



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



Diplomarbeit

Experimentelle Untersuchung zum Fahrstreifenwechsel mit Motorrädern

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl. Ing oder DI)
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften
von

Stefan Wolfgang LITSCHAUER

Mat.Nr.: 01125466

unter der Leitung von
Ao. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Horst Ecker
Institut für Mechanik und Mechatronik, E325

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, 18. Jänner 2021



Unterschrift

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

An erster Stelle bedanke ich mich herzlich bei meinem Betreuer, Prof. Horst Ecker, für seine Unterstützung, die mir entgegengebrachte Geduld und die vielen motivierenden Worte auf dem Weg zu dieser Abschlussarbeit.

Mein Dank gilt auch Ing. Manfred Neumann für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Messfahrten.

Ich danke meinen Eltern dafür, dass sie mir das Studium ermöglicht haben.

Ein besonderes Dankeschön richte ich an meine Freundin Theresa, die in den letzten Jahren stets Verständnis für die wenige gemeinsame Zeit gezeigt und mich in jedem Moment unterstützt und motiviert hat.

Zuletzt danke ich meinen Freund*innen und Studienkolleg*innen für die tolle gemeinsame Zeit und die gegenseitige Unterstützung.

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden experimentelle Untersuchungen zur Fahrdynamik des Fahrstreifenwechselmanövers mit einem Motorrad durchgeführt. Dazu wird eine KTM 1290 Super Adventure S, ausgestattet mit OnBoard-Sensorik und zwei zusätzlichen Messsystemen, als Messmotorrad eingesetzt. Die Versuche werden von zwei erfahrenen Motorradfahrern, beide männlich, im Alter von 27 beziehungsweise 60 Jahren, durchgeführt.

Dank Werksunterstützung seitens KTM können die Messdaten der serienmäßig eingebauten Sensoren, insbesondere der 5-Achsen-IMU, aufgezeichnet werden. Darüber hinaus kommen eine VBOX von Racelogic und ein Messsystem der Firma 2D – Debus & Diebold zum Einsatz. Die VBOX speichert Daten aus zwei GPS-Antennen, einer 6-Achsen-IMU und Videomaterial von zwei externen Kameras in einem eigenen Datalogger. Das System von 2D – Debus & Diebold verfügt über zwei 6-Achsen-IMU's sowie eine GPS-Antenne, einen Datalogger und einem nachträglich angebrachten Lenkwinkelsensor.

Die Spurwechselversuche wurden im öffentlichen Straßenverkehr, innerhalb und außerhalb des Ortsgebiets, sowie auf einer Schnellstraße durchgeführt. Die Versatzbreite betrug eine halbe oder eine ganze Fahrstreifenbreite. Zusätzlich wurden Reaktionszeitmessungen im Zuge der Spurwechselversuche und bei separaten Testfahrten durchgeführt.

Die aufgezeichneten Daten sind Zeitverläufe der fahrdynamischen Parameter Rollwinkel, Roll-, Gier- und Nickrate, Längs-, Quer- und Vertikalbeschleunigung sowie des Lenkwinkels. Für die vorliegende Arbeit wurde eine theoretische Manöverdauer definiert und der Parameter „Intensität“ eingeführt, welcher die Aggressivität/Entschlossenheit des Fahrers während des Fahrstreifenwechsels beschreibt. Außerdem wird untersucht, ob die gemessene GPS-Position für die Berechnung der Versatzbreite verwendet werden könnte.

Es werden statistische Ergebnisse der genannten Parameter sowie deren Abhängigkeiten untereinander beschrieben und diskutiert. Der Einfluss des Fahrers auf die Verläufe der Parameter wird ebenso erörtert, wie der Einfluss unterschiedlicher Geschwindigkeitsbereiche. Außerdem werden die gemessenen Reaktionszeiten der beiden Fahrer statistisch aufbereitet und die Ergebnisse diskutiert.

Zuletzt wird ein mathematisches Modell für die Berechnung des Rollwinkelverlaufs in Abhängigkeit von den drei Eingangsparametern – Fahrgeschwindigkeit, Versatzbreite und Intensität – entwickelt und mit den aufgezeichneten Messdaten verglichen.

Abstract

This thesis analyses experimental studies on the driving dynamics of the lane change maneuver with a motorcycle. A KTM 1290 Super Adventure S, equipped with on-board sensors and two additional measuring systems, is used as a measuring motorcycle. The test runs were conducted with two experienced motorcyclists as subjects, both male, aged 27 and 60 years old accordingly.

The measurement data of the standard on-board sensors, most importantly the 5-axis IMU, were recorded thanks to factory support by KTM. The second measuring system is a VBOX by Racelogic with two GPS antennas, a 6-axis IMU, a data logger, and two external cameras for video recording. Additionally, a measuring system by 2D – Debus & Diebold was used. The latter contains two 6-axis IMU's as well as one GPS antenna, a data logger and a retro-fitted steering angle sensor.

The lane change test runs were carried out in public traffic, inside and outside the city, as well as on an expressway. The offset was half a lane or a full lane. In addition, response time measurements were carried out in the course of the lane change tests and in separate test runs.

The recorded data show the parameters roll angle, roll rate, yaw rate and pitch rate, longitudinal, lateral, and vertical acceleration, as well as the steering angle over time. For this thesis, a theoretical maneuver duration was defined and the parameter "intensity", which describes the rider's aggressiveness/determination during the lane change, is introduced. The thesis also examines the possible use of the measured GPS coordinates for calculating the lateral offset during the lane change.

Statistical results of the parameters mentioned above and their interdependencies are described and discussed. The rider's impact on the parameters is also considered, as is the influence of different speed ranges. Additionally, the measured reaction times of the two riders are statistically prepared and the results are discussed.

In a final step, a mathematical model for the calculation of the roll angle curve depending on the three input parameters – driving speed, lateral offset and intensity – is developed and compared with the recorded data.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	i
Kurzfassung	ii
Abstract.....	iii
Inhaltsverzeichnis.....	1
1. Einleitung.....	4
2. Stand der Technik.....	5
3. Einführung in den praktischen Teil der Arbeit.....	12
3.1. Das Motorrad – KTM 1290 Super Adventure S	12
3.2. Die Fahrer	13
3.3. Die Planungsphase	13
3.4. Die Spurwechselversuche auf der Schnellstraße S5	15
3.5. Die Spurwechselversuche auf der Dr.-Nekowitsch-Straße	15
3.6. Die Reaktionszeitversuche im Raum Strebersdorf.....	16
4. Die eingesetzten Messsysteme	17
4.1. Das KTM OnBoard-Datensystem	17
4.2. Die Racelogic VBOX	18
4.3. Das Messsystem von 2D – Debus & Diebold	19
4.4. Der Signalgeber für die Reaktionszeitmessung	21
5. Der Versuchsablauf	23
5.1. Die Fahrstreifenwechselversuche.....	23
5.2. Die Reaktionszeitversuche	24
6. Die Aufbereitung und Auswertung der Messdaten	25
6.1. Einführung in die Aufbereitung der Messdaten	25
6.2. Die Aufbereitung der Reaktionszeitdaten	28
6.3. Die Auswertung der Reaktionszeitdaten.....	29
6.3.1. Die Auswertung der Reaktion durch die Taster	29
6.3.2. Die Auswertung der Reaktion durch die Rollrate	29
6.4. Die Aufbereitung der Daten der Fahrstreifenwechsel	32
6.5. Die Auswertung der Daten der Fahrstreifenwechsel.....	33
6.5.1. Die Auswertung der Rollwinkelmessdaten	34

