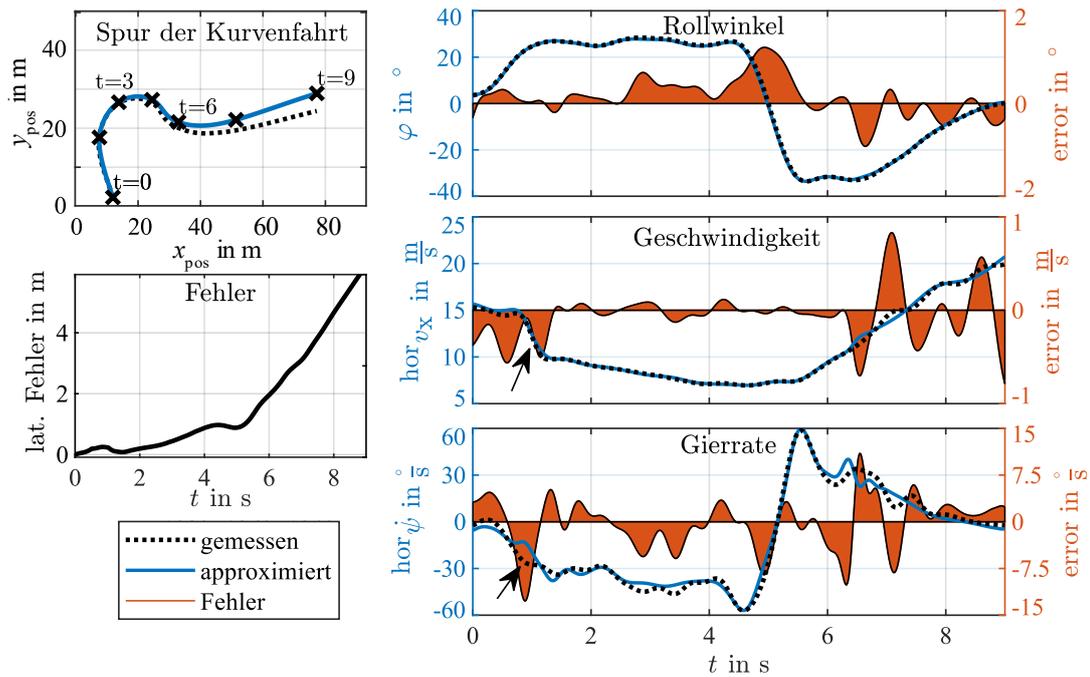


Abbildung 6-31 Detaildarstellung des Maximalfehlers der Trajektorien von Fahrer 3, RE/LI-180/90-12/18 Kurven links Rollwinkel, Geschwindigkeit und Gierrate, rechts Positionsberechnung und lateraler Fehler ◦

Die Untersuchung der Einzelparameter zeigt, dass die Abweichung auf eine zu hohe Approximation des Geschwindigkeitssignals bei Kurveneinleitung zurückzuführen ist (siehe Pfeil). Zurückzuführen ist dies auf die offene Randbedingung zu Beginn der Optimierung. Der Anfangswert wird nicht festgesetzt, da dieser zu einer Verschlechterung des Optimierungsergebnisses führt.

Dies führt einerseits zu einer fehlerhaften Berechnung der Gierrate und andererseits zu einer Überschätzung der zurückgelegten Strecke. Letzteres resultiert zunächst in einem Längsverzerrung der Trajektorie, der jedoch beim anschließenden Richtungswechsel ($t \cong 5$ s) in einen lateralen Fehler übergeht.

Trotz der tendenziell höheren seitlichen Positionsabweichungen zeigt sich anhand von Fahrer 2, dass für bestimmte Fahrertypen eine Beschreibung und Vorhersage der zukünftigen Positionen auch bei hochdynamischen Manövern möglich ist. Es ist außerdem zu beachten, dass bereits die Korrekturparameter für die vorliegende S-Kurve im Vergleich zu den übrigen Manövern eine niedrigere Korrekturgüte aufweisen.

Zudem wird bei dem hier vorgestellten dynamischen Manöver mit einer Vorhersagedauer von ca. $t = 9$ s die Fehleranfälligkeit durch die Länge des Manövers selbst größer.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich das dynamische Manöver der Kurvenüberleitung nicht fahrerübergreifend nach der Anforderung *Anf-Mod-Tra-1* validieren lässt. In Abhängigkeit unterschiedlicher Fahrer und der getrennten Betrachtung der verschiedenen Kurvenabschnitte ist eine Teilvalidierung möglich, jedoch nicht nach der in dieser Arbeit definierten Anforderung.

Der dritte Teil der Validierung auf Basis der Testgelände Messfahrten ist die Validierung der Übertragbarkeit in den Straßenverkehr mit dem Vergleich der Durchfahrten der RE-90-30 Kurve. Beispielhaft dargestellt sind nachfolgend wieder alle $n=10$ Durchfahrten der Fahrer 2 und Fahrer 3 (nähere Beschreibung des Messdatensatzes \circ siehe Kapitel 4.3.5).

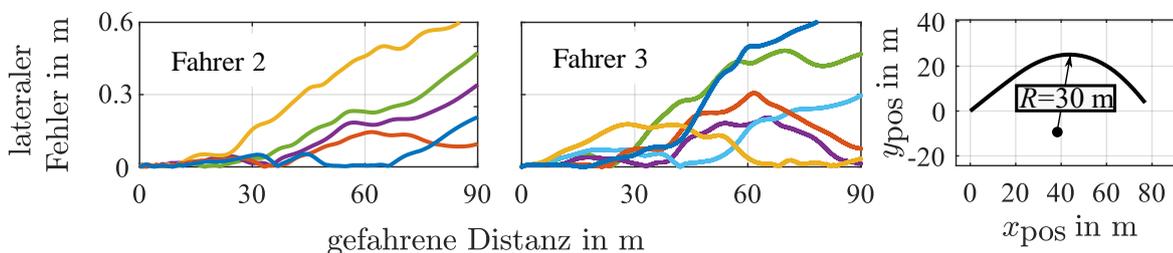


Abbildung 6-32 Laterale Abweichung der gemessenen und berechneten Trajektorien, RE-90-30 Kurve, Fahrer 2 (links) und Fahrer 3 (Mitte) \circ

Die Positionsfehler in der 90° -Kurve, dargestellt in Abbildung 6-32 liegen für alle Fahrer, für das gesamte Manöver bei unter $0,6\text{ m}$. Bis zum Beginn der Kurvenausleitung beträgt der Fehler bei acht von elf Durchfahrten weniger als $0,3\text{ m}$, was einem relativen Versatzfehler von weniger als $0,5\%$ entspricht. In der untersuchten Kurve ist kein Trend oder Muster bei Zu- und Abnahme des Fehlers wie zum Teil in den beiden anderen Manövern zu erkennen. Insgesamt sorgt das in der Kurve vorherrschende höhere Geschwindigkeitsniveau für ein stabileres Fahrverhalten. In Kombination mit dem stetigen Krümmungsübergang dieser Kurve ist von einem dem Straßenverkehr ähnlichen Kurvenmanöver auszugehen.

Bei der Vernachlässigung der Abweichungen nach dem Beginn der Kurvenausleitung ist aufgrund der hier gezeigten Ergebnisse eine Validität nach Anforderung *Anf-Mod-Tra-1* nachgewiesen.

Die Analyse aller Positionsabweichungen zeigt, dass das entwickelte Modell in der Lage ist, mithilfe fahrerspezifischer Kennwerte die zukünftige Position des Einspurfahrzeugs zu berechnen. Die auftretenden Positionsabweichungen resultieren hauptsächlich aus Approximationsungenauigkeiten im Geschwindigkeitsverlauf. Fehler im Geschwindigkeitssignal wirken sich sowohl auf die Gierrate als auch auf die zurückgelegte Strecke aus, was insbesondere bei Manövern mit Richtungswechseln herausfordernd ist. In einigen Fällen können die Übergangsbereiche der Phasen trotz der Glättung Artefakte im Gierratensignal hervorrufen.

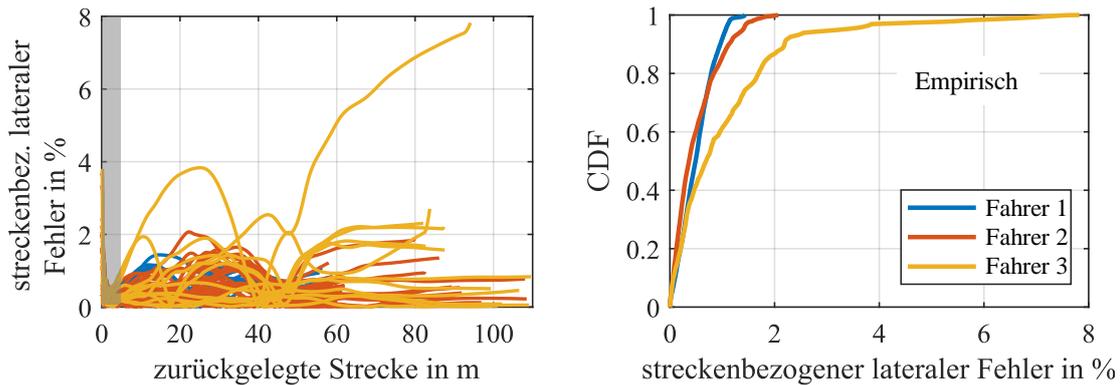


Abbildung 6-33 Zusammenfassung lateraler Abweichungen der Testgelände-Validierung ◦

Die Ergebnisse aller drei betrachteten Manöver sind abschließend in Abbildung 6-33 zusammengefasst. Links in Abbildung 6-33 wird die streckenbezogene laterale Abweichung über der zurückgelegten Strecke für alle Bewertungskurven dargestellt. Die rechte Abbildung zeigt die kumulative Verteilungsfunktion (CDF) der streckenbezogenen lateralen Abweichung. Aufgrund der Singularität am Beginn der zurückgelegten Strecke (schattierter Bereich links in Abbildung 6-33) werden bei der CDF Strecken ab einer Länge von $s = 2$ m betrachtet. Der maximale relative laterale Versatz beträgt für den ersten bzw. zweiten Fahrer weniger als 1,4 % bzw. weniger als 2 %. Fahrer 3 weist, aufgrund der Ergebnisse des Kurvenübergangsmanövers, deutlich höhere Abweichungen auf.

Eine fahrer- und manöverunabhängige Validierung nach der Anforderung *Anf-Mod-Tra-1* ist für die Einzelkurven RE-180-12, LI-180-12 und RE-90-30 möglich. Somit ist eine Anwendung des Modells auf einzelne Kurven, das heißt kommend aus und endend mit der Geradeausfahrt möglich.

Bei Kurvenkombinationen mit dynamischem Übergang ist eine Teilvalidität des Modells bis zum Kurvenübergang vorhanden. Da bei der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik keine Rückführung zur Fehlerreduktion durchgeführt wird, werden bei der Berechnung der zukünftigen Position Integrationsfehler gemacht. Mit zunehmender Vorhersagedauer integrieren sich Fehler des Verlaufs somit auf. Eine bleibende Fehlerabweichung wird nicht wie zum Beispiel in der Literatur (Kapitel 3.3.2) über einen Regler kompensiert. Zudem ist aufgrund der Gestaltung der Untersuchungskurve RE/LI-180/90-12/18 mit vorgesehener Auslaufläche und daraus resultierend fehlender Begrenzung der Fahrstreifenmarkierung eine starke Variation der Linienwahl durch die Fahrer möglich. Im Realverkehr würde dies einem „schneiden“ einer Kurve oder auch dem Fahren im Gegenverkehr entsprechen, was nicht über die Methodik abgebildet wird.

6.3 Zusammenfassung der Verifikation und Validierung

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Verifikation und Validierung des Modells, bzw. der Trajektorienprädiktion zusammengefasst und kritisch hinterfragt. Kapitel 6.1 verifiziert das entwickelte Modell anhand der Untersuchung der Fahrerspezifität in den Modellparametern. Das entwickelte Modell spiegelt das typische und wiederholbare Verhalten beim mehrfachen Durchfahren derselben Kurve bei gleichbleibenden Bedingungen wider. Abweichungen zum normalen Verhalten werden durch die Analyse der Koeffizienten bei der Existenz eines Anomalieereignisses sichtbar.

Somit lässt sich mit dem hier vorgestellten Ansatz fahrerspezifisch wiederholbares Verhalten beim mehrfachen Durchfahren derselben Kurve mit gleichbleibenden Randbedingungen modellieren.

Die Validierung der berechneten Trajektorien ist mit den in dieser Arbeit entwickelten Anforderungen, der Betrachtung der Positionsabweichung innerhalb der Messtoleranz des genutzten Messsystems über das gesamte Kurvenmanöver, für Einzelkurven möglich. Bei zusammengesetzten Kurvenkombinationen mit dynamischem Kurvenübergang wird eine Teilvalidität bis zum Kurvenübergang nachgewiesen.

Durch eine Kombination der Untersuchungen der vorangegangenen Kapitel werden folgende Erkenntnisse deutlich.

- Es existiert ein wiederholbares Verhalten beim Durchfahren derselben Kurve und gleichen Randbedingungen.
- Das individuelle Verhalten korreliert nicht direkt mit der Fahrerfahrung oder der Fahrpraxis. Vielmehr existieren fahrerspezifische Muster, die wiederholbar abgerufen werden.
- Das wiederholbare Verhalten ist nicht zeitlich konstant, jedoch wegstrecken-, bzw. kurvenfortschrittsabhängig. Dies bedeutet indirekt, dass bei einem Einfahren in eine Kurve mit einer höheren Geschwindigkeit dieselben Handlungsmuster zeitlich schneller ablaufen, woraufhin am selben Ort einer Kurve jeweils ein ähnliches Verhalten beobachtbar ist.
- Veränderungen in Rollwinkel beziehungsweise Geschwindigkeitswerten sind betrachtet über der Strecke nur in ihrer Höhe verschoben. Das individuelle Verhalten wird hierdurch nicht beeinflusst.
- Der Ort des Beginns der Kurvenausleitung sowie die zugehörigen Werte des Rollwinkels und der Geschwindigkeit unterliegen den geringsten Schwankungen. Dies deutet daraufhin, dass sich ein Fahrer typischerweise auf den Beginn dieser Phase über den Kurvenfortschritt „hinarbeitet“.

Das hier entwickelte Modell inklusive der Trajektorienprädiktion ist somit in der Lage, fahrerspezifisches Verhalten auf Basis der mehrfachen Durchfahrung einer Kurve zu modellieren und darauf basierend eine Trajektorie zu berechnen. Bei häufiger Durchfahrung einer Kurve entsteht so ein Kennfeld mit den Werten von Rollwinkel und Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Kurvenfortschritts. Diese Kenntnisse können bei der erneuten Anfahrt derselben Kurve genutzt werden, z.B. zur Berechnung der Information, ob die Anfahrt-Parameter innerhalb oder außerhalb des typischen Kennfeldes liegen. Bei Werten außerhalb der bekannten Größen ist somit die Durchfahrbarkeit nicht sichergestellt, ein Hinweis auf eine gefährdete Durchfahrbarkeit oder Empfehlung der Reduktion der Geschwindigkeit könnte erfolgen.

7 Ausblick und Diskussion

Nachfolgend wird das Ergebnis einer ersten prototypischen Erprobung des entwickelten Modells im Straßenverkehr vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Arbeit diskutiert und mit einem Ausblick auf mögliche, folgende Arbeiten abgeschlossen.