6.5.2.	Die Auswertung der Rollratenmessdaten	35
6.5.3.	Die Berechnung des Parameters „Intensität“	36
6.5.4.	Die Berechnung der „theoretischen Spurwechselfdauer“	40
6.5.5.	Die Auswertung der Geschwindigkeitsmessung.....	41
6.5.6.	Die Auswertung der Versatzbreite.....	41
6.5.7.	Die Auswertung der Lenkwinkelmessung.....	44
6.5.8.	Die Auswertung der Gierratenmessung	44
6.5.9.	Die Auswertung der Nickratenmessung	45
6.5.10.	Die Auswertung der Längsbeschleunigungsmessung	46
6.5.11.	Die Auswertung der Querschleunigungsmessung	46
6.5.12.	Die Auswertung der Vertikalbeschleunigungsmessung	47
7.	Die Versuchsergebnisse	49
7.1.	Die Ergebnisse der Fahrstreifenwechselversuche	49
7.1.1.	Statistische Ergebnisse.....	49
7.1.2.	Die Ergebnisse der Rollwinkelauswertung	50
7.1.3.	Die Ergebnisse der Rollratenauswertung	52
7.1.4.	Die Ergebnisse der Intensitätsauswertung	54
7.1.5.	Die Ergebnisse der Auswertung der theoretischen Manöverdauer	57
7.1.6.	Die Ergebnisse der Geschwindigkeitsauswertung.....	60
7.1.7.	Die Ergebnisse der Versatzbreitenauswertung	63
7.1.8.	Die Ergebnisse der Lenkwinkelauswertung.....	65
7.1.9.	Die Ergebnisse der Gierratenauswertung	70
7.1.10.	Die Ergebnisse der Querschleunigungsauswertung.....	75
7.1.11.	Sonstige aufgezeichnete Daten	80
7.2.	Die Ergebnisse der Reaktionszeitversuche	81
8.	Ein mathematisches Modell des Fahrstreifenwechsels	83
8.1.	Der Fahrstreifenwechsel in Abhängigkeit von Versatzbreite, Geschwindigkeit und Intensität	83
8.1.1.	Die Berechnung der Spurwechselfdauer.....	85
8.1.2.	Die Berechnung der Amplitude der Rollrate	88
8.1.3.	Die Entwicklung des Rollratenverlaufs über die Zeit.....	90
8.1.4.	Vergleich der gemessenen und berechneten Zeitverläufe.....	95
9.	Zusammenfassung	98

10. Literaturverzeichnis.....	c
Anhang.....	ci

1. Einleitung

Ein Fahrstreifenwechsel stellt im Straßenverkehr ein normales und vertrautes Manöver dar – sowohl mit mehrspurigen, als auch mit einspurigen motorisierten Fahrzeugen. Je nach Situation können diese eher ruhig oder eher dynamisch durchgeführt werden, wobei besonders beim Motorradfahren einer dynamischen Fahrweise meist auch ein höheres Fahrvergnügen nachgesagt wird.

Immer wieder kommt es jedoch zu Situationen, in denen ein drohender Unfall zu einem Ausweichmanöver führt. Einem Manöver, das dem Fahrstreifenwechsel sehr ähnlich ist und als dessen dynamischste Variante beschrieben werden kann. Als klarer Vorteil gegenüber mehrspurigen Fahrzeugen kann mit einem Motorrad ein Unfall durch ein aggressives Auslenken gegebenenfalls sogar umfahren und somit verhindert werden.

Es ist daher durchaus interessant, die Dynamik dieses alltäglichen Manövers bis ins Detail zu analysieren, wie es sich der Autor der vorliegenden Arbeit zur Aufgabe gemacht hat.

Die Ergebnisse sollen einen Beitrag zur aktuellen Forschung leisten, vor allem mit Blick auf

- Die Unfallforschung. Die Unfallzahlen in der Kategorie „Unfälle mit Motorrädern“ sind in den letzten Jahren in Österreich kaum gesunken (Vgl. [1]), was darauf schließen lässt, dass es noch an Untersuchungen bedarf.
- Die Forschung zum autonomen Fahren. Insbesondere für Modelle von humangelenken Motorrädern zur Anwendung in Simulationsumgebungen, um im Falle der Einführung von autonomen Fahrzeugen wichtige Fragen zu heterogenen Verkehrssystemen beantworten zu können.
- Die Überprüfung und Validierung von fahrdynamischen Modellen für Fahrer und Motorrad.

2. Stand der Technik

In der Vorbereitungs- und Planungsphase wurde nach früheren Arbeiten gesucht, welche sich mit dem Fahrstreifenwechsel eines motorisierten, einspurigen Fahrzeugs beschäftigten. Die verfügbare Literatur wurde im Hinblick auf simulative oder experimentelle Versuchsreihen durchforstet, wobei auf folgende Inhalte besonders geachtet wurde:

- abzufahrende Kursgeometrien
- untersuchte Geschwindigkeiten
- aufgezeichnete fahrdynamische Parameter
- Unterschiede in der Fahrpraxis der Fahrer
- gemessene Reaktionszeiten
- wichtige Erkenntnisse in Bezug auf das Manöver „Fahrstreifenwechsel“.

Watanabe beschäftigte sich 1973 in [2] damit, bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten vor einem zwei Meter breiten Objekt in eine vorgegebene Richtung auszuweichen. Der dafür verwendete Testaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Die gefahrene Kursgeometrie ist nicht explizit definiert, ähnelt aber dem Beginn eines Fahrstreifenwechsels, da das Ziel beider Manöver ist, möglichst schnell einen gewünschten Rollwinkel aufzubauen.

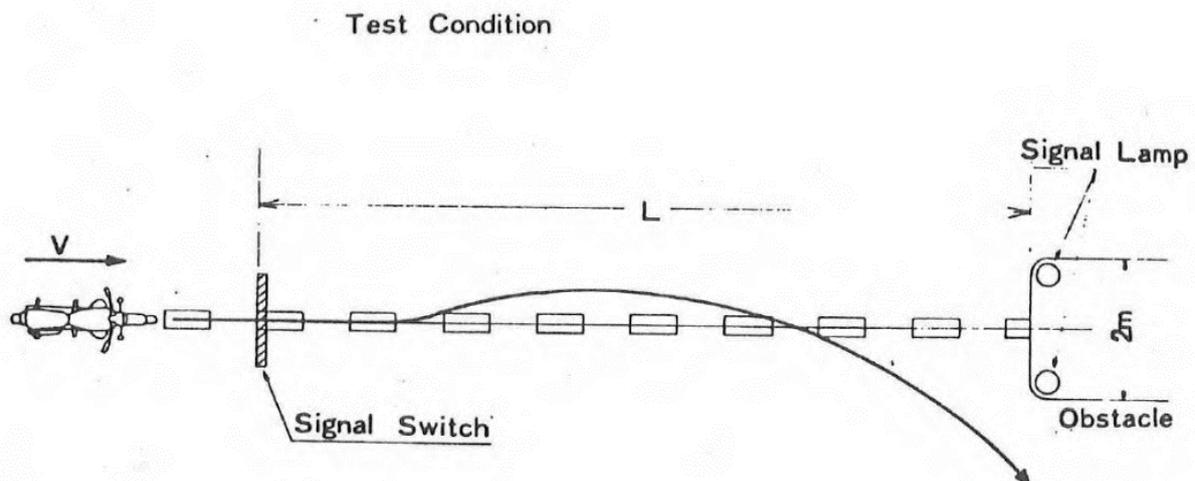


Abbildung 1: Testaufbau von Watanabe [2, p. 3]

Die anderen angeführten Arbeiten beschäftigten sich alle mit einem vollständigen einfachen Fahrstreifenwechsel. Das bedeutet, dass das Motorrad, abgesehen vom zurückgelegten Weg in Fahrtrichtung, lediglich einen Parallelversatz, aber keine Rotation aufweist.