7.1 Prototypische Erprobung im Straßenverkehr

Für eine prototypische Erprobung der Trajektorienprädiktion im Straßenverkehr wird im Rahmen dieser Arbeit eine Ersterprobung mit der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Low-Cost Messtechnik durchgeführt. Hierfür werden wiederum die drei Fahrer mit unterschiedlichen Fahrzeugen auf der mittels der in Kapitel 4.4.2 ausgewählten Strecke messtechnisch begleitet. Die genutzten Fahrzeuge sind: BMW K 1200 R Sport ($m = 237 \text{ kg}$, vollgetankt) und Honda CBF 1000 ($m = 252 \text{ kg}$, vollgetankt) (nähere Beschreibung des Messdatensatzes □ siehe Kapitel 4.3.5).

Die Fahrer sind nicht über den tatsächlichen Hintergrund der Messung informiert. Es wird nicht mitgeteilt, dass nur zwei Kurven der insgesamt 10 km langen Messstrecke zur Untersuchung genutzt werden. Die Messstrecke wird von jedem Fahrer mit einer kurzen Pause für die Rüstzeit zwischen den Durchfahrten jeweils sechs-fach in beide Richtungen durchfahren. Die Erfüllung aller Anforderungen aus Kapitel 4.3.2 zur Durchführung der Datenerfassung ist auf einer nicht abgesperrten Straße im realen Verkehr nicht möglich. Die Präsenz anderer Verkehrsteilnehmer während der Messungen kann nicht verhindert werden. Die Fahrer sind angewiesen beim Auffahren auf ein anderes Fahrzeug, oder auch beim Aufschließen eines Fahrzeuges von hinten auf das Ego-Fahrzeug so bald wie möglich die Messfahrt zu pausieren, bis wieder eine freie, komplett eigenständige Fahrt möglich ist. Nach jeder Fahrt findet eine Befragung über das Verkehrsaufkommen oder sonstige beeinträchtigende Ereignisse statt. Bei entsprechender Beeinträchtigung in der für die Untersuchung genutzten Kurvenkombination RE/LI-135/110-63/50 wird der zugehörige Datensatz verworfen. Dies ist in einem Fall bei Fahrer 2 notwendig, woraufhin von Fahrer 1 und Fahrer 3 jeweils 6 Kurvendurchfahrten existieren, wohingegen von Fahrer 2 nur fünf auswertbare Durchfahrten der Kurven vorhanden sind (nähere Beschreibung des Messdatensatzes □ siehe Kapitel 4.3.5).

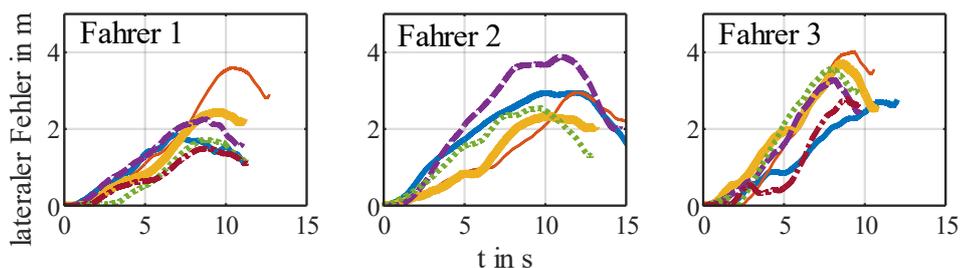


Abbildung 7-1 Laterale Abweichung gemessener und geschätzter Trajektorie der prototypischen Erprobung im Straßenverkehr aller drei Fahrer, Einzelbetrachtung des ersten Rechtskurvensegmentes □

Zunächst wird der erste Kurvenabschnitt als eigenständige Kurve betrachtet. Die Parametrierung wird so durchgeführt, dass das Modell die erste Kurve, dementsprechend eine RE-135-63 Kurve mit der Kurvenüberleitung als beendet betrachtet. Abbildung 7-1 stellt die Übersicht aller Durchfahrten von allen drei Fahrern bei dieser Art der Betrachtung dar. Jede Farbe steht dabei für eine Kurvendurchfahrt. Es ist zu erkennen, dass der Fehler über den Prädiktionsfortschritt zunimmt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Untersuchung auf abgesperrtem Gelände. Bei allen drei Fahrern ist eine Reduktion des Fehlers gegen Kurvenende, bzw. dem Kurvenübergang ersichtlich. Somit ist eine Fehlerreduktion in der Kurvenausleitungsphase ersichtlich. Der maximale laterale Fehler über alle drei Fahrer liegt bei 4 m. Unter Berücksichtigung der Anforderung aus Kapitel 4.2.2 *Anf-Mod-Tra-2*, dem Unterschreiten der Messtoleranz des genutzten Messsystems über das gesamte Kurvenmanöver hinweg ist hiermit keine Validität nachweisbar.

Bei der Hinzunahme des zweiten Kurvenabschnitts, mit der Überleitung in die Gegenkurve bis zur endgültigen Kurvenausleitung verändert sich das Fehlerbild insgesamt.

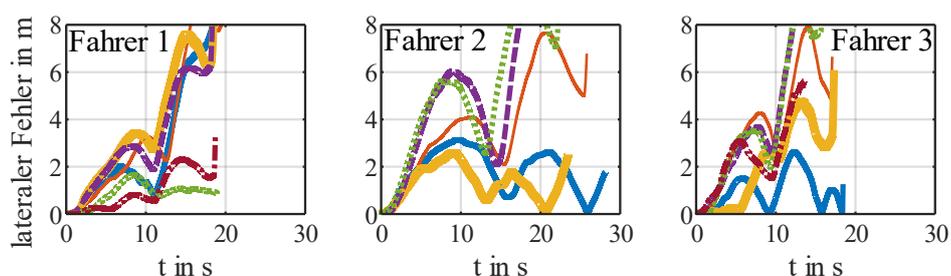


Abbildung 7-2 Laterale Abweichung gemessener und geschätzter Trajektorie der prototypischen Erprobung im Straßenverkehr aller drei Fahrer, Gesamtbetrachtung der RE/LI-135/110-63/50 Kurve □

Dargestellt sind die lateralen Abweichungen für die Kurvenkombination in Abbildung 7-2. Insbesondere bei Fahrer 2 fällt ein größerer lateraler Fehler bei ca. $t = 10$ s auf. Hier nicht dargestellt entspricht dieser Zeitpunkt dem Punkt der ersten RE-135-63-Kurve mit minimalem Radius, also ungefähr der Mitte der stationären Haltephase. Bei allen drei Fahrern reduziert sich der Fehler bis zum Punkt des Beginns der Kurvenausleitung. Ab diesem Zeitpunkt, und der Einfahrt in das zweite Kurvensegment wiederholt sich das Phänomen und führt zu teils großen lateralen Abweichungen. Auch hier ist die Anforderung über das gesamte

Kurvenmanöver nicht validierbar. Der maximale Fehler liegt mit mehr als 8 m weit außerhalb der in Kapitel 4.2.2 ermittelten Messtoleranz von 1,4 m des genutzten Systems Wing-Man.

Der bereits angesprochene wiederholbare Verlauf des sich über den Kurvenverlauf zunächst wieder reduzierenden Fehlers wird nachfolgend detailliert untersucht.

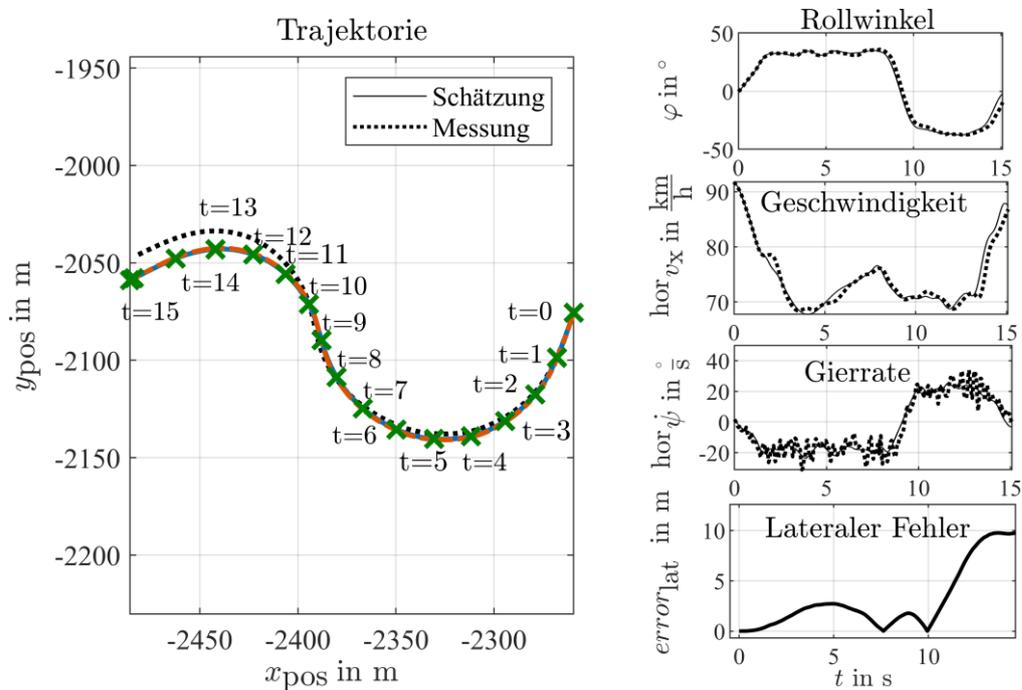


Abbildung 7-3: Beispieltrajektorie, Fahrer 3, Durchfahrt 5 mit zugehörigem Rollwinkel-, Geschwindigkeits-, Gierraten-Signal, lateraler Fehler, nach Scherer und Eschinger¹⁴¹ □

In Abbildung 7-3 dargestellt ist eine Durchfahrt von Fahrer 3 bei der die Reduktion des Fehlers zur Kurvenüberleitung besonders deutlich sichtbar ist. Im linken Teil der Abbildung ist die gemessene und geschätzte Trajektorie im Vergleich dargestellt. Rechts von oben nach unten sind über der Zeit das Rollwinkelsignal, der Geschwindigkeitsverlauf, das Gierraten-signal und der laterale Fehler dargestellt. Bei $t = 8$ s und $t = 10$ s wird der laterale Fehler jeweils fast zu 0 reduziert. Beim Vergleich mit dem Rollwinkel und Gierratensignal zeigt sich, dass diese Punkte jeweils die Übergänge aus der stationären Kurvenfahrt in das dynamische Kurvenüberleitungsprimitiv, bzw. den darauffolgenden Übergang aus diesem Primitiv in die nächste stationäre Phase darstellen.

Zusammenfassend ist in der prototypischen Erprobung im Straßenverkehr keine fahrerübergreifende Erfüllung der Anforderungen *Anf-Mod-Tra-1* und *Anf-Mod-Tra-2* möglich. Dies liegt zum einen an der sehr harten Anforderung über der gesamten Manöverlänge die Anforderung erfüllen zu müssen und zum anderen an den deutlich abweichenden Randbedingungen hinsichtlich der Erreichbarkeit der Messgenauigkeit im Straßenverkehr. Die nach der

¹⁴¹ Scherer, F.; Eschinger, M.: Investigation of the Applicability of a Motorcyclist Model for Trajectory Prediction in Real Traffic, S. 11.

Methode in Kapitel 4.2.2 erarbeiteten Werte der Positionsgenauigkeit werden unter „optimalen“ Bedingungen auf einem abgesperrten Gelände erzeugt. Bei Messungen ähnlich der hier genutzten Strecke mit deutlicher Bewaldung ist mit einer Reduktion der Messgenauigkeit durch Mehrwegeeffekte oder Abschattung zu rechnen. Für eine detailliertere Beschreibung der Effekte wird auf weiterführende Literatur, wie Karaim et. al.¹⁴² verwiesen.

¹⁴² Karaim, M. et al.: GNSS Error Sources (2018).

7.2 Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur kurvenabhängigen Trajektorienprädiktion von Motorradfahrern.

Hierfür wurde in Kapitel 4 eine Systemabgrenzung durchgeführt, woraus sich zu erfassende Messgrößen ergeben haben. Die aus den Grundlagen und dem Stand der Forschung hervorgehenden typischen Unfallkurven wurden so verallgemeinert bewertbar gemacht, dass mit der entwickelten Metrik beliebige Streckenabschnitte auf potentiell gefährliche Kurven untersucht werden können.

In Kapitel 5 wurde die Forschungsfrage der Existenz fahrertypischer Schwellwerte in fahrdynamischen Parametern beim Durchfahren von Kurven untersucht. Hieraus geht hervor, dass insbesondere in den Größen des Rollwinkels, wie auch den Verläufen der Geschwindigkeit über einen Kurvenverlauf hinweg deutliche Schwellwerte erkennbar sind. Die Schwellwerte des Lenkmoments dagegen zeigen wenig fahrerspezifischen Einfluss. Ein weiterer Schwellwert wurde in Form des örtlichen Zusammenhangs des Beginns der Kurvenausleitung sichtbar.

Im gleichen Kapitel wurden die Forschungsfragen der Ähnlichkeit des wiederholten Durchfahrens einer (selben) Kurve und dem Zusammenhang zwischen der Fahrerspezifität und dem Muster beim wiederholten Durchfahren beantwortet. Es existieren Muster bei den Verläufen von Rollwinkel und Geschwindigkeit, die sich fahrerspezifisch wiederholen. Es konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Fahrerfahrung und der Art des Musters hergestellt werden. Ein erster Zusammenhang zwischen der Selbsteinschätzung eines Fahrers und der Art des Aufbaus eines Rollwinkels über der Kurvenlänge wurde entdeckt. Sich als defensiv bewertende Fahrer zeigen typischerweise ein erstes Verharren bei einem niedrigeren Rollwinkel nach der Kurveneinleitungsphase im Vergleich zu sportlich bewerteten Fahrern. Diese rollen dynamischer auf den Zielrollwinkel, der anschließend relativ konstant bis zum Beginn der Kurvenausleitung gehalten wird. Hier zeigen defensive Fahrertypen häufiger progressives Verhalten, also ein Steigern des Rollwinkels über den Kurvenverlauf hinweg. Ebenso wie der örtliche Zusammenhang des Beginns der Kurvenausleitung zeigt sich auch bei den Absolutwerten von Rollwinkel und Geschwindigkeit eine kleine Streuung der Werte in dieser Phase. Hieraus lässt sich eine erste Vermutung aufstellen, dass zumindest ein Teil der Fahrer die Planung der Kurvenfahrt abgeschlossen bzw. das Ziel der erfolgreichen Durchfahrbarkeit ab diesem Punkt der Kurve erreicht hat.

In Kapitel 6 wurde mit der Verifikation und Validierung die letzte Forschungsfrage, ob sich eine solche Mustererkennung zur Prädiktion von Kurvenfahrten nutzen lässt, beantwortet. Die durch die Anforderungen aus Kapitel 5 definierte Abbildbarkeit der Fahrerspezifität führt bei der Berechnung einer zukünftigen Position zu guten Ergebnissen. Die Validierung für Einzelkurvenmanöver ist erfolgt. Für das Manöver des dynamischen Kurvenübergangs

wird eine Teilvalidität bis zum Kurvenübergang nachgewiesen. Die Modellierung der zukünftigen Fahrdynamik kommt bei dem hier vorgestellten Ansatz ohne die Vorgabe fahrzeugspezifischer Größen aus, wodurch auch diese Teilfrage der Forschungsfrage beantwortet wurde. Es ist also möglich ohne Kenntnis fahrzeugspezifischer Parameter eine Vorhersage der Kurvenfahrt unter Berücksichtigung der Fahrerspezifität zu tätigen.

Eine erste prototypische Erprobung des Modells in Straßenverkehrsuntersuchungen zeigt höhere Fehler bei der Berechnung der Trajektorie als auf abgesperrtem Gelände. Die Messtoleranz des genutzten Low-Cost Systems von 1,4 m - ermittelt auf abgesperrtem Gelände - wird mit lateralen Abweichungen von bis zu 10 m deutlich überschritten. Dies könnte an folgenden noch offenen Fragestellungen bezüglich der Anwendung im Straßenverkehr liegen:

- Welchen Einfluss auf das Modellergebnis hat die Variation des Fahrzeuges, insbesondere die Fahrzeugmasse, Schwerpunktlage oder geometrische Größen wie der Radstand?
- Welche Genauigkeitsanforderung an Rollwinkel und Geschwindigkeit ist minimal notwendig zur erfolgreichen Anwendung des Modells?
- Wie wird die individuelle Fahrweise durch andere Verkehrsteilnehmer beeinflusst?
- Welchen Einfluss auf das Fahrerverhalten hat der zeitliche Bezug (Tageszeit, Jahreszeit)?
- Inwiefern beeinflusst die Bekanntheit einer Strecke das Verhalten des Fahrers? Werden also Strecken, die erstmalig befahren werden, anders gefahren als bekannte, im Laufe der Zeit mehrfach durchfahrene Abschnitte?
- Welchen Einfluss hat der Straßenzustand auf das Fahrerverhalten?

Die Einschränkungen des vorgestellten Modells sind die starke Kurvenabhängigkeit der Modellvorhersage sowie die Messungen von wiederholtem Durchfahren derselben Kurven. An dieser Stelle sei hinzugefügt, dass die hier vorgestellte Methodik vor allem darauf abzielt ein verifiziertes und valides Modell zu erzeugen. In Zukunft kann es durchaus möglich sein, die in dieser Dissertation erarbeiteten Erkenntnisse im Straßenverkehr anzuwenden. Hierfür müssen weitere Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie ähnlich oder unterschiedlich sind verschiedene, beliebige Kurven?
- Welche Anzahl ähnlicher Kurven bei welcher Variation der Umweltbedingungen müssen erfasst werden, damit das hier vorgestellte Modell zuverlässig auf jede beliebige Kurvenkombination angewendet werden kann?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Wohlbefinden des Fahrers und dem Verhalten im typischen fahrerspezifischen Bereich, bzw. gibt es Situationen, in denen sich ein Fahrer häufiger im persönlichen Grenzbereich bewegt?

- Kann die hier vorgestellte Modellstruktur in Echtzeit angewendet werden und somit eine zuverlässige, fahrerspezifische Warnung vor zu schnell angefahrenen Kurven abgeleitet werden?

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell bietet die Chance einer fahrerspezifischen Parametrierung oder Applikation von Assistenzsystemen für Motorräder. Hiermit könnten fahrerspezifische Grenzen über den Kurvenfortschritt berücksichtigt werden und so exakt auf den Fahrer und die Fähigkeiten abgestimmte Warnungen erfolgen. Eine mögliche Warnstrategie könnte ähnlich dem Vorgehen aus der Literatur aus Kapitel 3.4 erfolgen.

Das Risiko hierbei ist jedoch, dass für eine geeignete Beschreibbarkeit eine noch zu untersuchende Menge an Kurven vor einer sinnvollen ersten Warnung gemessen und parametriert werden müssen. Somit wird sich das Verhalten des Assistenzsystems über einen Zeitraum hinweg verändern, was von einem Fahrer als unangenehm oder unberechenbar empfunden werden kann. Ein möglicher Ansatz der Anwendung des Modells ist die Kombination von aus der Literatur bekannter Reglerstrukturen (wie in Kapitel 3.3.2) mit dem hier entwickelten Modell.

Zusammenfassend bietet die hier vorgestellte Forschungsarbeit eine gute Basis für mögliche folgende Arbeiten. Bei einem Nachweis der Anwendbarkeit im Straßenverkehr der hier entwickelten Modellstruktur kann das Modell auf lange Sicht zu einer Verbesserung der Sicherheit für Motorradfahrer führen.

8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde aufbauend auf dem Stand der Forschung das Ziel der datengetriebenen Entwicklung eines Modells zur Vorhersage der Kurvenfahrt eines Motorrades in typischen Unfallkurven definiert. Hierfür sollten fahrerspezifische Verhaltensmuster berücksichtigt werden, um so eine Bewertung der Durchfahrbarkeit einer vorausliegenden Kurve treffen zu können. Der Fokus der zu untersuchenden Kurven lag hierbei auf typischen Unfallkurven von Motorrädern.

Allgemein wurde sich in dieser Arbeit für die Modellentwicklung am Vorgehen nach der Methode des V-Modells orientiert. Hieraus resultierend wurde in einer ersten Analysephase der Entwicklung eine Systemabgrenzung durchgeführt und die gegenseitige Beeinflussung der Teilsysteme Fahrer, Fahrzeug und Umwelt analysiert. Die Anforderung einer möglichst flächendeckenden Anwendbarkeit des Modells schränkt die Auswahl verfügbarer Messgrößen stark ein. Zudem sollte zur Übertragbarkeit und einfachen Anwendbarkeit keine Notwendigkeit einer Vorparametrierung des Modells mit fahrzeugspezifischen Größen bestehen. Als Ergebnis der Systemabgrenzung wurden die inertialen Messgrößen der Schwerpunktbeziehung, also Roll-, Gier-, und Nickwinkel mit zugehörigen Drehgeschwindigkeiten und eine Positionierungsbestimmung relativ zur Umwelt als Minimalanforderung definiert. Die Positionsbestimmung wurde mit einem GNSS-Empfänger umgesetzt, hieraus wurde zudem der für die Beschreibung der Dynamik als notwendige Größe definierte Parameter der Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden in den darauffolgenden Unterkapiteln die genutzten Messsysteme für die Datenerfassung vorgestellt. Es wurden drei verschiedene Messsysteme mit unterschiedlicher Ausprägung der Sensorqualität eingesetzt. Das Ziel war eine Anwendbarkeit des Modells unabhängig von der genutzten Messtechnik. Insbesondere für die Validierung des Modells wurde ein hochpräzises Fahrdynamikmesssystem eingesetzt. Zur belastbaren Ableitung einer Anforderung an das Validierungskriterium in Form einer maximalen lateralen Abweichung zwischen Messwert und Modellwert wurde in Kapitel 4.2 eine Methodik zur Bewertung der Genauigkeit der Systeme vorgestellt. Aus der Anwendung der Bewertungsmethodik folgte die Anforderung an die Trajektorienprädiktion einer lateralen Abweichung kleiner 0.5 m. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde die Datenerhebungsphase sowie die Datenvorverarbeitung detailliert erarbeitet. Die Versuchsgeländestudie auf abgesperrtem Gelände wurde vorgestellt und die für die Entwicklung essenziellen Bewertungskurven wurden eingeführt. Hierbei handelt es sich um synthetische Kurven mit einem konstanten Radius von $R = 12$ m, die eine gute Eignung zur getrennten Untersuchung der einzelnen Kurvenprimitive der Kurvenein- und Kurvenausleitung sowie der stationären Kurvenfahrt zeigten. Ein zusätzliches Manöver zur Untersuchung dynamischer Kurvenübergänge, sowie eine weitere Kurve zur Untersuchung der Übertragbarkeit in den Realverkehr wurden eingeführt. Im Gegensatz zu den beiden anderen synthetischen Kurven besteht bei der Realfahrt-Übertragbarkeitskurve eine bauliche Ähnlichkeit mit Kurven im Realverkehr.

Insbesondere in der Kurveneinleitung und Kurvenausleitung werden Kurven im Straßenverkehr mit stetigen Krümmungsübergängen geplant und gebaut, so dass keine abrupten Richtungswechsel zum Durchfahren notwendig sind. In diese Kurve wurde zusätzlich ein sogenanntes Anomalieereignis integriert. Hierdurch ließ sich für die Wiederholbarkeitsuntersuchung eine Abweichung zum typischen Verhalten provozieren.

Im Kapitel der Datenvorverarbeitung wurde die Normierung der Daten in den sogenannten Kurvenfortschrittsbereich durchgeführt. Hierdurch wurden wiederholte Durchfahrten derselben Kurve besser vergleichbar gemacht. Die Anforderung der minimal notwendigen Abstrakte der Messtechnik wurde abgeleitet. Im Zusammenhang mit der Segmentierung wurde ein allgemein anwendbarer Ansatz zur Segmentierung einer beliebigen Strecke dargestellt. Diese wurde durch eine Metrik zur Bewertung der einzelnen Kurvensegmente hinsichtlich der Dynamik, der Konstanz und der Symmetrie erweitert. Die drei Bewertungsgrößen geben einen guten Eindruck über eine vorausliegende Kurve sowie einer möglichen Herausforderung beim Durchfahren des Segments.

In Kapitel 5 wurde die Modellbildung durchgeführt. Zur Definition des Designs und der Anforderungen an das Modell wurde eine Schwellwertuntersuchung und eine Wiederholbarkeitsbetrachtung durchgeführt. Diese zeigt eine gering streuende Wiederholbarkeit und Abbildung fahrerspezifischer Grenzwerte in den Verläufen von Rollwinkel und Geschwindigkeit, betrachtet über den Kurvenverlauf hinweg. Somit wurde die Abbildbarkeit dieser Zusammenhänge als Modellanforderung definiert. Bei der Untersuchung zeigte sich ein erster Zusammenhang zwischen dem Ort des Beginns der Kurvenausleitung und wiederholbar kleinen Streuungen um diesen Bereich. Die Modellanforderungen wurden im nächsten Abschnitt in mathematische Ansatzfunktionen überführt. Für jedes sogenannte Primitiv, also die dynamische Kurveneinleitung, die quasistationäre Haltephase, die Kurvenausleitung und den dynamischen Kurvenübergang wurden Ansatzfunktionen gesucht, die das typische menschliche Verhalten als Regler der Motorradfahrt berücksichtigen. Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung bei sogenannten Sigmoid- oder auch Wachstumsfunktionen für die dynamischen Phasen und einer linearen Regression mit zwei überlagerten Schwingungen für die stationäre Phase. Ausgehend von einer parametrischen Beschreibbarkeit der Rollwinkel- und Geschwindigkeitsverläufe wurde eine Methode zur Berechnung der zukünftigen Position erarbeitet. Hierfür wurde unter einer korrigierten Annahme der stationären Kurvenfahrt, also dem Kräfteausgleich zwischen den Querkräften am Reifen und der Fliehkraft am Schwerpunkt aufgrund der Kurvenfahrt, eine Gierwinkelschätzung durchgeführt. Die durch die Annahme des Stationärzustandes entstehenden Abweichungen wurden über einen Korrekturterm reduziert. Gleichzeitig bieten die Korrekturfaktoren eine zusätzliche Interpretationsmöglichkeit der Fahrerposition oder auch der Messgenauigkeit des Gierwinkelsignals. Für die Berechnung der zukünftigen Position muss eine Rücktransformation aus dem Kurvenfortschritt in den Zeitbereich erfolgen.

Kapitel 6 behandelt ausführlich die Verifikation und Validierung des Modells. Für die Verifikation wurde eine Parameteranalyse durchgeführt, die einzelnen dynamischen und stationären Primitive wurden getrennt untersucht. Es wurde analysiert, ob die entsprechenden

Koeffizienten der mittels Optimierung ermittelten Größen die aus den Anforderungen resultierende Fahrerspezifität und Wiederholbarkeit hinreichend abbilden. Es zeigt sich, dass insbesondere die stationäre Kurvenfahrt hohe fahrerspezifische Anteile aufweist. Ein erster Zusammenhang zwischen der Streuung in Frequenz und Amplitude in dieser Phase wurde aufgezeigt. Fahrer mit geringer Fahrerfahrung neigen zu größeren Korrekturamplituden und niedrigeren Frequenzen, während dies bei erfahrenen Fahrern umgekehrt ist. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Literatur¹⁴³.

Im letzten Abschnitt der Validierung erfolgte eine Validierung des Modells mit der gewählten Anforderung der höheren Modellgenauigkeit als der Messgenauigkeit über dem gesamten Manöver für die Einzelkurvenmanöver. Bei dynamischen Kurvenübergängen konnte bis zur Kurvenüberleitung auf abgesperrtem Gelände Validität nachgewiesen werden.

Abschließend wurde im Ausblick eine erste prototypische Erprobung des Modells im Straßenverkehr vorgestellt. Die lateralen Abweichungen bei der Berechnung der Trajektorie sind größer als auf dem abgesperrten Gelände und nicht innerhalb der Messtoleranz des genutzten Low-Cost Messsystems. Die sich aus diesem Ergebnis ergebenden offenen Forschungsfragen wurden aufgezeigt.

¹⁴³ Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020).

A Anhang

A.1 Honda NC 700

Tabelle A-1: Technische Daten der Honda NC 700 X

<i>Eigenschaft</i>	<i>Wert</i>
<i>Länge</i>	2210 mm
<i>Breite</i>	830 mm
<i>Höhe</i>	1285 mm
<i>Radstand</i>	1540 mm
<i>Sitzhöhe</i>	830 mm
<i>Bereifung vorne</i>	120/70-17
<i>Bereifung hinten</i>	160/60-17
<i>Lenkkopfwinkel</i>	63,0°
<i>Federweg vorne/hinten</i>	154 / 150 mm
<i>Gewicht vollgetankt</i>	218 kg

A.2 Kurven Bewertungsmetrik

A.2.1 Tabelle Übersicht der Kurvenparameter der Validierungsstrecke

Tabelle A-2: Übersicht der Kurvenparameter der Validierungsstrecke

Segment-Nr.	seg_s in m	$\sum \kappa$ in rad	$\frac{\sum \kappa}{seg_s}$ in rad/m	\bar{R} in m	$\frac{seg_s}{\bar{R}}$ in /	$\Delta\psi$ in $^\circ$
1	100.00	0.03	3.10E-04	475.45	0.21	17.78
2	30.00	0.00	1.13E-04	2532.47	0.01	1.94
3	280.00	0.07	2.59E-04	583.68	0.48	41.61
4	20.00	0.00	1.64E-04	4328.64	0.00	1.88
5	100.00	0.04	4.12E-04	278.76	0.36	23.59
6	160.00	0.04	2.57E-04	436.99	0.37	23.60
7	10.00	0.00	3.25E-04	2170.99	0.00	1.86
8	140.00	0.04	2.59E-04	459.37	0.30	20.80
9	150.00	0.02	1.34E-04	1094.21	0.14	11.55
10	380.00	0.11	2.97E-04	981.88	0.39	64.70
11	100.00	0.02	2.46E-04	489.01	0.20	14.12
12	90.00	0.04	4.10E-04	237.50	0.38	21.13
13	270.00	0.12	4.50E-04	308.73	0.87	69.69
14	50.00	0.00	5.50E-05	3263.46	0.02	1.58
15	210.00	0.09	4.47E-04	214.36	0.98	53.80
16	220.00	0.17	7.61E-04	132.14	1.66	95.93
17	110.00	0.05	4.12E-04	518.18	0.21	25.99
18	20.00	0.01	2.80E-04	1559.73	0.01	3.21
19	170.00	0.07	4.07E-04	441.84	0.38	39.65
20	90.00	0.10	1.09E-03	171.63	0.52	56.21
21	50.00	0.01	2.43E-04	461.63	0.11	6.97
22	150.00	0.04	2.41E-04	475.07	0.32	20.68
23	310.00	0.07	2.25E-04	727.17	0.43	39.93
24	170.00	0.08	4.70E-04	176.26	0.96	45.74
25	210.00	0.24	1.14E-03	72.90	2.89	137.22
26	130.00	0.19	1.44E-03	66.85	1.95	107.12
27	280.00	0.10	3.63E-04	521.32	0.54	58.25
28	200.00	0.05	2.26E-04	431.18	0.46	25.88
29	80.00	0.01	1.50E-04	733.87	0.11	6.86
30	30.00	0.00	4.47E-05	3408.83	0.01	0.77
31	190.00	0.15	7.70E-04	703.36	0.27	83.78
32	140.00	0.14	9.83E-04	893.81	0.16	78.87
33	20.00	0.00	7.36E+08	27878.88	0.00	0.08