Rice, Davis und Kunkel untersuchten 1976 in [3] und [4], sowie in [5] ohne Davis, welche Eigenschaften von Motorrädern Einfluss auf die Vermeidbarkeit von Unfällen haben. Im Zuge dessen wurden Fahrstreifenwechselversuche mit einem lateralen Versatz von 4 m

durchgeführt. Der Kurs bestand, wie in Abbildung 2 ersichtlich, aus einer Startgasse mit einer Breite von 4 ft (1,2 m) und einer Ausgangsgasse mit einer Breite von 8 ft (2,4 m).

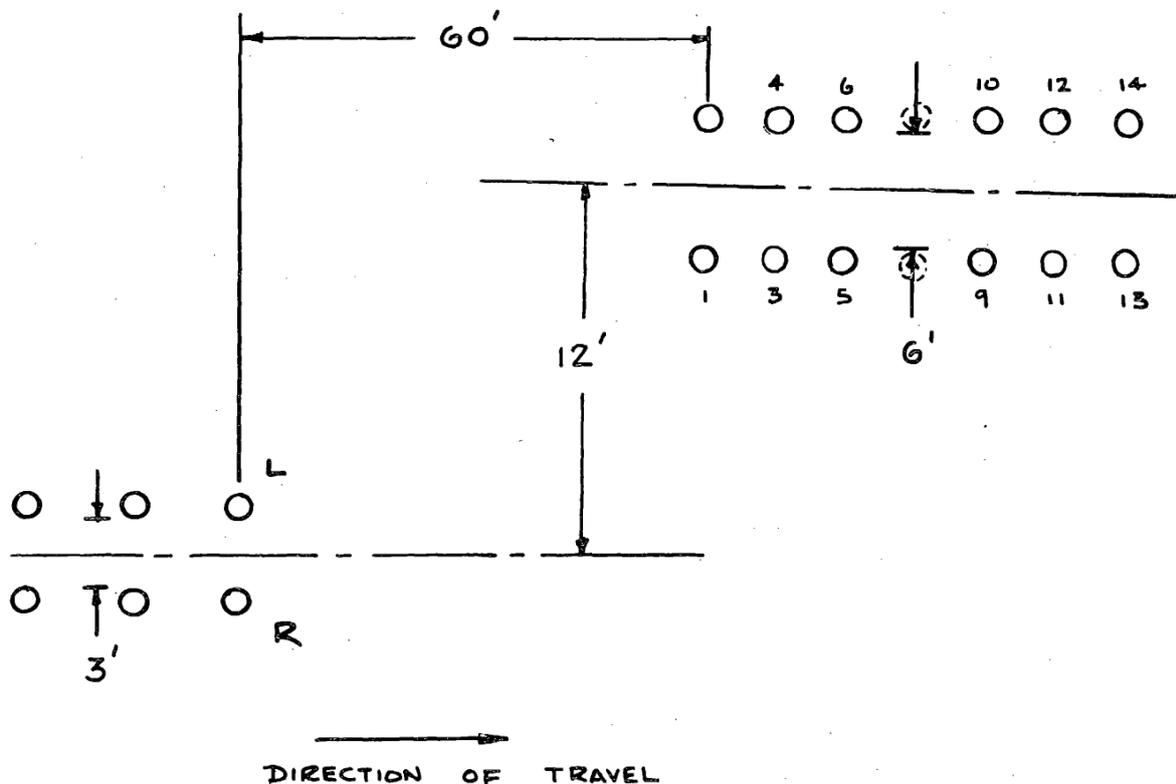


Abbildung 2: Testaufbau von Rice, Davis und Kunkel [5, p. 28]

Letztere wurde nach den ersten Versuchen verringert, da sich zeigte, dass der Fahrer die Distanz zwischen den Gassen praktisch verlängerte, indem er das Manöver deutlich vor dem Ende der Startgasse einleitete und erst weit nach dem Beginn der Ausgangsgasse beendete. Der laterale Versatz wurde dabei von der Mittellinie der beiden Gassen gemessen. Die longitudinale Distanz der beiden Gassen wurde in einer Versuchsreihe und in der Simulation an die Fahrgeschwindigkeit angepasst, um gleiche Schwierigkeit zu erreichen, und in einer weiteren Versuchsreihe konstant auf 60 ft (ca. 18 m) beschränkt, um die maximal mögliche Geschwindigkeit bei einer gegebenen Distanz zu ermitteln. Ein Fahrversuch galt als erfolgreich, wenn das Manöver ohne Verlassen des vorgegebenen Kurses und ohne Kontakt einer Begrenzung absolviert wurde. In [5] wurde die Kursgeometrie mit konstanten 60 ft (ca. 18 m) longitudinaler Distanz aus [3] und [4] übernommen. Die unterschiedlichen Varianten sind nachfolgend in Tabelle 1 zum Vergleich abgebildet.

Tabelle 1: Zusammenfassung Versuche [4, p. D2]

FULL SCALE TESTING - RUN SUMMARY

Run No.		Run Description
Start	End	
1	12	Directional Control, 300-700 ft. radius, CCW, 40 mph, normal lean control, velocity noise
13	17	DC, 300-700'
18	22	DC, 300', 40-50 mph
23	25	Lane Change, 60', 30-40 mph
26		Steady State, 150' radius, CW, Max Speed
27	32	Yaw rate gyro checkout - straight, serpentine, 20 and 30 mph SS @ 150'
33	35	DC, 300', lean = normal, out, in
36		DC, 300', rider plus passenger
37	42	LC, 20, 30, 40 mph
43	45	Yaw checkout, straight with mild turns
46	47	Straight - Roll angle established with rider lean and steer
48	51	LC, 40 mph, course layout off slightly
52		SS, 150', 30 mph
		New yaw gyro installed to eliminate 1-2 Hz oscillation. Course layout adjusted.
53	54	DC, 300', CCW, 40 mph
55	61	DC, 300/200/150/100, CCW, 20 mph
62	63	DC, 300', CW, 40 mph
64	68	DC, 200/150/100', CCW, 30 mph
69	71	DC, 200/150/100', CCW, 20 mph
72	117	Lane Change Maneuvers - all done from entrance lane to left exit lane
72	81	LC, $\Delta x=60'$, 40 mph
82	83	LC, $\Delta x=60'$, 30 mph
84		LC, $\Delta x=60'$, 20 mph
85	87	LC, $\Delta x=60'$, 40 mph
88	91	LC, $\Delta x=60'$, max speed attempt at about 45 mph
92	94	LC, $\Delta x=80'$, 50 mph, transmission of signal improved
95	98	LC, $\Delta x=80'$, max speed attempt at about 52-54 mph
99	100	LC, $\Delta x=45'$, 30 mph
101	104	LC, $\Delta x=45'$, max speed attempt at about 32-33 mph
105	108	LC, $\Delta x=30'$, 20 mph
109	114	Repeat LC, $\Delta x=60'$, 40 mph with improved signal
115	117	LC, $\Delta x=60'$, 40 mph with cone pair at midpoint of LC for simulation analysis

Der Kurs, den Kuschefski, Haasper und Vallese in [6] untersuchten, ist nicht wie zuvor durch einen Korridor vorgegeben, sondern lediglich durch einen definierten lateralen Versatz von 3,5 m. Das Ziel dieser Untersuchung war, den gewünschten Versatz auf der kürzest möglichen Strecke zu erreichen.