A.2.2 Herleitung des Grenzwerts für Dynamik Bewertung

Nach den in Kapitel 4.3 definierten Anforderungen werden in dieser Dissertation Kurven mit den folgenden Kenngrößen näher untersucht: $R \leq 100 \text{ m}$; $\Delta\psi \geq 90^\circ$. Nach der Normierung aus Kapitel 4.4.3 besteht die Beziehung $\Delta\psi = \sum \kappa$ woraus sich mit der Segmentlänge seg_S Formel (A.1) ergibt:

$$\frac{\sum \kappa}{^{seg_S}} = \frac{\Delta\psi}{^{seg_S}} \quad (\text{A.1})$$

Unter Berücksichtigung der Klothoidenform bei der Planung von Kurven im Straßenbau mit folgender Vorgabe:¹⁴⁴

$$\frac{R}{3} \leq A \leq R \quad (\text{A.2})$$

Mit dem Klothoidenparameter A und dem Kurvenradius R ergibt sich hieraus für eine Kurve mit den geforderten Parametern eine Winkeländerung von $3,15^\circ \leq \Delta\psi \leq 28^\circ$ ¹⁴⁴ in der Einleitungs- und Ausleitungsphase. Der Klothoidenparameter gibt an, wie schnell der Übergang aus der Geradeausfahrt bis zur maximalen Krümmung der Kurve über der Streckenlänge umgesetzt ist. Die hier angenommene Kurve besteht in der Minimalform aus einer Klothoide in der Kurveneinleitung bis zur maximalen Krümmung und einer direkt angehängten Klothoide für die Kurvenausleitung. Dies ergibt für einen Kurvenradius von $R = 100 \text{ m}$ und einem Kurvenwinkel $\Delta\psi \geq 90^\circ$ eine Streckenlänge von $^{seg_S} = 259 \text{ m}$ bei $A = R$. Berechnet wird dies anhand einer Kurvenwinkeländerung von $\Delta\psi = 2 \cdot 28^\circ$ die über die Klothoidenform abgedeckt ist und einer Streckenlänge von $^{seg_S} = 2R$ entspricht. Hinzu kommt eine Kreisbahnförmige Bewegung mit einer Winkeländerung von $\Delta\psi = 90^\circ - 2 \cdot 28^\circ = 34^\circ$ was einer zusätzlichen Strecke von $59,3 \text{ m}$ entspricht. Hieraus ergibt sich für die Dynamik ein Wert von $\frac{\sum \kappa}{^{seg_S}} = 6,06 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}$. Bei einer Wahl von $A=R/3$ erhält man auf dieselbe Weise einen Wert von $\frac{\sum \kappa}{^{seg_S}} = 9,86 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}$. Als Minimalanforderung an den Wert der Dynamik wird der kleinere Wert mit der geringeren Gesamtdynamik gewählt und gerundet weiterverwendet. In anderen Anwendungsfällen kann auch der obere Schwellwert von $9,86 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}$ als Bewertungskriterium genutzt werden.

¹⁴⁴ Hartkopf, G.; Weise, G.: Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (2012), S. 37.

A.3 Reifenkräfte aus Korrekturfaktoren

Im folgenden Abschnitt wird gesondert auf den Einfluss des Teilsystems der Umgebung auf mögliche, zusätzliche Modellergebnisse in Form des Reibwertes eingegangen. Zunächst erfolgt eine Betrachtung der verzögerungsfreien Kurvenfahrt, bei welcher insbesondere der Einfluss des Reibwertes auf die Rollraten und Rollbeschleunigungen, untersucht wird. Anschließend werden die Reifenkräfte und der notwendige Reibwert für den Fall der Kurvenbremsung betrachtet.

A.3.1 Kurvenfahrt ohne Längsdynamik

Der Reibwertkoeffizient zwischen Fahrbahn und Straße stellt einen Schwellwert des Übergangs zwischen einem haftenden und einem rutschenden Reifen dar. Der erforderliche Reibwert ergibt sich bei unbeschleunigter Fahrt nach Seiniger¹⁴⁵ aus dem Verhältnis von Seiten- und Normalkraft am Reifenaufstandspunkt (F_S bzw. F_N). Formel (A.3) verdeutlicht, wie sich der erforderliche Reibungskoeffizient μ_{erf} zusammensetzt. Als Grundannahme dient hierbei die Betrachtung des Motorrades als inverses Pendel.

$$\mu_{erf} = \frac{|F_S|}{F_N} = \frac{|\ddot{y} - \sin(\varphi) \cdot h \cdot \dot{\varphi}^2 + \cos(\varphi) \cdot h \cdot \ddot{\varphi}|}{g - \cos(\varphi) \cdot h \cdot \dot{\varphi}^2 - \sin(\varphi) \cdot h \cdot \ddot{\varphi}} \quad (\text{A.3})$$

Hierbei ist \ddot{y} die Querbeschleunigung des Massenpunktes in horizontale y-Richtung, φ der Rollwinkel, $\dot{\varphi}$ die Rollrate, $\ddot{\varphi}$ die Rollbeschleunigung, g die Gravitation und h die SP-Höhe im aufgerichteten Fahrzeugzustand. Abbildung A-1: verdeutlicht den Zusammenhang und zeigt die wirkenden Kräfte inklusive Trägheitskräften und der Gewichtskraft nach dem Prinzip von d'Alambert.

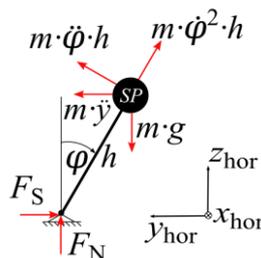


Abbildung A-1: Motorrad als inverses Pendel nach Seiniger¹⁴⁵

¹⁴⁵ Seiniger, P.: Dissertation, Ungebremste Motorrad Kurvenunfälle (2009), S. 31.

Die Trägheitskraft $m\ddot{y}$ stellt die wirkende Fliehkraft aufgrund der Kurvenfahrt dar und ist somit von der Beschleunigung des Schwerpunktes abhängig. Die übrigen eingezeichneten Trägheitskräfte beziehen sich auf die relative Bewegung des Schwerpunktes zum Reifenaufstandspunkt im horizontierten System. Zur Berechnung der benötigten Seitenkraft wird die Bewegungsgleichung der Punktmasse mit Hilfe der Kinematik eines Starrkörpers aufgestellt. Unter Berücksichtigung der Beschleunigung eines Körperpunktes mit bewegtem Bezugssystem¹⁴⁶ errechnet sich der benötigte Reibungskoeffizient gemäß Formel (A.4).

$$\begin{aligned} \mu_{\text{erf}} &= \frac{|F_S|}{F_N} = \frac{|-{}^{\text{hor}}F_y|}{{}^{\text{hor}}F_z} \\ &= \frac{|-{}^{\text{hor}}\dot{\psi}^2 \cdot (\text{sign}({}^{\text{hor}}\dot{\psi}) \cdot R + \sin(\varphi) \cdot h) + \ddot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) \cdot h - \sin(\varphi) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot h|}{g - \cos(\varphi) \cdot h \cdot \dot{\varphi}^2 - \sin(\varphi) \cdot h \cdot \ddot{\varphi}} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Hierbei ist ${}^{\text{hor}}\dot{\psi}$ die horizontierte Gierrate und R der Kurvenradius. Aus (A.4) lässt sich in zwei Schritten ein Kennfeld der dynamischen Größen des Rollwinkels in Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten aufstellen.

Der erforderliche Reibungskoeffizient bei der dynamischen Kurvenfahrt wird beschrieben durch Formel (A.3).

Die Beschleunigung eines Körperpunktes im bewegten Bezugssystem¹⁴⁶ errechnet sich gemäß Formel (A.5).

$${}^{\text{hor}}\underline{a}_{\text{SP}} = \begin{pmatrix} {}^{\text{hor}}a_{\text{SP}_x} \\ {}^{\text{hor}}a_{\text{SP}_y} \\ {}^{\text{hor}}a_{\text{SP}_z} \end{pmatrix} = {}^{\text{hor}}\underline{a}_Q + {}^{\text{hor}}\underline{\alpha} \times {}^{\text{hor}}\underline{\rho}_{Q \rightarrow S} + {}^{\text{hor}}\underline{\omega} \times ({}^{\text{hor}}\underline{\omega} \times {}^{\text{hor}}\underline{\rho}_{Q \rightarrow S}) \quad (\text{A.5})$$

Hierbei ist ${}^{\text{hor}}\underline{a}_{\text{SP}}$ die absolute horizontierte SP-Beschleunigung im horizontierten System, ${}^{\text{hor}}\underline{a}_Q$ die Beschleunigung des Ursprungs des horizontierten Systems relativ zum Inertialsystem, ${}^{\text{hor}}\underline{\rho}_{Q \rightarrow S}$ der Verbindungsvektor vom Reifenaufstandspunkt zum SP, ${}^{\text{hor}}\underline{\omega}$ die Rotationsgeschwindigkeit und ${}^{\text{hor}}\underline{\alpha}$ die Rotationsbeschleunigung des Fahrzeuges. Alle Bewegungsgrößen sind im horizontierten System dargestellt. ${}^{\text{hor}}\underline{a}_Q$ wird gemäß Formel (A.6) definiert, angelehnt am Beschleunigungsvektor in Polarkoordinaten und transformiert¹⁴⁷ in das horizontierte System.

$${}^{\text{hor}}\underline{a}_Q = \begin{pmatrix} a_{Q_x} \\ a_{Q_y} \\ a_{Q_z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cdot {}^{\text{hor}}\ddot{\psi} + 2 \cdot \dot{R} \cdot \dot{\psi} \\ -\ddot{R} + R \cdot {}^{\text{hor}}\dot{\psi}^2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

¹⁴⁶ Das horizontierte KS- bewegt sich mit dem Fahrzeug

¹⁴⁷ Einheitsvektor des Radius zeigt in entgegengesetzte Richtung der horizontierten y-Achse.

Hierbei steht R für den Kurvenradius mit entsprechenden Ableitungen und ψ für den Gierwinkel mit entsprechenden Ableitungen¹⁴⁸. Zur besseren Übersichtlichkeit werden im Folgenden die Indizes der Gierraten Gierbeschleunigungen und Rollraten Rollbeschleunigungen nicht mit dargestellt. In diesem Fall beziehen sich diese Größen auf das horizontierte System.

Die Rotationsbeschleunigung ${}^{\text{hor}}\underline{\alpha}$ des Körpers errechnet sich über die relative Zeitableitung gemäß Formel (A.7).

$${}^{\text{hor}}\underline{\alpha} = \begin{pmatrix} \ddot{\varphi} \\ 0 \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{\varphi} \\ \dot{\varphi} \cdot \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Der Verbindungsvektor vom Reifenaufstandspunkt zum SP im horizontierten System ergibt sich nach (A.8).

$${}^{\text{hor}}\underline{\rho}_{Q \rightarrow S} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{pmatrix} \cdot h \quad (\text{A.8})$$

Nach Einsetzen der Werte (A.5), (A.6), (A.7) und (A.8) in (A.4) ergibt sich (A.9).

$$\begin{aligned} {}^{\text{hor}}\underline{a}_{\text{SP}} = & \begin{pmatrix} R \cdot \ddot{\psi} + 2 \cdot \dot{R} \cdot \dot{\psi} \\ -\ddot{R} + R \cdot \dot{\psi}^2 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \ddot{\varphi} \\ \dot{\varphi} \cdot \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{pmatrix} \cdot h \\ & + \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \times \left(\begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{pmatrix} \cdot h \right) \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Unter der Annahme, dass die zweite Ableitung der Kurvenradien \ddot{R} gering ist ergeben sich für ${}^{\text{hor}}a_{\text{SP}_y}$ und ${}^{\text{hor}}a_{\text{SP}_z}$ die Zusammenhänge gemäß (A.10) und (A.11).

$$\begin{aligned} {}^{\text{hor}}a_{\text{SP}_y} = & +R \cdot \dot{\psi}^2 - \ddot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) \cdot h + \sin(\varphi) \cdot (\dot{\varphi}^2 + \dot{\psi}^2) \cdot h \\ = & \dot{\psi}^2 \cdot (\text{sign}(\dot{\psi}) \cdot R + \sin(\varphi) \cdot h) - \ddot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) \cdot h + \sin(\varphi) \\ & \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot h \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

$${}^{\text{hor}}a_{\text{SP}_z} = -\ddot{\varphi} \cdot \sin(\varphi) \cdot h - \cos(\varphi) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot h \quad (\text{A.11})$$

¹⁴⁸ Die Ableitungen der Lagewinkel führt im 2-dimensionalen Fall direkt zu Drehraten und Beschleunigungen.

Ein Aufstellen des Schwerpunktsatzes und Einsetzen der zuvor beschriebenen Beschleunigungen ergibt, nachdem nach dem Reibungskoeffizienten aufgelöst wurde, den folgenden Zusammenhang.

$$\begin{aligned}
 \mu_{\text{erf}} &= \frac{|F_S|}{F_N} = \frac{|-{}^{\text{hor}}F_y|}{{}^{\text{hor}}F_z} \\
 &= \frac{|-m \cdot {}^{\text{hor}}a_{\text{SP}_y}|}{m \cdot {}^{\text{hor}}a_{\text{SP}_z} + mg} \\
 &= \frac{|-\dot{\psi}^2 \cdot (\text{sign}(\dot{\psi}) \cdot R + \sin(\varphi) \cdot h) + \ddot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) \cdot h - \sin(\varphi) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot h|}{g - \cos(\varphi) \cdot h \cdot \dot{\varphi}^2 - \sin(\varphi) \cdot h \cdot \ddot{\varphi}}
 \end{aligned} \tag{A.12}$$

Der Vergleich der Formel (A.12) mit (A.4) zeigt, dass die auf den Körper aufgrund der Kurvenfahrt wirkende Zentrifugalkraft abhängig vom effektiven Kurvenradius ist, welcher sich schräglagenabhängig verändert.

$$\begin{aligned}
 \ddot{y} &= -{}^{\text{hor}}\dot{\psi}^2 \cdot \underbrace{(\text{sign}({}^{\text{hor}}\dot{\psi}) \cdot R + \sin(\varphi) \cdot h)}_{\text{effektiver Kurvenradius}} = -{}^{\text{hor}}\dot{\psi}^2 \cdot R_{\text{eff}} \\
 \ddot{y} &= -{}^{\text{hor}}\dot{\psi}^2 \cdot R_{\text{eff}} = f({}^{\text{hor}}\dot{\psi}, R, \varphi, h) \\
 &= -\frac{v^2}{R_{\text{eff}}} = -\frac{v^2}{(\text{sign}({}^{\text{hor}}\dot{\psi}) \cdot R + \sin(\varphi) \cdot h)} \\
 &= -\frac{v^2}{(\text{sign}(-\varphi) \cdot R + \sin(\varphi) \cdot h)}
 \end{aligned} \tag{A.13}$$

Die Beschleunigung \ddot{y} ist von der Gierrate (${}^{\text{hor}}\dot{\psi}$), dem Rollwinkel (φ), dem Kurvenradius (R) und der SP-Höhe (h) abhängig. Dynamische Größen der Rollbewegung besitzen keinen Einfluss. Der Betrag der Seitenkraft ($|F_S|$) in Formel (A.12) wird mathematisch mit Hilfe einer Fallunterscheidung abgebildet. Diese führt zu dem in Formel (A.15) definierten Zusammenhang für die maximal möglichen Rollbeschleunigungen $\ddot{\varphi}_{I,II}$.