Die zuvor genannten Arbeiten beschäftigten sich alle mit realen Fahrversuchen. In [7] verwendete Sharp hingegen eine Simulation des Fahrstreifenwechsels. Er gab einen Pfad vor und untersuchte den Einfluss verschiedener Parameter auf die Pfadtreue. Der vorgegebene Pfad wurde von [5] herangezogen. In Abbildung 3 werden der vorgegebene und ein simulierter Kurs dargestellt.

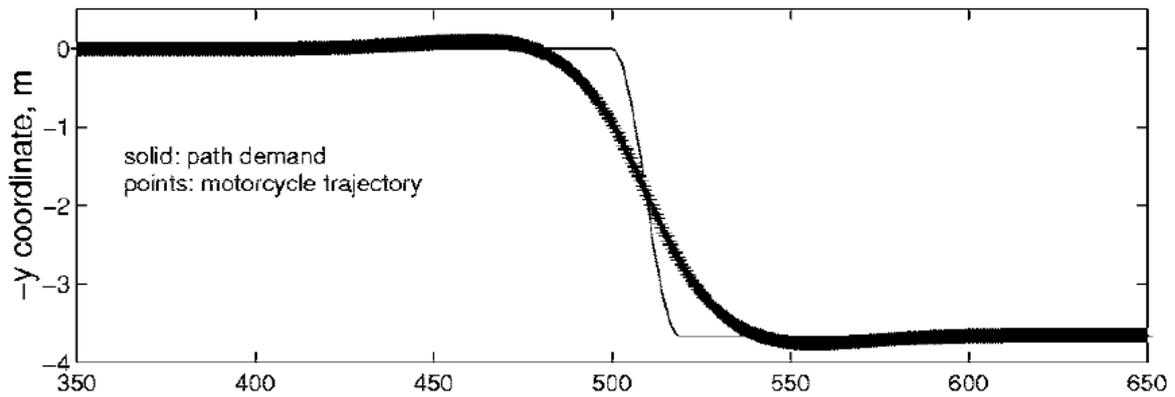


Abbildung 3: Simulationskurs Sharp [7, p. 378]

Der untersuchte Geschwindigkeitsbereich erstreckte sich in allen genannten Arbeiten von mindestens 32 km/h (20 mph) bis maximal 100 km/h, mit Ausnahme der Arbeit von Sharp. Er wählte für seine Simulationen eine Geschwindigkeit von 108 km/h. Bei den Untersuchungen ging es entweder darum, das Manöver mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit zu absolvieren, oder die maximal mögliche Geschwindigkeit für die jeweilige Aufgabenstellung herauszufinden. (vgl. [2], [3], [4], [5], [6], [7])

Die von Watanabe in [2] über die Zeit aufgezeichneten fahrdynamischen Parameter sind:

- Rollwinkel
- Lenkwinkel
- Lenkmoment

Zusätzlich ermöglichten ihm die Verläufe die Extremwerte der drei Parameter abzulesen und die Reaktionszeit auszuwerten.

In [3], [4] und [5] haben Rice et al., zusätzlich zu den von Watanabe gemessenen Parametern, die Werte für:

- Gierrate
- Querschleunigung
- Körperrollwinkel
- Fahrgeschwindigkeit
- Änderungsraten der gemessenen Größen

aufgezeichnet.

Sharp erhielt in seinen Simulationen in [7] Ergebnisse für:

- Rollwinkel
- Lenkwinkel
- Lenkmoment

- Körperrollwinkel
- Körperrollmoment
- Versatz

Rahmenverwindung und Schräglaufwinkel für Vorder- und Hinterrad wurden ebenfalls ausgegeben, waren jedoch nicht relevant für diese Arbeit.

Kuschevski zeichnete in [6] die Fahrgeschwindigkeit und die benötigte Ausweichdistanz auf. Dies liegt daran, dass ausschließlich Serienfahrzeuge der Probanden verwendet wurden.

Schon Watanabe war in [2] bewusst, dass das fahrerische Können des Motorradfahrers Unterschiede im Ergebnis des Ausweichmanövers bedeuten musste. Deshalb wurden die Versuche mit fünf Fahrern durchgeführt, aufgeteilt in zwei Fahrer mit wenig Erfahrung, zwei weiteren mit durchschnittlicher Fahrpraxis und -können und einem fünften Fahrer, welcher sehr große fahrerische Fähigkeiten aufwies.

Rice et al. arbeiteten in [3] und [4] ausschließlich mit einem erfahrenen Fahrer, während sie in [5] mehrere Fahrer einsetzten, und dadurch auch Unterschiede im Fahrkönnen untersuchen konnten.

An Kuschevskis Untersuchung in [6] nahmen 101 freiwillige Motorradfahrer im Alter zwischen 17 und 70 Jahren teil. Über die Erfahrungswerte der Probanden sind keine Details festgehalten. Es ist aber davon auszugehen, dass ein breites Spektrum abgedeckt war.

In [7] simulierte Sharp mit unterschiedlichen Gewichtungen der Parameter Lenkmoment und Körperrollmoment bei verschiedenen Einstellungen für Pfadtreue, absolutem Körperrollwinkel und Körperrollwinkel relativ zum Motorrad. Wie später in diesem Kapitel erwähnt, sind bei den Werten von Lenkmoment und Körperrollmoment deutliche Unterschiede zwischen erfahrenen und ungeübten Fahrern bzw. zwischen einem Fahrstreifenwechsel im normalen Straßenverkehr und einem Ausweichmanöver erkennbar.

Reaktionszeiten sind in den folgenden beiden Untersuchungen bearbeitet worden:

- 1) Watanabe wertete in [2] die Reaktionszeit aus den aufgezeichneten Verläufen für das Lenkmoment und den Rollwinkel separat aus. Die durchschnittliche Dauer vom Aufforderungssignal bis zum Anstieg des Lenkmoments betrug 0,294 s. Die weitere Dauer bis zur Reaktion des Rollwinkels auf den Lenkimpuls wurde mit 0,147 s angegeben und war fahrzeug- und geschwindigkeitsunabhängig.
- 2) Kuschevski untersuchte in [6] den Anhalteweg von Motorrädern. Um auf die mittlere Bremsverzögerung rückrechnen zu können, wurde die Reaktionszeit mit 0,21 s angenommen. Dies erscheint reichlich kurz. Allerdings erklärte Kuschevski es damit, dass das Signal immer an der gleichen Stelle ausgelöst wurde und sich daher ein Gewöhnungseffekt einstellen konnte. Diese Annahme lieferte außerdem für die mittlere Bremsverzögerung niedrigere Werte und bildete damit eher den ungünstigeren Fall ab.

Aus den experimentellen und den numerischen Versuchen (Simulationen) der in diesem Kapitel genannten Arbeiten lassen sich folgend angeführte Erkenntnisse zusammenfassen. Watanabe merkte in [2] an,

- dass die Fähigkeiten des Fahrers großen Einfluss auf den benötigten Ausweichweg hatten. Ein wenig erfahrener benötigte einen zwischen 15 % und 20 % längeren Ausweichweg, als ein Fahrer mit großen Fertigkeiten. Dies kam dadurch zustande, dass der Erfahrenere größere Lenkkräfte und -winkel ausübte, was zu größerer Rollrate und deutlich größerem Rollwinkel führte.
- dass Unterschiede in der Fahrgeschwindigkeit auf den ungeübten Fahrer größeren Einfluss hatten und der Fähigere es schafft, bei gleicher Reaktionszeit, schneller eine Rollbewegung des Motorrads einzuleiten.
- dass Fahrzeuggewicht und -größe nicht alleine ausschlaggebend dafür waren, ob ein Motorrad gute oder schlechte Unfallvermeidungseigenschaften besaß.

In [3] und [4] erkannten Rice et al.,

- dass der Fahrer die longitudinale Distanz der Gassen praktisch vergrößerte, indem er das Spurwechselmanöver bereits einleitete bevor er die erste Gasse verließ und es erst deutlich nach Einfahrt in die Endgasse beendete.
- dass bei Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit der Hauptinput des Fahrers vom Lenkwinkel zum Körperrollwinkel wechselte, dafür aber mehr Lenkmoment notwendig war, um den Lenkwinkel zu begrenzen.

Die letzte Hypothese widerlegten Rice et al. jedoch in [5], da hier alle Fahrer jeden Versuch durch Lenkmoment initiierten. Außerdem bemerkten Rice et al. in [5],

- dass der erfahrenste Fahrer Körperrollmoment sogar ausschließlich im späteren Verlauf des Manövers einsetzte, wo er sich aus dem ersten Bogen hinauslehnte. Der durchschnittliche Fahrer hingegen lehnte sich zuerst mit dem Motorrad in die Kurve, bevor er seinen Körper aus der Kurve lehnte.
- dass die Körperbewegung des Anfängers mehr reaktiv als durchdacht wirkte, denn er verwendete deutlich mehr Lenkmomentwechsel als die anderen Fahrer. Bei einem der Versuche lag dieser oszillatorische Input im Lenkmomentverlauf im Bereich von 3 Hz, welcher eigentlich außerhalb der Bandbreite der menschlichen Steuerbarkeit liegt.
- dass die Verlängerung der longitudinalen Distanz des Manövers erneut erkennbar war.
- dass die durchschnittliche Dauer des Fahrstreifenwechsels bei Geschwindigkeiten um 60 km/h etwa vier Sekunden betrug. Dies bedeutete, dass der Fahrstreifenwechsel über eine Distanz von ungefähr 230 ft (70 m) stattfand, obwohl die Distanz der Gassen lediglich 60 ft (ca. 18 m) betrug.
- dass vom Fahranfänger kein typischer Verlauf der Daten ermittelt werden konnte, da sich der Ablauf des Manövers wiederholt änderte.
- dass erfolglose Versuche nicht an einem speziellen Merkmal in den Daten festgemacht werden konnten. Im Allgemeinen lag der Grund für einen fehlerhaften Versuch daran, dass ein Steuerungseingriff zum falschen Zeitpunkt durchgeführt wurde, wobei bei

keinem Versuch die Kontrolle über das Fahrzeug verloren ging. Rice et al. stellten die Hypothese auf, dass erfahrene Fahrer eine Art vorprogrammierten Steuerungsablauf durchführen, welcher entweder erfolgreich ist oder eben nicht, obwohl sich die Manöver nicht unterscheiden.

Sharp stellte in [7] die Hypothese auf, dass die optimale Steuerung des Lenkmoments kaum vom Körperrollmoment abhängig wäre. Weiters behauptete er, dass das Körperrollmoment hauptsächlich dazu diene, den Körper relativ zum Motorrad zu bewegen, um für bessere Sicht zu sorgen und um die Dynamik des Systems in einer sehr niederfrequenten, passiven Weise zu verbessern. Auch in der Simulation wurde die für das Manöver benötigte Strecke durch frühzeitiges Einleiten und langes Ausgleiten verlängert, was besonders die Fahrstreifenwechsel gut abbildete, bei denen es sich nicht um ein Ausweichmanöver handelte.

3. Einführung in den praktischen Teil der Arbeit

Dieses Kapitel beschreibt das verwendete Fahrzeug, die Planungsphase sowie die drei verschiedenen durchgeführten Versuche. Die genauen Abläufe der Versuche werden in Kapitel 5 detailliert beschrieben.

3.1. Das Motorrad – KTM 1290 Super Adventure S

Bei dem für die Versuche verwendeten Fahrzeug handelt es sich um das Modell *1290 Super Adventure S*, Baujahr 2015, des österreichischen Motorradherstellers *KTM*. Das Fahrzeug, dargestellt in Abbildung 4, ist eine Leihgabe des Herstellers an die Technische Universität Wien, in Kooperation mit dem Austrian Institute of Technology (AIT) und wird grundsätzlich für ein großes Verkehrssicherheitsprojekt namens „MoProVe“ zur Verfügung gestellt.



Abbildung 4: KTM 1290 Super Adventure S (2015) [8]

Das Motorrad eignet sich aufgrund der verschiedenen OnBoard-Sensoren besonders gut für fahrdynamische Untersuchungen. Die gesammelten Daten aus den Sensoren werden über ein so genanntes CANBUS-System verbunden und durch Unterstützung seitens KTM ausgelesen. Die erhaltenen Daten können zur weiteren Ver- und Bearbeitung in einem Datalogger gespeichert werden. Für das Projekt „MoProVe“ wurde die KTM mit einer Messeinrichtung der Marke Racelogic [9], sowie einem System der Marke 2D - Debus & Diebold [10] ausgestattet. Diese Messsysteme werden in Kapitel 4 näher vorgestellt. Zusätzlich wurde für diese Arbeit ein eigener elektrischer Schaltkreis entwickelt, welcher es ermöglicht, die Reaktionszeit des Fahrzeuglenkers auf ein externes Signal, wie zum Beispiel eine Ampel, zu messen. Das Messsystem von Racelogic wurde, bereits im Rahmen von „MoProVe“, um zwei Kameras erweitert, welche die Fahrten aufzeichnen und Bildmaterial zur Auswertung von Testfahrten liefern. Der speziell angefertigte Aufbau der Messtechnik beeinträchtigt die Straßenzulassung des Fahrzeugs nicht, wodurch das Motorrad ohne Einschränkungen im öffentlichen Straßen-

verkehr bewegt werden darf. In Tabelle 2 sind einige technische Daten zum verwendeten Motorrad angeführt.

Tabelle 2: Relevante technische Daten der KTM 1290 Super Adventure S [11]

Hubraum	1301 ccm
Gewicht (fahrfertig)	249 kg
Sitzhöhe	860-875 mm
Radstand	1560 mm
Lenkkopfwinkel	64,0 Grad
Nachlauf	120 mm
Reifendimension vorne	120/70ZR19
Reifendimension hinten	170/60ZR17

3.2. Die Fahrer

Die Spurwechsel- sowie die Reaktionszeitversuche in dieser Arbeit wurden von zwei Fahrern durchgeführt. Diese werden in weiterer Folge mit HE bzw. SL bezeichnet. Beiden Fahrern wurde vor den Versuchen Zeit eingeräumt, um sich mit dem Motorrad und den zusätzlich eingebauten Tastern vertraut zu machen. HE ist ein 60 Jahre alter Motorradfahrer mit Erfahrung und Fahrpraxis auf Motorrädern bis über 1000 cm³ Hubraum. Sein Fahrverhalten ist als sehr aufmerksam und mit großen Sicherheitsreserven zu beschreiben. SL ist 27 Jahre alt. Seine Erfahrung reicht ebenfalls bis hin zu Motorrädern mit über 1000 cm³ Hubraum im Straßenverkehr und auf der Rennstrecke. Das Fahrverhalten von SL ist sportlich, mit größerer Risikobereitschaft und einer Vorliebe für schnelles Fahren. An dieser Stelle ist anzumerken, dass keiner der beiden Fahrer während der Versuche auch nur in die Nähe der Grenzen seiner fahrerischen Fähigkeiten gekommen ist.