$$\begin{aligned}
 &\ddot{\varphi}_{I,II} \\
 \leq &\frac{\left(\mp \frac{v^2}{(\text{sign}(-\varphi) \cdot R + \sin(\varphi) \cdot h)} \right) \mp \sin(\varphi) \dot{\varphi}^2 \cdot h - \mu \cdot g + \mu \cdot \cos(\varphi) \cdot h \cdot \dot{\varphi}^2}{-\mu \cdot \sin(\varphi) \cdot h \mp \cos(\varphi) \cdot h}
 \end{aligned} \tag{A.14}$$

$$\begin{aligned}
 \ddot{\varphi}_1 &= \{\ddot{\varphi} \mid \ddot{\varphi} \in \ddot{\varphi}_1 \wedge F_S(\ddot{\varphi}_I) > 0\} \\
 \ddot{\varphi}_2 &= \{\ddot{\varphi} \mid \ddot{\varphi} \in \ddot{\varphi}_2 \wedge F_S(\ddot{\varphi}_{II}) < 0\}
 \end{aligned}$$

Das Kennfeld wird in zwei Stufen aufgebaut. Im ersten Schritt wird von einer nicht vorhandenen Rollbeschleunigung ausgegangen, sodass sich die maximale Rollrate nach Formel (A.15) ergibt.

$$\dot{\varphi}_{I,II}^2 \leq \frac{\left(\mp \frac{v^2}{(\text{sign}(-\varphi) \cdot R + \sin(\varphi) \cdot h)} \right) - \mu \cdot g}{\pm \sin(\varphi) \cdot h - \mu \cdot \cos(\varphi) \cdot h} \quad (\text{A.15})$$

$$\dot{\varphi}^2 = \{\dot{\varphi}^2 \mid \dot{\varphi}^2 \in \dot{\varphi}_I^2 \wedge F_S(\dot{\varphi}_I^2) > 0 \vee \dot{\varphi}^2 \in \dot{\varphi}_{II}^2 \wedge F_S(\dot{\varphi}_{II}^2) < 0\}$$

Bei Berücksichtigung des Zusammenhanges zwischen Rollwinkel φ , Geschwindigkeit v und Kurvenradius R mittels stationären Zusammenhangs vereinfachen sich Ausdrücke gemäß Formel (A.16) und (A.17).

$$\dot{\varphi}_{I,II}^2 \leq \frac{\tan(\varphi) \cdot g - \mu \cdot g}{\pm \sin(\varphi) \cdot h - \cos(\varphi) \cdot \mu \cdot h} \quad (\text{A.16})$$

$$\dot{\varphi}^2 = \{\dot{\varphi}^2 \mid \dot{\varphi}^2 \in \dot{\varphi}_I^2 \wedge F_S(\dot{\varphi}_I^2) > 0 \vee \dot{\varphi}^2 \in \dot{\varphi}_{II}^2 \wedge F_S(\dot{\varphi}_{II}^2) < 0\}$$

$$\ddot{\varphi}_{I,II} \leq \frac{\pm \tan(\varphi) \cdot g \mp \sin(\varphi) \dot{\varphi}^2 \cdot h - \mu \cdot g + \mu \cdot \cos(\varphi) \cdot h \cdot \dot{\varphi}^2}{-\mu \cdot \sin(\varphi) \cdot h \mp \cos(\varphi) \cdot h}$$

$$\ddot{\varphi}_1 = \{\ddot{\varphi} \mid \ddot{\varphi} \in \ddot{\varphi}_1 \wedge F_S(\ddot{\varphi}_1) > 0\}$$

$$\ddot{\varphi}_2 = \{\ddot{\varphi} \mid \ddot{\varphi} \in \ddot{\varphi}_2 \wedge F_S(\ddot{\varphi}_{II}) < 0\}$$
(A.17)

Abbildung A-2 zeigt die Rollratengrenzen für verschiedene Parametervariationen. Bei Vorgabe eines Reibungskoeffizienten ergeben sich aus der Bedingung der stationären Kurvenfahrt die theoretischen Rollwinkelgrenzen. Fälle, dass diese Grenzen bei entsprechenden Rollraten und Beschleunigungen auch überschritten werden können, sind nicht Teil dieser Betrachtung. Werden die Rollwinkel innerhalb der Rollwinkelgrenzen in (A.16) eingesetzt, entsteht ein Kennfeld, welches die maximal möglichen Rollraten im vorgegebenem Rollwinkelbereich darstellt.

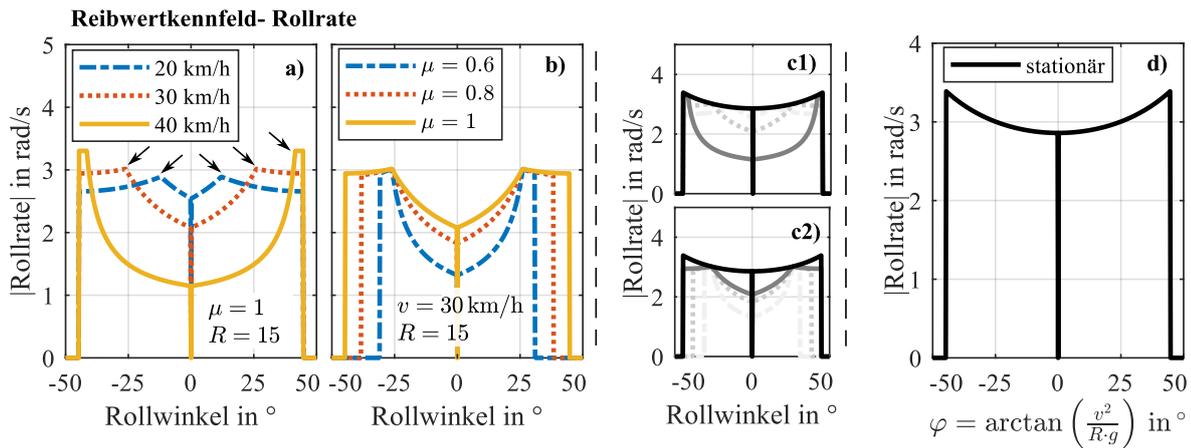


Abbildung A-2 Reibwertbedingte Rollratengrenzen

In Abbildung A-2(a) sind die maximalen Rollraten über dem Rollwinkel für verschiedene Fahrzeuggeschwindigkeiten bei einem konstanten Reibungskoeffizienten und Kurvenradius dargestellt. Bei Betrachtung einer konstanten Geschwindigkeit steigt die Rollratengrenze bei betragsmäßiger Rollwinkelzunahme zunächst an und verringert sich nach einem lokalen Maximum (siehe Pfeil) wieder. Mit zunehmenden Geschwindigkeiten steigen die Maximalwerte (Knickpunkte) der Rollratengrenzen. Bei Variation des Reibungskoeffizienten und Konstanthaltung von Kurvenradius und Geschwindigkeit erweitert sich der potentielle Rollwinkelbereich (b). Die Maximalwerte der Rollratengrenze (Knickpunkte) variieren nicht. Es wird deutlich, dass es sich bei dieser Betrachtung um eine mathematisch-theoretische Momentaufnahme handelt, da die Vorgabe von Kurvenradius und Geschwindigkeit keinen direkten Bezug zu den Rollwinkeln besitzen. Unter Berücksichtigung des (notwendigen) Rollwinkels, vereinfachend über den bekannten stationären Zusammenhang abgebildet, ergeben sich die Kennfelder c) und d). Hierbei zeigt sich, dass die lokalen Maxima (Knickpunkte) von a) und b) auf der Einhüllenden liegen, welche den fahrphysikalischen Zusammenhang zwischen Rollwinkel und Kurvenradius berücksichtigt. Sofern sich der Rollwinkel in der Realität in der Nähe des Bereiches befindet, welcher anhand der stationären Kurvenfahrt abbildbar ist, vereinfacht sich das Kennfeld zu d). Es ist zu beobachten, dass die betragsmäßigen Rollratengrenzen (d)) mit wachsendem Rollwinkel steigen. Die Erhöhung der Rollratengrenze basiert auf zwei Effekten. Einerseits wird die Reifennormalkraft bei größeren Rollwinkeln weniger stark durch die Zentrifugalkraft der Rollrate ($m \cdot h \cdot \dot{\varphi}^2$) verringert und

andererseits erfolgt eine Reduktion der notwendigen Seitenführungskraft. Beide Effekte verringern den Reibwertbedarf, was sich in Form der zunehmenden Rollratengrenze widerspiegelt.

Wird das Kennfeld um die Dimension der Rollbeschleunigung erweitert, ergibt sich das Kennfeld in Abbildung A-3. Der angenommene Reibungskoeffizient beträgt $\mu=1$.

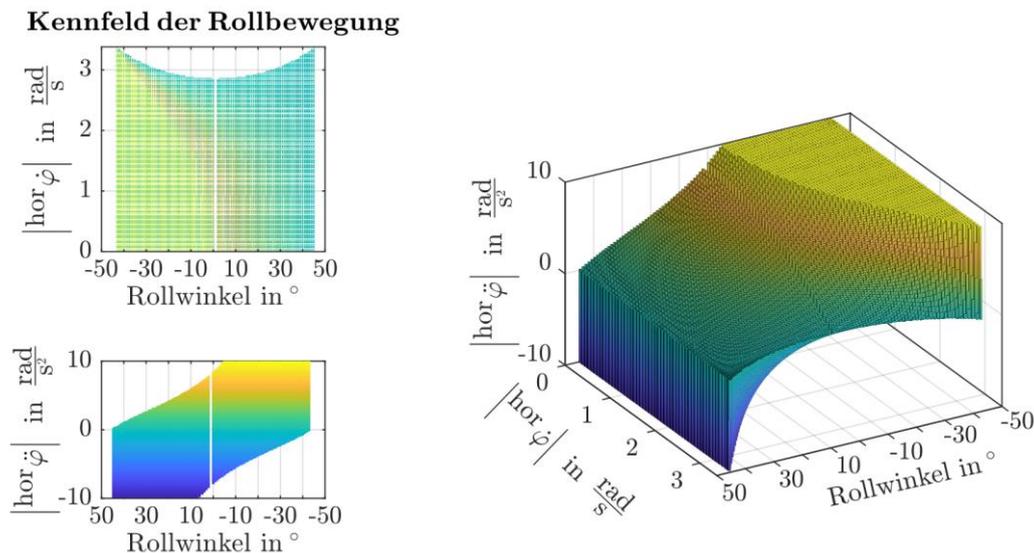


Abbildung A-3 Reibwertabhängige Rollwinkel/-raten/-beschleunigungsgrenzen

Im Gegensatz zur Rollrate liegt eine Richtungsspezifität der Rollbeschleunigungsgrenze vor. Abhängig vom Rollwinkel und der Richtung der Beschleunigung führt die rotatorische Trägheitskraft ($\ddot{\varphi} \cdot m \cdot h$) entweder zu einer Verringerung der Reifennormalkraft (niedrige Beschleunigungsgrenze) oder zu einer Reduktion der notwendigen Seitenkraft (hohe Beschleunigungsgrenze). Die Kennfelder verdeutlichen, dass der Reibungskoeffizient hinsichtlich des Rollwinkels eine relevante Grenze darstellt. Die reibwertbedingten Grenzen der Rollrate und -beschleunigung sind für die Kurvenfahrt ohne Längsdynamik aufgrund ihrer Größe nicht praxisrelevant einschränkend^{149,150}.

A.3.2 Kurvenfahrt mit Längsdynamik

Neben der Kurvenfahrt ohne Geschwindigkeitsänderung stellt insbesondere die Kurvenfahrt mit Übertragung von Längs- und Seitenkräften einen relevanten Fall für den Reibwert dar. Gemäß des Kammschen Kreises (siehe Kapitel 2.2) ergibt sich die gesamte vom Reifen übertragbare Kraft dargestellt im horizontalen System zu:

¹⁴⁹ Maximale Rollrate bei hochdynamischen Fahrstreifenwechsel: $\sim 70^\circ/\text{s}$.

¹⁵⁰ Litschauer, S.; Ecker, H.: Fahrversuche und Analyse des Fahrstreifenwechsels mit Motorrädern (2020), S. 12.

$$F_{\text{Res}} = \sqrt{{}^{\text{hor}}F_x + {}^{\text{hor}}F_y} \quad (\text{A.18})$$

Da die Reifenparameter unbekannt sind, besteht keine Möglichkeit, die Reifendynamik hinsichtlich Einzeleffekten zu betrachten. Vielmehr wird die Fahrphysik und Fahrdynamik, welche weitestgehend fahrzeugunabhängig ist, zur Findung von Grenzen genutzt. Schröter^{151a} definiert Grundgleichungen, mit welchen die Reifenkräfte des Einspurfahrzeuges berechnet werden können. Die entsprechenden Größen sind den folgenden Abbildungen: Abbildung 2-2, Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6 zu entnehmen.

Die Kräfte- und Momentengleichgewichte um den SP bzw. die Reifenaufstandspunkte führen zu den Gleichungen (A.19) und (A.20)¹⁵².

$${}^{\text{hor}}F_{z,\text{ft/rr}} = m \cdot g \cdot \frac{l_{\text{rr/ft}}}{l} \mp m \cdot {}^{\text{hor}}a_x \cdot \frac{h \cdot \cos(\varphi)}{l} \quad (\text{A.19})$$

$${}^{\text{hor}}F_{y,\text{ft/rr}} = m \cdot {}^{\text{hor}}a_y \cdot \frac{l_{\text{rr/ft}}}{l} \pm m \cdot {}^{\text{hor}}a_x \cdot \frac{h \cdot \sin(\varphi)}{l} \quad (\text{A.20})$$

Die Bedeutung der einzelnen geometrischen Größen ist Abbildung A-4 zu entnehmen. Einen Sonderfall stellt die Längskraft an Vorder- und Hinterrad dar. Die Längskraft der Reifen wird anhand von Formel (A.21) modelliert.

$$\begin{aligned} {}^{\text{hor}}F_{x,\text{ft/rr}} &= \tau_{\text{ft/rr}} \cdot m \cdot {}^{\text{hor}}a_x \\ {}^{\text{hor}}a_x > 0 &: \tau_{\text{ft}} = 0 \text{ und } \tau_{\text{rr}} = 1 \\ {}^{\text{hor}}a_x < 0 &: \tau_{\text{ft}} + \tau_{\text{rr}} = 1 \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

Der Parameter τ definiert hierbei die Bremskraftverteilung, welche nur im Verzögerungsfall für eine Aufteilung der Reifenlängskräfte sorgt. Mit Hilfe der beschriebenen Gleichungen besteht die Möglichkeit, die Reifenkräfte für ein gegebenes Manöver zu berechnen. Abbildung A-5 zeigt die berechneten Reifenkräfte für eine beispielhafte Rechtskurve.

¹⁵¹ Schröter, K.: Diss., Bremslenkmomentoptimierte Kurvenbremsung v. Motorrädern (2015), a: -; b: S.29.

¹⁵² Erweiterung d. Gleichungen aus Schröter, K.: Diss., Bremslenkmomentoptimierte Kurvenbremsung v. Motorrädern (2015), S. 234.