3.3. Die Planungsphase

Aus den in der Literatur gesammelten Informationen zu bereits durchgeführten Messungen von Fahrstreifenwechseln wurden für diese Arbeit relevante Eckdaten herausgefiltert. Mit diesen konnte das Themengebiet der geplanten Fahrversuche abgesteckt und ein Ablauf der Versuche erstellt werden.

Folgende Punkte erwiesen sich als relevant:

1) Der Ort

- Die ersten Versuche wurden bereits von HE auf der Schnellstraße S5 durchgeführt. Der mögliche Geschwindigkeitsbereich liegt zwischen 80 km/h und 130 km/h. Bei durchschnittlichem Verkehrsaufkommen sind

Spurwechselversuche bei geringeren Geschwindigkeiten ein Hindernis für den nachfolgenden Verkehr und damit zu gefährlich. Daher ist eine Strecke für niedrigere Geschwindigkeiten notwendig.

- Mögliche bekannte Strecken im Stadtgebiet sind die Neunkirchner Allee und die Doktor-Nekowitsch-Straße. Der mögliche Geschwindigkeitsbereich liegt hier bei etwa 40~60 km/h. Diese Straßen ermöglichen jedoch keine Tests in dem wichtigen Geschwindigkeitsbereich zwischen 60 km/h und 80 km/h.
- Eine Alternative sind daher nicht öffentliche Straßen bzw. Testgelände. Mögliche Destinationen wären hier das ÖAMTC-Testgelände am Wachauring in Melk oder das ÖBB-Güterverkehrsterminal in Inzersdorf. Letzteres hat an Wochenenden geschlossen und würde daher ideale Bedingungen für die geplanten Versuche bieten.

2) Versuchsparameter und -anzahl

- Um einen möglichst großen Bereich an Parametern untersuchen zu können, sollen drei verschiedene Versatzbreiten, 1/2, 1/1, 3/2 Fahrstreifenbreiten, gefahren werden.
- Dabei sollen Geschwindigkeiten von 30 km/h bis 130 km/h in 10 km/h-Schritten getestet werden.
- Als wichtiger Eingangsparameter wird in Kapitel 6.5.3 erstmals die vom Fahrer angewandte Intensität definiert. Eine niedrige, mittlere sowie hohe Intensität soll gefahren werden.
- Bei jeweils zwei gelungenen Spurwechseln nach rechts und links, mit ganzen und halben Fahrstreifenbreiten Versatz und zwei unterschiedlichen Intensitäten ergeben sich bereits mindestens 176 zu fahrende Versuche, jede weitere Parameteränderung führt zu weiteren 88 Versuchen.

3) Versuchsablauf und -kursgeometrie

- Bevor die Literaturrecherche durchgeführt wurde stand die Frage im Raum, ob es einen Normtest für Motorräder gibt, bei welchem ein Fahrstreifenwechselmanöver untersucht wird. Zum Zeitpunkt der Recherche gibt es keinen genormten Testablauf bzgl. exakter Kursgeometrie und Fahrgeschwindigkeit. Allerdings ist aus Kapitel 2 zu entnehmen, dass die Kursgeometrie aus [3] in mehreren Arbeiten übernommen wurde und damit für Vergleichszwecke am besten geeignet ist.
- Für Versuche auf nicht öffentlichen Straßen sollten die Breiten der Spurgassen von [3] übernommen werden. Der Einsatz von Bodenmarkierungen (Linien), anstelle von Hütchen oder Pylonen, ermöglicht dabei die Durchführung der Manöver an einer beliebigen Stelle einer längeren Strecke.
- Die longitudinale Distanz der beiden Spurgassen sollte nach ersten Versuchen für die geplanten Geschwindigkeiten definiert werden.
- Zur Sicherheit auf öffentlichen Straßen empfiehlt sich, dass ein PKW vor und hinter dem Motorrad fährt.

- Zwischen zwei Manövern dient eine kurze gerade Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit dazu, die Auswertung der Daten bezüglich Anfang und Ende des Manövers klar unterscheiden zu können.
- Für die Reaktionszeitmessungen muss eine Möglichkeit gefunden werden die Reaktion des Fahrers elektronisch darzustellen und auf den Dataloggern abzuspeichern.

Einen Tag vor den geplanten Versuchen auf einem abgesperrten Gelände wurde der Zugang leider verwehrt. Daher mussten die Messungen beschränkt und im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt werden. Dazu wurde die Doktor-Nekowitsch-Straße ausgewählt. Da dort ein Tempolimit von 50 km/h gilt, wurde nur ein vorausfahrendes Auto verwendet, welches als Signalgeber benutzt wurde. In Kapitel 5 ist die Funktion des Autos genauer beschrieben.

3.4. Die Spurwechselversuche auf der Schnellstraße S5

Die Spurwechselversuche für den außerstädtischen Geschwindigkeitsbereich wurden auf der Schnellstraße S5 zwischen Königsbrunn am Wagram und Stockerau durchgeführt. An den Versuchen nahm nur der Fahrer HE teil. Das Wetter war bedeckt. Der Fahrbahnzustand war trocken. Die Aufgabenstellung war, Fahrstreifenwechsel nach links und rechts zu vollführen, welche einen Versatz von einer halben (1,75 m) oder ganzen Fahrstreifenbreite (3,5 m) aufweisen. Auf der Schnellstraße wurde kein vorausfahrendes Fahrzeug eingesetzt. Zwei Messfahrten wurden in einer Gesamtdauer von etwa einer halben Stunde absolviert. Das Ergebnis sind 57 Fahrstreifenwechsel in einem Geschwindigkeitsbereich von 70 km/h bis 115 km/h.

3.5. Die Spurwechselversuche auf der Dr.-Nekowitsch-Straße

Die Spurwechselversuche für den innerstädtischen Geschwindigkeitsbereich fanden am Stadtrand von Wien, auf der Doktor-Nekowitsch-Straße, welche zwischen Strebersdorf und Stammersdorf verläuft, statt. Beide Fahrer nahmen an den Testfahrten teil. Das Wetter war sonnig. Der Fahrbahnzustand war trocken und ohne weitere Auffälligkeiten, wie Spurrillen oder Schlaglöcher. Die Aufgabenstellung war, auf das Signal eines vorausfahrenden Autos hin einen Spurwechsel nach links zu tätigen und anschließend wieder in den Fahrstreifen hinter den PKW zu wechseln. Es wurden Messfahrten mit einer Gesamtdauer von etwa 60 Minuten durchgeführt. Dabei kamen 110 Fahrstreifenwechsel mit einer Versatzbreite von 3,5 m und gleichzeitiger Reaktionszeitmessung im Geschwindigkeitsbereich von 42 km/h bis 66 km/h zustande.

3.6. Die Reaktionszeitversuche im Raum Strebersdorf

Die Reaktionszeitversuche wurden im Zuge der Spurwechselfersuche in der Doktor-Nekowitsch-Straße, sowie auf zwei separaten Messfahrten im Raum Strebersdorf und einer Messfahrt in Niederösterreich von Wimmersdorf nach Hausleiten und zurück, durchgeführt. Die teilnehmenden Fahrer waren HE und SL. Das Wetter war leicht bewölkt, der Fahrbahnzustand unverändert trocken. Die Aufgabenstellung war, auf das Signal des vorausfahrenden Fahrzeugs hin die für diesen Test angebrachten Schalter zu betätigen. Während der Spurwechselfersuche wurden diese durch den Lenkimpuls, welcher den Spurwechsel einleitet, automatisch betätigt. Bei den separaten Reaktionszeittests wurde auf die Spurwechsel verzichtet. Es musste lediglich der Schalter betätigt werden.