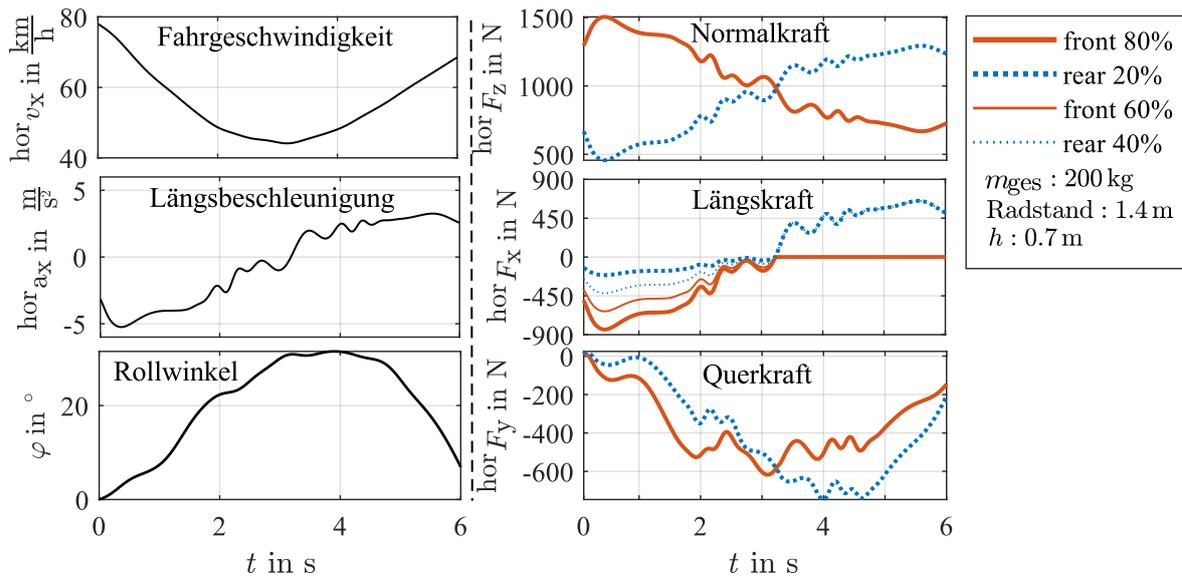


Abbildung A-4 Ergebnis der Reifenkraftberechnung

Die Geschwindigkeit wird vom Fahrer bis zum Kurvenscheitelpunkt verringert, anschließend beschleunigt dieser aus der Kurve heraus. Die auftretenden Normalkräfte an Vorder- und Hinterrad sind komplementär und spiegelsymmetrisch, da der Fahrzeugschwerpunkt mittig vom Radstand angenommen wird. Die auftretenden Reifenlängskräfte ($hor F_{x,ft/rr}$) sind während der Verzögerungsphase negativ. Abhängig von der definierten Bremskraftverteilung ($\tau_{ft/rr}$) variieren die Reifenlängskräfte zwischen Vorder- und Hinterrad (ft bzw. rr). In der anschließenden Beschleunigungsphase werden alle Längskräfte über das Hinterrad übertragen¹⁵³. Bei den Seitenkräften der Reifen ($hor F_{y,ft/rr}$) sind mehrere Phänomene zu beobachten. Zunächst bedingt die Kurvenrichtung das Vorzeichen der Reifenkräfte. Für den vorliegenden Fall der Rechtskurve nehmen die Seitenkräfte negative Werte an. Weiterhin zeigt sich, dass die Seitenkraftbeanspruchung des Vorderrades während der Kurveneinleitung höher ist als die des Hinterrades. Bei Kurvenausleitung ist der umgekehrte Effekt zu beobachten. Ursächlich für die Seitenkraftdiskrepanz zwischen Vorder- und Hinterrad ist der rollwinkelabhängige Hebelarm zwischen Fahrzeug-SP und Reifenaufstandslinie in Kombination mit der Längsbeschleunigung. Dieser Zusammenhang zeigt sich anhand des zweiten Summanden in Formel (A.20).

¹⁵³ Die Rollreibung wird an beiden Rädern vernachlässigt.

A.4 Fahrerkoefizienten Randbedingungen

LI/RI - Wachstumsfunktion

Die gewählte Wachstumsfunktion besitzt Schranken des Wachstums. Hierbei sind die Lösungsbereiche der einzelnen Parameter so zu wählen, dass die Schrankenwerte einerseits interpretierbar und vergleichbar sind und andererseits die erreichbare Approximationsgüte nicht negativ beeinflusst wird. Die gewählten Werte sind in folgender Tabelle dargestellt. Diese wurden iterativ ermittelt und an über 600 Kurvendurchfahrten und acht unterschiedlichen Kurventypen getestet. Die Struktur der Wachstumsfunktion erfordert ein bestimmtes Vorgehen bei der Lösung. Folgende Tabelle verdeutlicht den zulässigen Lösungsbereich der Wachstumsfunktion der Rollwinkelparameter während der Kurvoneinleitung.

Tabelle A-3 Einschränkung des Lösungsraum der Koeffizienten der LI/RI Primitive, Rollwinkel

Rollwinkel in °	Lösungsbereich		Besonderheit	Einheit
	Linkskurve	Rechtskurve		
κ_{\pm}	[-1]	[+1]	Links-/ Rechtskurve	—
a	[0°; 2°]	[0°; 2°]	Schnittpunkt mit y-Achse	°
b	[0; +Inf]	[0; +Inf]	Exponentenkoeffizient	—
c	$[\max(-\varphi - d_1) - 1;$ $\max(-\varphi - d_1) + 1]$	$[\max(\varphi - d_2) - 1;$ $\max(\varphi - d_2) + 1]$		°
d	$d_1 = [\min(-\varphi)]$	$d_2 = [\min(\varphi)]$	Konstante Verschiebung	°

Die Lösungsbereiche der Geschwindigkeitsfunktionen unterscheiden sich und sind in folgender Tabelle dargestellt. Es ist keine Unterscheidung bzgl. der Kurvenrichtung zu treffen, allerdings ist sowohl eine Geschwindigkeitserhöhung als auch Erniedrigung möglich. Die Identifikation des Vorzeichens wird mit Hilfe des Gradienten einer linearen Regression über das Primitiv bestimmt.

Tabelle A-4 Einschränkung des Lösungsraum der Koeffizienten der LI/RI Primitive, Geschwindigkeit

Geschwindigkeit in m/s	Lösungsbereich		Besonderheit	Einheit
	Verzögern	Beschleunigen		
κ_{\pm}	$[-1]$	$[+1]$		–
a	$[0 \frac{m}{s}; 0,4 \frac{m}{s}]$	$[0^{\circ}; 0,4 \frac{m}{s}]$	Schnittpunkt mit y-Achse	$\frac{m}{s}$
b	$[0; +\text{Inf}]$	$[0; +\text{Inf}]$	Exponentenkoeffizient	–
c	$[\max(-v - d_1) - 0,2 \frac{m}{s}; \max(-v - d_1) + 0,2 \frac{m}{s}]$	$[\max(v - d_2) - 0,2 \frac{m}{s}; \max(v - d_2) + 0,2 \frac{m}{s}]$		$\frac{m}{s}$
d	$d_1 = [\min(-v)]$	$d_2 = [\min(v)]$	Konstante Verschiebung	$\frac{m}{s}$

LO/RO - Wachstumsfunktion

Die Grenzen der Wachstumsfunktionen des Rollwinkels der Kurvenausleitung sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle A-5 Einschränkung des Lösungsraum der Koeffizienten der LO/RO Primitive, Rollwinkel

Rollwinkel in °	Lösungsbereich		Besonderheit	Einheit
	Linkskurve	Rechtskurve		
κ_{\pm}	$[+1]$	$[-1]$		–
a	$[0^{\circ}; 2^{\circ}]$	$[0^{\circ}; 2^{\circ}]$	Schnittpunkt mit y-Achse	°
b	$[0; +\text{Inf}]$	$[0; +\text{Inf}]$	Exponentenkoeffizient	–
c	$[\max(\varphi - d_1) - 1; \max(\varphi - d_1) + 1]$	$[\max(-\varphi - d_2) - 1; \max(-\varphi - d_2) + 1]$		°
d	$d_1 = [\min(\varphi)]$	$d_2 = [\min(-\varphi)]$	Konstante Verschiebung	°

Es zeigt sich, dass die Rollwinkelgrenzwerte für die Ausleitung von Links- und Rechtskurve analog zu denen der Kurveneinleitung von Rechts- und Linkskurve sind. Die Geschwindigkeitsgrenzen sind in folgender Tabelle zu sehen.

Tabelle A-6 Einschränkung des Lösungsraum der Koeffizienten der LO/RO Primitive, Geschwindigkeit

Geschwindigkeit in m/s	Lösungsbereich		Besonderheit	Einheit
	Verzögern	Beschleunigen		
κ_{\pm}	$[-1]$	$[+1]$		–
a	$[0 \frac{m}{s}; 0,2 \frac{m}{s}]$	$[0^{\circ}; 0,2 \frac{m}{s}]$	Schnittpunkt mit y-Achse	$\frac{m}{s}$
b	$[0; +\text{Inf}]$	$[0; +\text{Inf}]$	Exponentenkoeffizient	–]
c	$[\max(-v - d_1) - 0,1 \frac{m}{s}; \max(-v - d_1) + 0,1 \frac{m}{s}]$	$[\max(v - d_2) - 0,1 \frac{m}{s}; \max(v - d_2) + 0,1 \frac{m}{s}]$		$\frac{m}{s}$
d	$d_1 = [\min(-v)]$	$d_2 = [\min(v)]$	Konstante Verschiebung	$\frac{m}{s}$

LR/RL-Primitiv

Das LR/RL Primitiv wird wie bereits die Kurvener- und ausleitung mit der logistischen Wachstumsfunktion dargestellt. Die zulässigen Lösungsbereiche der Rollwinkelparameter sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle A-7 Einschränkung des Lösungsraum der Koeffizienten Kurvenübergang, Rollwinkel

Rollwinkel in °	Lösungsbereich		Besonderheit	Einheit
	ReLi	LiRe		
κ_{\pm}	$[+1]$	$[-1]$		–
a	$[0^{\circ}; 2^{\circ}]$	$[0^{\circ}; 2^{\circ}]$	Schnittpunkt mit y-Achse	°
b	$[0; +\text{Inf}]$	$[0; +\text{Inf}]$	Exponentenkoeffizient	–
c	$[\max(\varphi - d_1) - 1; \max(\varphi - d_1) + 1]$	$[\max(-\varphi - d_2) - 1; \max(-\varphi - d_2) + 1]$		°
d	$d_1 = [\min(\varphi)]$	$d_2 = [\min(-\varphi)]$	Konstante Verschiebung	°

Die zulässigen Lösungsbereiche der Geschwindigkeitssignalapproximation sind identisch mit den Grenzen des Geschwindigkeitssignals des LO/RO-Primitives.

A.5 Verifizierung

A.5.1 Zweite überlagerte Schwingung RE-90-30

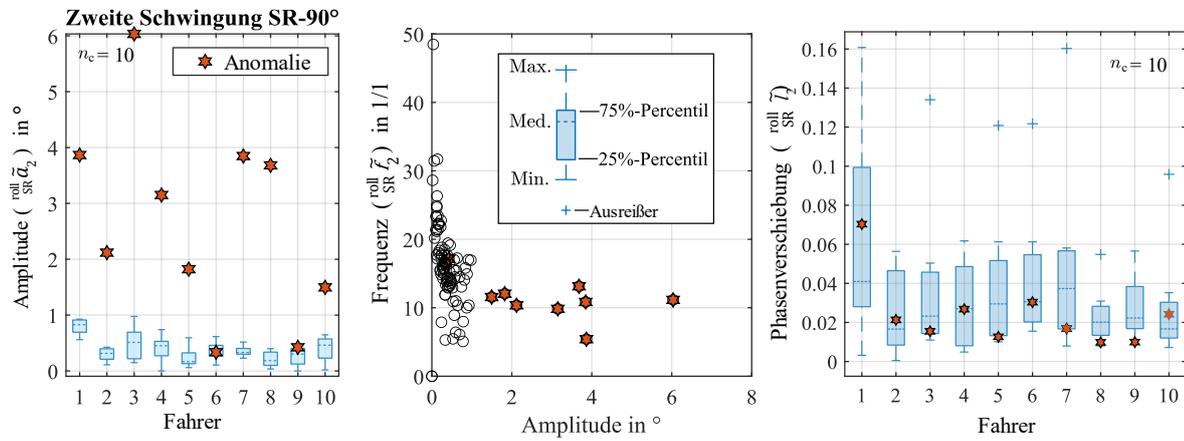


Abbildung A-5 Amplitude einzeln aller 10 Fahrer (links), Frequenz über Amplitude (Mitte), Phasenverschiebung (Rechts) der zweiten überlagerten Schwingung

A.5.2 Rollwinkel Kurvenausleitung RE-90-30

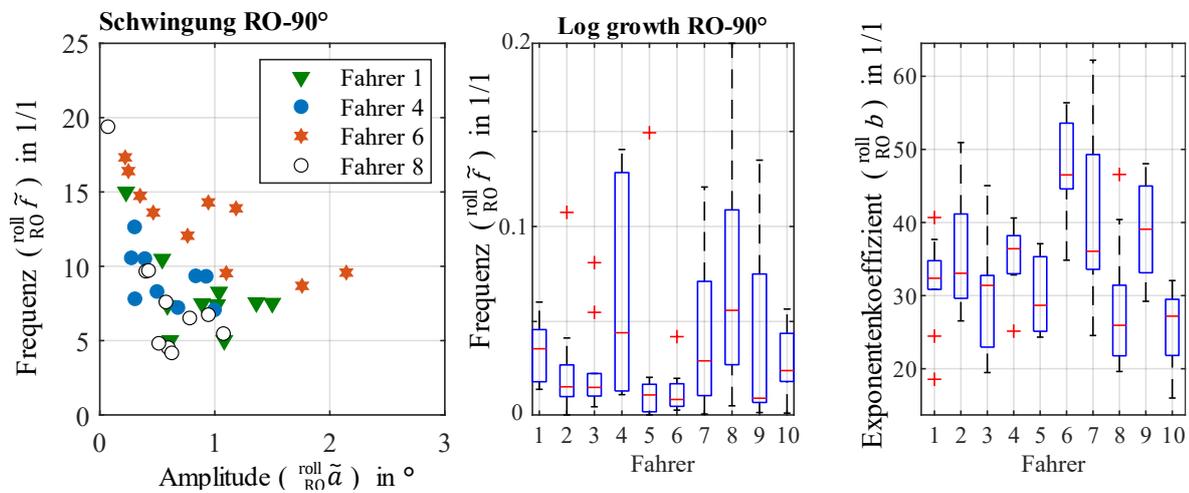


Abbildung A-6 Frequenz über Amplitude (Links), Frequenz je Fahrer, Exponentenkoeffizient der Kurvenausleitung RO in der RE-90-30 Kurve