4. Die eingesetzten Messsysteme

Die verwendeten Messsysteme der Firmen Racelogic [9] und 2D – Debus & Diebold [10] sowie die OnBoard-Sensorik von KTM werden in diesem Kapitel beschrieben.

Genannt werden:

- die Hersteller,
- die verwendeten Komponenten,
- die Funktionen, sowie
- aufzeichenbare und aufgezeichnete Daten.

Außerdem wird die, speziell für die Reaktionszeitversuche, entwickelte Schaltung detailliert erklärt. Ein Vergleich dieses Kapitels mit den in Kapitel 2 genannten Parametern zeigt, dass die gleichen Messgrößen aufgezeichnet werden. Die einzigen Ausnahmen sind das Lenkmoment, sowie Körperrollwinkel und -moment.

4.1. Das KTM OnBoard-Datensystem

Das Messmotorrad ist serienmäßig mit hochwertiger Sensorik ausgestattet, um integrierte Fahrassistenzsysteme wie Schräglagen-ABS, Tempomat, Traktions- und Stabilitätskontrolle zu ermöglichen. Mit Hilfe werksseitiger Unterstützung von KTM werden gemessene Daten in den beiden Dataloggern von 2D - Debus & Diebold, sowie Racelogic aufgezeichnet. In den Dataloggern wurden Messwerte für folgende Parameter der OnBoard-Sensorik abgespeichert:

- Motordrehzahl in min^{-1}
- Temperatur der Kühlflüssigkeit in $^{\circ}\text{C}$
- eingelegter Gang
- Drosselklappenstellung in %
- Rollwinkel in Grad
- Radgeschwindigkeit vorne/hinten in km/h
- Bremsdruck am Hauptbremszylinder vorne/hinten in bar
- Bremsdruck am Bremssattel vorne/hinten in bar
- Reifendruck vorne/hinten in mbar

Zusätzlich wurden Daten über Fehlfunktionen der einzelnen Sensoren sowie die eingestellten Fahrmodi aufgezeichnet. Des Weiteren wurden am Lenker des Messmotorrads zwei Taster montiert, welche zur Markierung außergewöhnlicher Ereignisse, wie Verkehr, Schlaglöcher, Blendung durch die Sonne oder ähnliche Störfaktoren, von dem Fahrer ausgelöst werden können.

4.2. Die Racelogic VBOX

Das Messsystem von Racelogic besteht aus einer VBOX, einer IMU und zwei GPS/GLONASS Antennen, dargestellt in Abbildung 5.

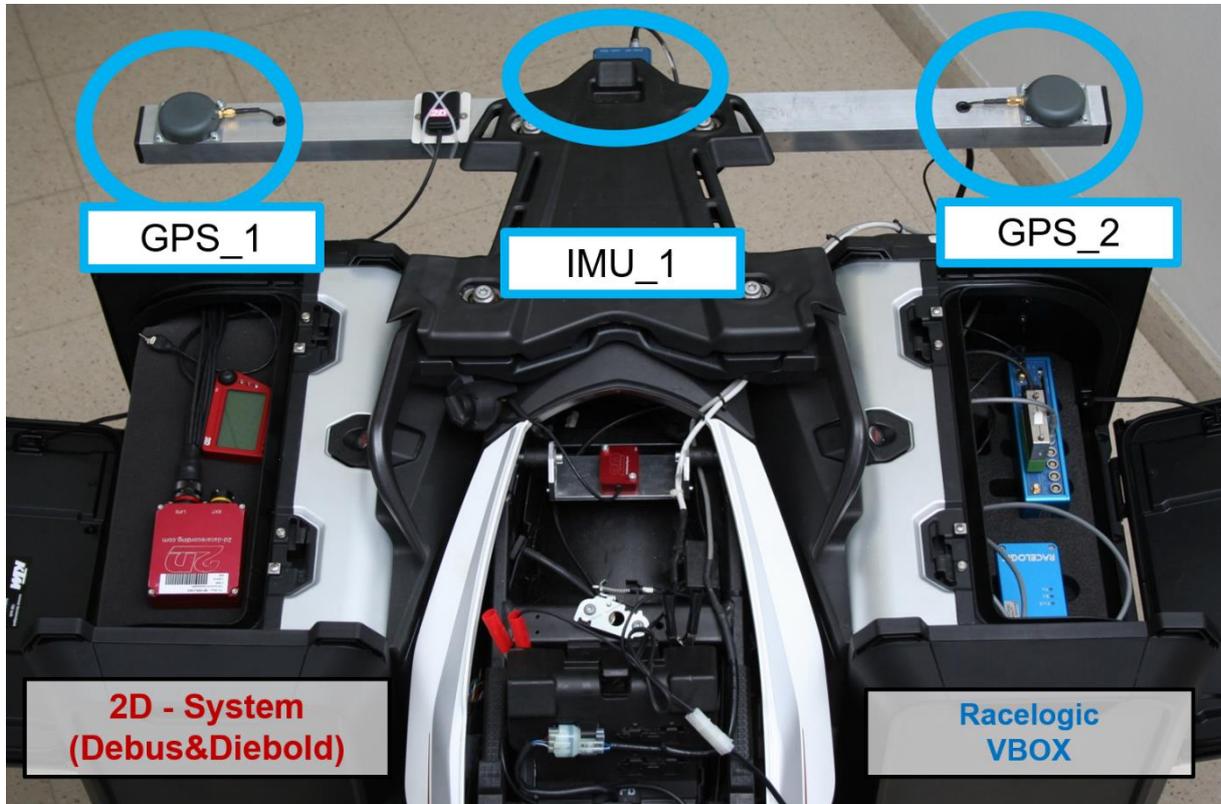


Abbildung 5: VBOX Messsystemaufbau [8]

Die VBOX ist das zentrale Steuergerät, welches die Daten der angebrachten Sensoren an den Datalogger weiterleitet. IMU steht für Inertia Measurement Unit und ist ein mehrachsiger Sensor, welcher Beschleunigungen in die Richtung der drei Raumachsen, sowie Winkelgeschwindigkeiten um die drei Raumachsen messen kann. Die Ausrichtung ist wie folgt:

- positive x-Richtung: in Fahrtrichtung
- positive y-Richtung: in Fahrtrichtung links
- positive z-Richtung: nach oben

Des Weiteren gibt es ein Modul für zwei externe Kameras, welches Videoaufzeichnungen mit den Daten der VBOX verknüpfen kann. Die Kameraaufzeichnungen spielen eine große Rolle für die Bestimmung des seitlichen Versatzes sowie um den Zeitpunkt des Aufforderungssignals festzuhalten. Die Kameras und deren Positionierung sind in Abbildung 6 ersichtlich.



Abbildung 6: Positionierung der Kameras

Mit dem Racelogic-System werden bei den für diese Arbeit durchgeführten Versuchen folgende Daten aufgezeichnet:

- Anzahl der erreichten Satelliten
- GPS-Uhrzeit
- Longitudinale und laterale Position
- Geschwindigkeit des Fahrzeugs in km/h
- Rollwinkel, Gierwinkel und Nickwinkel in Grad
- Seehöhe in m
- Longitudinale und laterale Beschleunigung in g
- Ereignis der Taster
- Rollrate, Gierrate und Nickrate in Grad/s
- Beschleunigung in x, y, z in m/s^2
- Außentemperatur in $^{\circ}C$

Zusätzlich werden Rohdaten und Filtereinstellungen sowie die Daten der KTM OnBoard-Sensorik aufgenommen.

4.3. Das Messsystem von 2D – Debus & Diebold

Das Messsystem von Debus & Diebold ist, wie auch das System von Racelogic, hauptsächlich in einem Seitenkoffer verstaut. Lediglich die GPS-Antenne sowie die zusätzliche IMU sind an anderen Positionen am Motorrad angebracht, siehe Abbildung 7.