A.5.3 Geschwindigkeit Kurvenausleitung RE-90-30

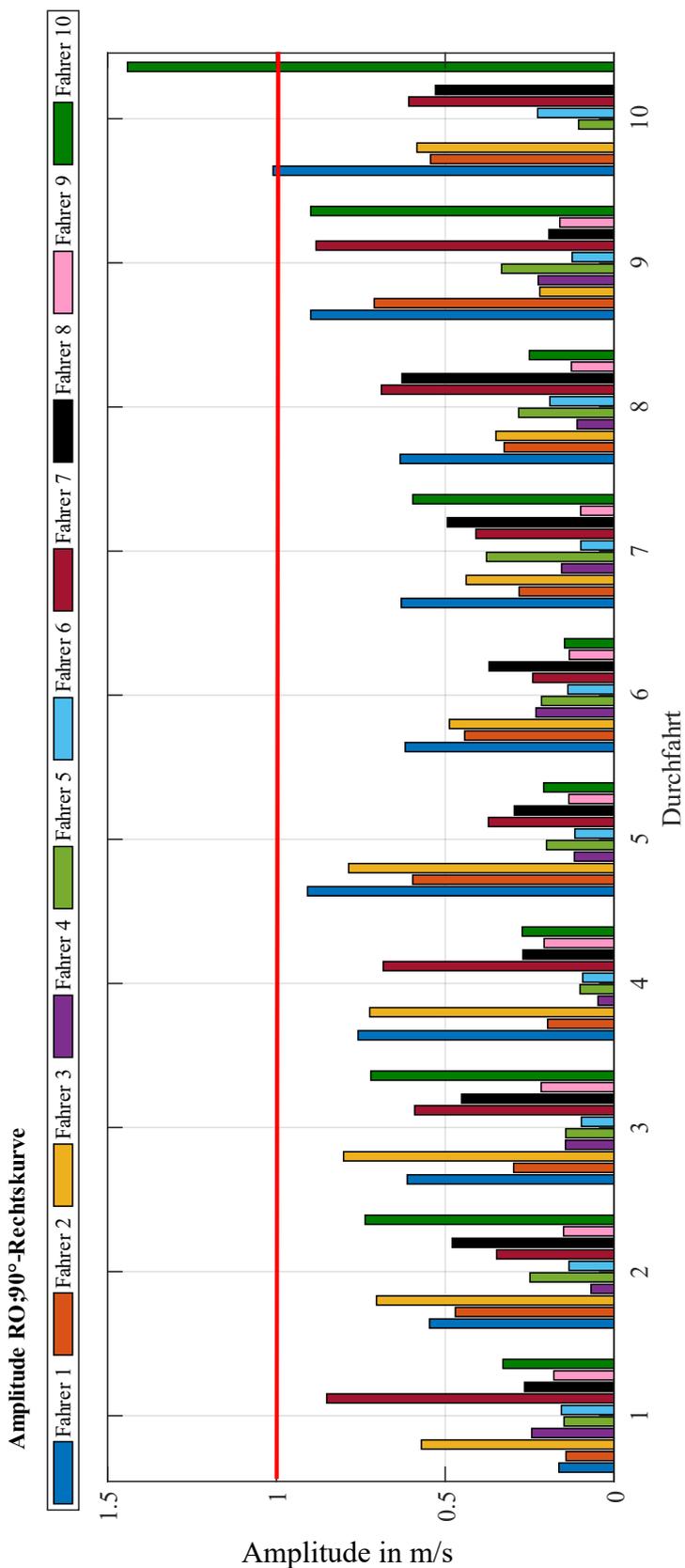


Abbildung A-7 Geschwindigkeitskoeffizienten Amplitude Kurvenausleitung der RE-90-30 Kurve

A.6 Anforderungen an Modell und Datenbasis

Tabelle A-8: Übersicht der Anforderungen an die Modellentwicklung und Datenerfassung

Modell = Mod		
	Allgemein = All	
<i>Anf-Mod-All-1</i>		Keine Notwendigkeit zusätzlicher Messgrößen (außer Rollwinkel und Geschwindigkeit und Positionsdaten)
<i>Anf-Mod-All-2</i>		Anwendbarkeit auf mesoskopischer Ebene
<i>Anf-Mod-All-3</i>		Unabhängigkeit von genutzter Messtechnik
<i>Anf-Mod-All-4</i>		Unterschreitung der Messtoleranz mit der Prozesstoleranz
<i>Anf-Mod-All-5</i>		Unabhängigkeit von $\Delta\psi$
<i>Anf-Mod-All-6</i>		Unabhängigkeit von ΔR
<i>Anf-Mod-All-7</i>		Übertragbarkeit in den Realverkehr
<i>Anf-Mod-All-8</i>		Gering Mögliche Komplexität
	Abbildbarkeit der Fahrer-Spezifität = Fah	
<i>Anf-Mod-Fah-1</i>		Dynamische Änderungen in allen Kurvensegmenten
<i>Anf-Mod-Fah-2</i>		Darstellbarkeit dynamischer Geschwindigkeitsverläufe
<i>Anf-Mod-Fah-3</i>		Darstellbarkeit der Wiederholbarkeit bei Phasenübergängen
<i>Anf-Mod-Fah-4</i>		Abbildung von Korrekturamplituden
<i>Anf-Mod-Fah-5</i>		Dynamik zwischen Start und Endpunkt eines Segmentes
<i>Anf-Mod-Fah-6</i>		Erkennen von Anomalieereignissen
	Güte der berechneten Trajektorie = Tra	

<i>Anf-Mod-Tra-1</i>		Zu Validierungszwecken: Lateraler Fehler < 0.5 m über gesamten Kurvenmanöver
<i>Anf-Mod-Tra-2</i>		Bei Anwendung: Berücksichtigung der Messtoleranz je System
Datenbasis = Dat		
	Anforderungen an Bewertungskurven = Bew	
<i>Anf-Dat-Bew-1</i>		Kurvenradien zwischen $R = 12 - R = 80$ m
<i>Anf-Dat-Bew-2</i>		$\Delta\psi \geq 90^\circ$
<i>Anf-Dat-Bew-3</i>		Fahrstreifenbreite von 2,75-3,50 m
<i>Anf-Dat-Bew-4</i>		Achsensymmetrie der Kurve um Nullpunkt
	Datenerfassung = Erf	
<i>Anf-Dat-Erf-1</i>		Anforderungen an Fahrversuchsdurchführung
<i>Anf-Dat-Erf-2</i>		Kontrolle der Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer
<i>Anf-Dat-Erf-3</i>		Abtastfrequenz: $T_{\text{abtast}} = \frac{v}{2 \cdot f \cdot s_{\text{seg}}}$

Literaturverzeichnis

Altche, F.; La Fortelle, A. de: LSTM Network Trajectory Prediction (2017)

Altche, Florent; La Fortelle, Arnaud de: An LSTM network for highway trajectory prediction, in: 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), IEEE, 2017

Bauer, K. et al.: Analyse tödlicher Motorradunfälle (2014)

Bauer, Klaus; Peldschus, Steffen; Schick, Sylvia: Retrospektive Analyse tödlicher Motorradunfälle und Ableitung von Schutzmaßnahmen bei komplexen Bremsmanövern, in: Forschungsheft Nr. 16 - "Sicherheit – Umwelt – Zukunft XIII" - Tagungsband der 6. Internationalen Motorradkonferenz. (Köln, 2014), Institut für Zweiradsicherheit e.V, 2014

Berg, F. A. et al.: Passive Sicherheit Zweirad Prüfverfahren (2011)

Berg, F. A.; Rücker, Peter; Bürkle, Heiko; Mattern, Rainer; Kallieris, Dimitrios: Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe F - Fahrzeugtechnik, Issues 49, Wirtschaftsverlag NW, 2011

Biral, F. et al.: Intelligent Curve Warning PTW (2010)

Biral, Francesco; Da Lio, Mauro; Lot, Roberto; Sartori, Roberto: An intelligent curve warning system for powered two wheel vehicles, in: European Transport Research Review (3), Issues 2, pp. 147–156, 2010

Biral, F. et al.: Evaluation Assisting Motorcyclists Safe Bends (2014)

Biral, Francesco; Bosetti, Paolo; Lot, Roberto: Experimental evaluation of a system for assisting motorcyclists to safely ride road bends, in: European Transport Research Review (4), Issues 6, pp. 411–423, 2014

Birolini, A.: Statistische Qualitätskontrolle und Zuverlässigkeitsprüfungen (1997)

Birolini, Alessandro: Statistische Qualitätskontrolle und Zuverlässigkeitsprüfungen, in: Birolini, Alessandro (Ed.): Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1997

Cossalter, V. et al.: Rider Assistance Systems Testing on Motorcycle Simulators (2006)

Cossalter, V.; Doria, Alberto; Lot, Roberto; Maso, Massimo: A motorcycle riding simulator for assessing the riding ability and for testing rider assistance systems, 9th Driving Simulation Conference, Paris, France, 2006

Cossalter, V. et al.: Steady turning of motorcycles (2007)

Cossalter, V.; Lot, R.; Peretto, M.: Steady turning of motorcycles, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering (11), Issues 221, pp. 1343–1356, 2007

Destatis: Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen in Deutschland (2023)

Statistisches Bundesamt: Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen in Deutschland; <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Unternehmen-Infrastruktur-Fahrzeugbestand/Tabellen/neuzulassungen.html>, 2023, Access 19.12.2023

Destatis: Verkehrsunfälle (2023)

Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle; https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/unfaelle-zweirad-5462408217004.pdf?__blob=publicationFile, 2023, Access 15.01.2024

Diggelen van, F.: A-GPS (2009)

Diggelen van, Frank: A-GPS, Artech House, Norwood, 2009

Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle (2009)

Donges, Edmund: Fahrerverhaltensmodelle, in: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Wolf, Gabriele (Eds.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009

Endsley, M. R.: Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems (1995)

Endsley, Mica R.: Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems, in: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society (1), Issues 37, pp. 32–64, 1995

GeneSys Elektronik GmbH: Genesys ADMA Bedienungsanleitung (2016)

GeneSys Elektronik GmbH: User Manual ADMA 3.0, 2016

Gerlach, J.; Oderwald, K.: Fahrbahnrand-Schutzeinrichtungen für Motorräder (2011)

Gerlach, Jürgen; Oderwald, Kai: Schutzeinrichtungen am Fahrbahnrand kritischer Streckenabschnitte für Motorradfahrer, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe V: Verkehrstechnik, Issues 152, 2011

Getz, N.: Control Balance of Nonlinear, Nonholonomic Bike Model (1994)

Getz, N.: Control of balance for a nonlinear nonholonomic non-minimum phase model of a bicycle, in: Proceedings of American Control Conference 1994, 1994

Getz, N. H.; Marsden, J. E.: Control for an autonomous bicycle (1995)

Getz, N. H.; Marsden, J. E.: Control for an autonomous bicycle, in: Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 1995

Google Earth: August-Euler-Flugplatz Griesheim (2024)

Google Earth: August-Euler-Flugplatz Griesheim; earth.google.com/web/, 2024, Access 15.01.2024

Gorges, C. et al.: Road classification for two-wheeled vehicles (2018)

Gorges, Christian; Öztürk, Kemal; Liebich, Robert: Road classification for two-wheeled vehicles, Technische Universität Berlin, 2018

Hans, S. et al.: A Cascaded Model-Predictive Approach To Motorcycle Safety (2016)

Hans, Stefan; Krehel, M.; Köbe, Markus; Prokop; Günther: A Cascaded Model-Predictive Approach To Motorcycle Safety, Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'16), CRC Press, 2016

Hans, S.: Störgrößenkompensation und Trajektorienfolgeregelung Motorrad (2022)

Hans, Stefan: Störgrößenkompensation und Trajektorienfolgeregelung eines vollautomatisierten, einspurigen Fahrdynamikerprobers, Schriftenreihe des Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik, Issues 23, Cuvillier Verlag, 2022

Hartkopf, G.; Weise, G.: Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (2012)

Hartkopf, G.; Weise, G.: Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, FGSV R1 - Regelwerke, Issues 201, 2012. Edition, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2012

Hartung, J.; Elpelt, B.: Multivariate Statistik (2007)

Hartung, Joachim; Elpelt, Bärbel: Multivariate Statistik, OLDENBOURG WISSENSCHAFTSVERLAG, 2007

Hauser, J. et al.: Achievable motorcycle trajectories (2004)

Hauser, J.; Saccon, A.; Frezza, R.: Achievable motorcycle trajectories, in: 2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (IEEE Cat. No.04CH37601), IEEE, 2004

Hegewald, A.: Motorradunfälle - Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur (2015)

Hegewald, Andreas: Motorradunfälle - Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe V: Verkehrstechnik, Issues 268, Carl Schünemann Verlag GmbH, Bremen, 2015

Hiraoka, T. et al.: Modeling of driver following behavior based on minimum-jerk theory (2005)

Hiraoka, Toshihiro; Kunitatsu, Taketoshi; Nishihara, Osamu; Kumamoto, Hiromitsu: Modeling of driver following behavior based on minimum-jerk theory, in: Proceedings of 12th World Congress ITS 2005, 2005

Holte, H.: Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diss., 2012, Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten und Unfallrisiko junger Fahrerinnen und Fahrer (2012)

Holte, Hardy: Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten und Unfallrisiko junger Fahrerinnen und Fahrer, Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diss., 2012
Universitäts- und Landesbibliothek Bonn, Bonn, 2012

Huth, V. et al.: Comparison of two warning concepts of an intelligent Curve Warning system for motorcyclists in a simulator study (2012)

Huth, Véronique; Biral, Francesco; Martín, Oscar; Lot, Roberto: Comparison of two warning concepts of an intelligent Curve Warning system for motorcyclists in a simulator study, in: Accident; analysis and prevention (1), Issues 44, pp. 118–125, 2012

ISO, DIN: Normung Koordinatensysteme Fahrzeuge (2016)

ISO, DIN: 10: 8855: 2013-11: Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe, Beuth, Berlin, 2016

Jacob, V.; Schwers, K.: Alles über Schräglage (2016)

Jacob, Volkmar; Schwers, Karsten: Alles über Schräglage, in: PS - sportlich schnell motorradfahren 02/2016, Issues 2016, pp. 38–56, 2016

Karaim, M. et al.: GNSS Error Sources (2018)

Karaim, Malek; Elsheikh, Mohamed; Noureldin, Aboelmagd: GNSS Error Sources, in: Rustamov, Rustam B.; Hashimov, Arif M. (Eds.): Multifunctional Operation and Application of GPS, InTech, 2018

Köbe, M.: Fahrdynamisch-eingreifende Fahrerassistenzsysteme Motorräder (2023)

Köbe, Markus: Entwicklung fahrdynamisch-eingreifender Fahrerassistenzsysteme für motorisierte Zweiräder, Schriftenreihe des Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik, Issues 24, Cuvillier Verlag, 2023

Kraftfahrtbundesamt: Neuzulassungen nach Fahrzeugklassen und Aufbauarten (2024)

Kraftfahrtbundesamt: Neuzulassungen nach Fahrzeugklassen und Aufbauarten; https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/FahrzeugklassenAufbauarten/2022/2022_n_fzkl_zeitreihen.html?nn=3524574&fromStatistic=3524574&yearFilter=2022&fromStatistic=3524574&yearFilter=2022, 2024, Access 12.01.2024

Kreiner, W. A.: Wachstumsfunktionen (2018)

Kreiner, Welf A.: Wachstumsfunktionen, Universität Ulm, 2018

Kühn, M.; UDV: Motorcycle riding in groups (2022)

Kühn, Matthias; Lang, Antje, German Insurers Accident Research: Motorcycle riding in groups - known accident patterns?, in: Forschungsheft Nr. 20 - "Sicherheit – Umwelt – Zukunft XIII" - Tagungsband der 14. Internationalen Motorradkonferenz. (Essen, 2022), Institut für Zweiradsicherheit e.V, 2022

Lemejda, M.; Niewels, F.: Fahrassistenzsystem für ein Zweirad zur Schräglagenwarnung (2013)

Lemejda, Markus; Niewels, Frank: Fahrassistenzsystem für ein Zweirad zur Schräglagenwarnung, Patent application number: DE102012201802A1, 2013

Letov, A. M.: Stability in Nonlinear Control Systems (2015)

Letov, Aleksandr M.: Stability in Nonlinear Control Systems, Princeton University Press, 2015

Limebeer, D. J.; Sharp, R. S.: Bicycles, motorcycles, and models (2006)

Limebeer, D. J. N.; Sharp, R. S.: Bicycles, motorcycles, and models, in: IEEE Control Systems (5), Issues 26, pp. 34–61, 2006

Litschauer, S.; Ecker, H.: Fahrversuche und Analyse des Fahrstreifenwechsels mit Motorrädern (2020)

Litschauer, Stefan; Ecker, Horst: Fahrversuche und Analyse des Fahrstreifenwechsels mit Motorrädern, in: Forschungsheft Nr. 19 - "Sicherheit – Umwelt – Zukunft XIII" - Tagungsband der 13. Internationalen Motorradkonferenz. (Essen, 2020), Institut für Zweiradsicherheit e.V, 2020

Magiera, N.: Dissertation, Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt (2020)

Magiera, Nils: Identifikation des Fahrfertigkeitsniveaus von Motorradfahrern in Kurvenfahrt im Realverkehr, Dissertation
Technische Universität Darmstadt, 2020

Ortlepp, J.; Butterwege, P.: Unfalltypen-Katalog (2016)

Ortlepp, Jörg; Butterwege, Petra: Unfalltypen-Katalog, Berlin, 2016

Pläßmann, W.: Abtasttheorem (2016)

Pläßmann, Wilfried: Abtasttheorem, in: Pläßmann, Wilfried; Schulz, Detlef (Eds.): Handbuch Elektrotechnik, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016

Pleiß, R. et al.: Schräglagenschwelle bei Motorradfahrern (2020)

Pleiß, Raphael; Will, Sebastian; Neukum, Alexandra; Scherer, Florian: Untersuchung der Existenz einer Schräglagenschwelle bei Motorradfahrern*innen, in: Forschungsheft Nr. 19 - "Sicherheit – Umwelt – Zukunft XIII" - Tagungsband der 13. Internationalen Motorradkonferenz. (Essen, 2020), Institut für Zweiradsicherheit e.V, 2020

Pöppel-Decker, M.: Zum Unfallgeschehen von Motorrädern (2021)

Pöppel-Decker, Martin: Zum Unfallgeschehen von Motorrädern, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe M - Mensch und Sicherheit, Issues 304, Carl Ed. Schünemann KG, Bremen, 2021

Prokop, G. et al.: Bewertungsmethodik automatisierter Fahrfunktionen (2017)

Prokop, Günther; Hannawald, Lars; Köbe, Markus: Eine Bewertungsmethodik zur Inspektion automatisierter Fahrfunktionen, in: Unfallforschung 2017 Symposium für Unfallforschung und Sicherheit im Straßenverkehr der ADAC Stiftung, 2017

Schellin, A.; Sklenak, S.: Erkennung dynamischer Streckenabschnitte (2020)

Schellin, Alexander; Sklenak, Simon: Erkennung dynamischer Streckenabschnitte, Patent DE102018215710A1, 2020

Scherer, F. et al.: Schräglagenangst (2021)

Scherer, Florian; Winner, Hermann; Will, Sebastian; Neukum, Alexandra; Maximilian Stanglmayr; Maximilian Bäumler; Christian Siebke; Günther Prokop: Schräglagenangst, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe F - Fahrzeugtechnik, Issues 142, Carl Ed. Schünemann KG, 2021

Scherer, F.; Basten, T.: Motorradfahrendenmodell zur Trajektorienprädiktion (2022)

Scherer, Florian; Basten, Tilman: Entwicklung eines Motorradfahrendenmodells zur Trajektorienprädiktion, in: Forschungsheft Nr. 20 - "Sicherheit – Umwelt – Zukunft XIII" - Tagungsband der 14. Internationalen Motorradkonferenz. (Essen, 2022), Institut für Zweiradsicherheit e.V, 2022

Scherer, F.; Eschinger, M.: Investigation of the Applicability of a Motorcyclist Model for Trajectory Prediction in Real Traffic

Scherer, Florian; Eschinger, Maximilian: Investigation of the Applicability of a Motorcyclist Model for Trajectory Prediction in Real Traffic, in: The Evolving Scholar - BMD 2023, 5th Edition, The Evolving Scholar - BMD 2023, 5th Edition

Schröter, K.: Diss., Bremslenkmomentoptimierte Kurvenbremsung v. Motorrädern (2015)

Schröter, Kai: Bremslenkmomentoptimierte Kurvenbremsung v. Motorrädern, Diss. TU Darmstadt, Darmstadt, 2015

Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015)

Schröter, Kai; Pleß, Raphael; Seiniger, Patrick: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder, in: Winner, Hermann et al. (Eds.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015

Schütz, T.: Aerodynamik des Automobils (2023)

Schütz, Thomas (Ed.) Aerodynamik des Automobils, ATZ/MTZ-Fachbuch, 7. Edition, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2023

Seiniger, P.: Dissertation, Ungebremste Motorrad Kurvenunfälle (2009)

Seiniger, Patrick: Erkennbarkeit und Vermeidbarkeit von ungebremsten Motorrad-Kurvenunfällen, Dissertation Technische Universität Darmstadt, 2009

Spiegel, B.: Die obere Hälfte des Motorrads (2003)

Spiegel, Bernd: Die obere Hälfte des Motorrads. Vom Gebrauch der Werkzeuge als künstliche Organe, 3. Edition, Motorbuch, 2003

Spörner, A.: Risiken beim Motorradfahren (2006)

Spörner, Alexander: Risiken beim Motorradfahren Spezielle Einflussgrößen durch Straßenführung und Umfeld, in: Forschungsheft Nr. 12 - "Sicherheit – Umwelt – Zukunft XIII" - Tagungsband der 6. Internationalen Motorradkonferenz. (Köln, 2006), Institut für Zweiradsicherheit e.V, 2006

Stanglmayr, M. et al.: Messung Motorradfahrtdynamik mit Smartphones (2020)

Stanglmayr, Maximilian; undefined; Bäumlner, Maximilian: Towards Safer Rides: Measuring Motorcycle Dynamics with Smartphones, in: Forschungsheft Nr. 19 - "Sicherheit – Umwelt – Zukunft XIII" - Tagungsband der 13. Internationalen Motorradkonferenz. (Essen, 2020), Institut für Zweiradsicherheit e.V, 2020

Stoffregen, J.: Motorradtechnik (2010)

Stoffregen, Jürgen: Motorradtechnik, Springer-Verlag, 2010

Stoffregen, J.: Regelungssysteme für Bremsen und Antriebsschlupf (2018)

Stoffregen, Jürgen: Regelungssysteme für Bremsen und Antriebsschlupf, in: Motorradtechnik, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018

Stolle, K. L. et al.: Trajektorienprädiktion über Rollwinkel mit LSTM Netzwerk (2023)

Stolle, Karl L.; Wahl, Anja; Schmidt, Stephan: Trajectory Forecasting for Powered Two Wheelers by Roll Angle Prediction with an LSTM Network, in: The Evolving Scholar - BMD 2023, 5th Edition, The Evolving Scholar - BMD 2023, 5th Edition, 2023

Thoma, M.; Laumond, J.-P.: Robot Motion Planning and Control (1998)

Thoma, M.; Laumond, J.-P.: Robot Motion Planning and Control, Issues 229, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1998

Timoshenko, Stephen P., Young, D. H.: Dynamics of a Particle (1948)

Timoshenko, Stephen P., Young, D. H.: Dynamics of a Particle, in: Advanced dynamics, 1948

Vogt, W. et al.: Warnsystem für eine Kurve (2007)

Vogt, Wilhelm; Varchmin, Axel; Eschke, Stephan: Warnsystem für eine Kurve, Patent application number: DE 102005046430 A1, 2007

Waliszewski, P.; Konarski, J.: A Mystery of the Gompertz Function (2005)

Waliszewski, P.; Konarski, J.: A Mystery of the Gompertz Function, in: Losa, Gabriele A. et al. (Eds.): Fractals in Biology and Medicine, Mathematics and Biosciences in Interaction, Birkhäuser-Verlag, Basel, 2005

Weisstein, E. W.: Gudermannian. (2002)

Weisstein, Eric W.: Gudermannian.; <https://mathworld.wolfram.com/Gudermannian.html>, 2002, Access 20.12.2023

Wenzel, S.; Bari, M.: Kurvenfahrtermittlung Zweirad (2011)

Wenzel, S.; Bari, Modugno: Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln einer Kurvenfahrt eines Zweirades, Patent DE 102010029428 A1, 2011

Whipple, F. J.: The stability of the motion of a bicycle (1899)

Whipple, F. J. W.: The stability of the motion of a bicycle, The Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics, Issues 30, 1899

Will, S. et al.: Fahrerbeschreibung mit g-g Diagrammen (2020)

Will, Sebastian; Metz, Barbara; Hammer, Thomas; Mörbe, Matthias; Henzler, Markus; Harnischmacher, Frederik; Matschl, Gerald: Methodological considerations regarding motorcycle naturalistic riding investigations based on the use of g-g diagrams for rider profile detection, in: Safety Science (129), 2020

Wiltshko, T.; Kaufmann, T.: Qualität Geodatenverarbeitung von Straßendaten (2005)

Wiltshko, Thomas; Kaufmann, Thilo: Modellierung und Bewertung der Qualität in Prozessen der Geodatenverarbeitung am Beispiel von Straßendaten, in: AGIT Symposium und Fachmesse Angewandte Geoinformatik, 2005

Wörnle, C.: Mehrkörpersysteme (2011)

Wörnle, C.: Mehrkörpersysteme, Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2011

Yamakado, M.; Abe, M.: Driving Operational Timing with Jerk Sensor (2006)

Yamakado, M.; Abe, M.: Examination of voluntary driving operational timing by using information obtained with the developed jerk sensor, in: Proceedings of the FISITA 2006 World Automotive Congress, 2006

Ziegler, J.: Dissertation, Optimale Bahn- und Trajektorienplanung für Automobile (2015)

Ziegler, Julius: Optimale Bahn- und Trajektorienplanung für Automobile, Dissertation, 2015

Eigene Veröffentlichungen

- Scherer, F.**; Eschinger, M.: Investigation of the Applicability of a Motorcyclist Model for Trajectory Prediction in Real Traffic, 2023, In: The Evolving Scholar - BMD 2023, 5th Edition, Proceedings of 5th Bicycle and Motorcycle Dynamics Conference 2023, Delft
- Scherer, F.**; Basten, T.: Entwicklung eines Motorradfahrendenmodells zur Trajektorienprädiktion, 2022 In: Forschungshefte Zweiradsicherheit / ifz-Research Publication Series, 20, In: Tagungsband der 14. Internationalen Motorradkonferenz 2022 - Proceedings of the 14th International Motorcycle Conference 2022, pp. 265-299, Essen, Institut für Zweiradsicherheit e.V., Sicherheit - Zukunft - Umwelt - Safety - Environment - Future: 14. Internationale Motorradkonferenz 2022, Köln, 03.-04.10.2022, ISSN 2701-522X
- Scherer, F.**; Winner, H.; Pleß, R.; Will, S.; Neukum, A.; Stanglmaier, M.; Bäumler, M.; Siebke, C.; Prokop, G.: Schräglagenangst, 2021, In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bremen, Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, ISBN 978-3-95606-622-1
- Pleß, R.; Will, S.; Neukum, A.; **Scherer, F.**: Investigation of the existence of a leaning threshold among motorcyclists, (2020), In: Forschungshefte Zweiradsicherheit, 19, In: Sicherheit, Umwelt, Zukunft XII: Tagungsband der 13. Internationalen Motorradkonferenz 2020, pp. 1-23, Essen, Institut für Zweiradsicherheit e.V., ISSN 2701-522X
- Scherer, F.**; Pleß, R.; Winner, H.: Identification of Rider-Vehicle Coupling on Motorcycles and Riding Simulators, 2019, Padua, Symposium on Bicycle and Motorcycle Dynamics, Padua, 9.-11. September 2019,

Betreute studentische Arbeiten

Bachelorthesis

Daniel Kerz, Mechatronik: Konstruktion und Umsetzung eines Systems zum Aufbringen zusätzlicher Rollmomente auf ein Motorrad, Bath. Nr. 1347/19

Jonas Heß, Mechatronik: Entwicklung eines Motorradfahrer-Oberkörpermodells für einen dynamischen Fahrsimulator aufgrund von Realfahrversuchs-Ergebnissen, Bath. Nr. 1366/20, 2020

Charlotte Brand, Mechatronik: Konzeption einer Geräusch-Messeinrichtung zur lokalen Erfassung von Geräuschquellen vorbeifahrender Motorräder, Bath. Nr. 1368/20, 2020

Maximilian Eschinger, Maschinenbau: Nachweis der Anwendbarkeit eines Motorradfahrenden-modells mit Fahrdynamikdaten aus Straßenverkehrsmessungen, Bath. Nr. 1397/22, 2022

Masterthesis

Marc Anton, Maschinenbau: Untersuchung und Bewertung stationärer Messtechnikkonzepte hinsichtlich der erreichbaren Datenqualität zur Messung des Kurvenverhaltens von Motorradfahrern in Gefahrensituationen, Math. Nr.: 751/19, 2019

Simon Rappold, Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau: Bestimmung von Indikatoren für die fahrerseitige Nichtausnutzung des Schräglagenpotentials von Motorradfahrern, Math. Nr.: 752/19, 2019

Zehua Gong, Maschinenbau: Machine Learning based Motorcycle State Prediction with Eye Tracking and Vehicle Dynamics Data, Math. Nr.: 764/19, 2019

Tilman Basten, Maschinenbau: Konzeption und Bewertung eines Modells zur Prädiktion von Motorradfahrdynamikdaten mit Berücksichtigung des Fahrereinflusses, Math. Nr.: 799/20, 2020

Guan Teck Gan, Informatik: Erweiterung eines kamerabasierten Stationäresmesstechnikkonzepts zur Erfassung der Motorrad-Aufsassen-Position mittels Machine Learning, Math. Nr. 780/20, 2020

Jan Dreiskemper, Informatik: Entwicklung eines Messkonzeptes inklusive Sensordatenfusion mit Ziel der Verwendbarkeit der Messdaten in einem Motorradfahrtdynamik-Prädiktionsmodell, Math. Nr. 807/21, 2021

Willy Schlott, Informatik: Entwicklung eines Ansatzes zur Untersuchung von Zusammenhängen großer Motorradfahrtdynamik-Datenmengen mittels Machine Learning, Math. Nr. 812/21, 2021

René Winter, Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau: Entwicklung einer Methodik zum Nachweis der Datenschutzkonformität in Abhängigkeit des Messverfahrens für stationäre Datenerfassung., Math. Nr. 822/21, 2021

Ali Hadelli, Maschinenbau: Untersuchung der Fahrtdynamik bei Einspurunfällen, Math. Nr. 858/22, 2022

Jin Chao, Maschinenbau: Identifikation der Zweiraddynamik mit Deep Learning, Math. Nr. 870/23, 2023

Manuel Sach, Maschinenbau: Untersuchung der Übertragbarkeit eines Motorradfahrenmodells auf große Datenmengen, Math. Nr. 857/23, 2023

Advanced Design Project / Advanced Research Project

Lukas Schadt, Martin Fischer, Julian Sperber, Zixuan Fang, Tim Arnold, Maschinenbau: Konstruktion einer Sensorvorrichtung für den Advanced Abrasion Resistance Tester (AART), ADP Nr. 133/19, 2019

Samantha Sauer, Maurice Zeithammer, Alisa Müller, Rami Estephan, Willy Schlott, Julian Sperber: Maschinenbau: Entwicklung einer automatisierten Auslesesoftware für Internet- Karten- und Unfalldatenbanken, ADP Nr. 141/20, 2020

Frederic Paul, Erik Stenger, Gilbert Ely Engert, Benjamin Michel: Maschinenbau: Konzeption eines LIDAR-Messsystems zur Erfassung der Motorradaufsassenposition ADP, Nr. 153/20, 2020