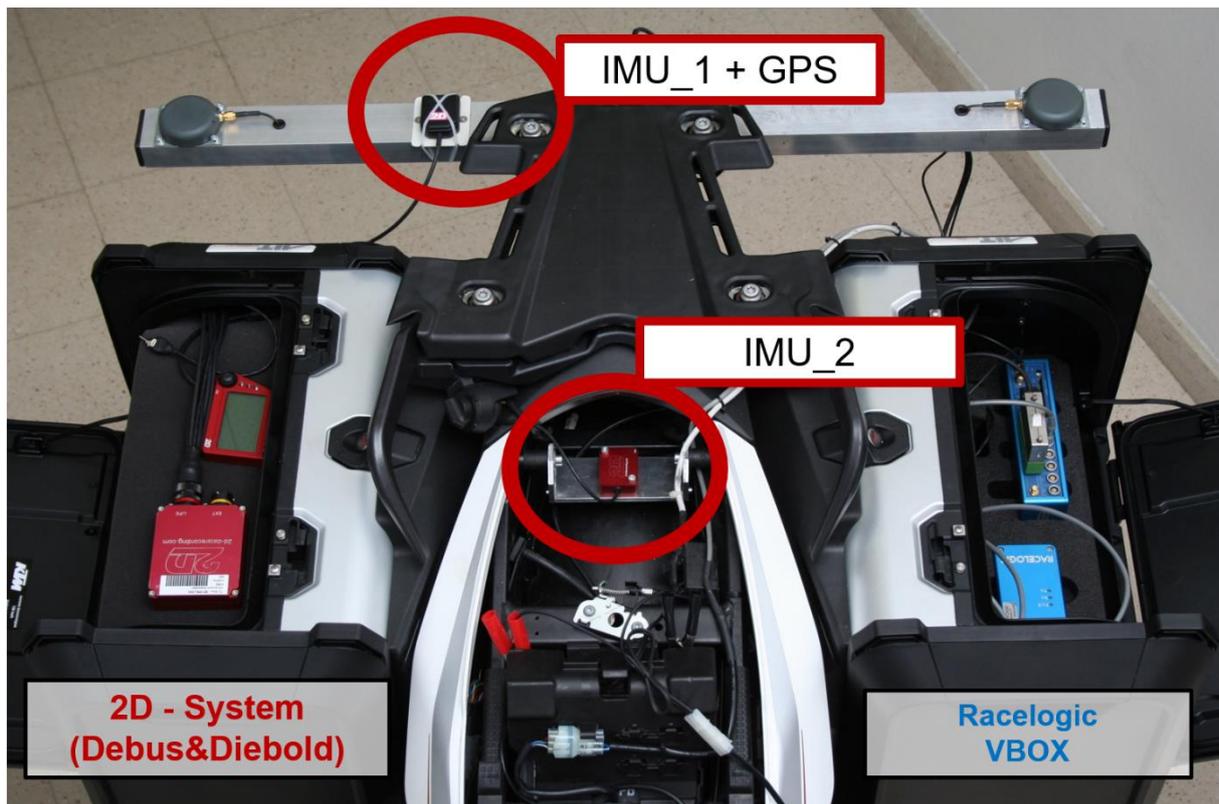


Abbildung 7: 2D Messsystemaufbau [8]

Die IMUs von 2D sind, wie auch die von Racelogic, 6-Achsen-Sensoren. Die Ausrichtung der beiden 2D-IMUs entspricht dem System von Racelogic. Zusätzlich zu den Beschleunigungssensoren wird ein Lenkwinkelsensor eingesetzt, welcher in Abbildung 8 ersichtlich ist. Die Daten dieses Sensors werden ausschließlich im 2D-System aufgezeichnet.

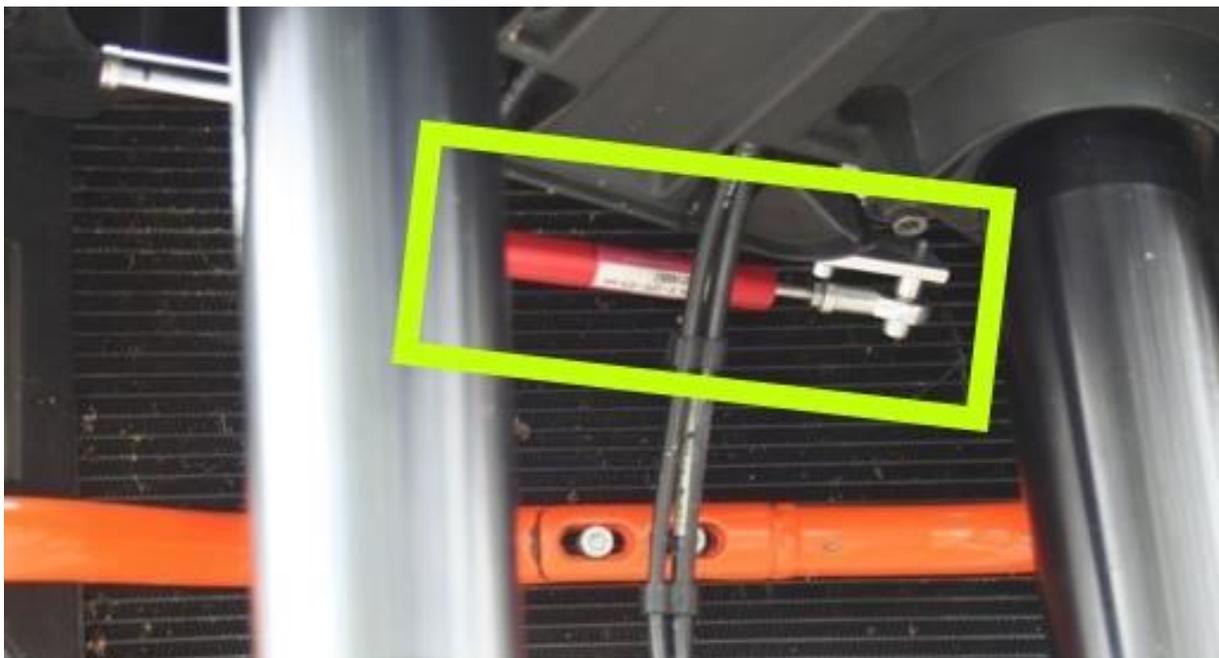


Abbildung 8: Position des Lenkwinkelsensors

Außerdem werden neben den Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten in und um die drei Raumachsen, sowie dem Lenkwinkel, folgende Parameter im System von Debus & Diebold aufgezeichnet:

- Zeit ab Beginn der Aufzeichnung
- Gefahrene Distanz ab Beginn der Aufzeichnung in m
- Abfrage, ob Aufzeichnung aktiv
- Trigger-Spannung in V (Ereigniskanale → Ereignis zu Spannungslevel programmierbar)
- Anzahl der erreichten Satelliten
- GPS-Datum mit Uhrzeit
- Ereignis für roten und grünen Taster
- Longitudinale und laterale Position
- Seehöhe in m

4.4. Der Signalgeber für die Reaktionszeitmessung

Die bestehende Schaltung der Taster ist nicht für die Aufzeichnung von Reaktionszeiten ausgelegt und wurde daher für diesen Zweck umgebaut. Die beiden Ereignisschalter werden aktuell durch nur einen Eingang im Datalogger aufgezeichnet. Dies wird durch eine Spannungsteiler-Schaltung erreicht, welche bei Betätigung eines der beiden Taster die Spannung am Datalogger von der Mittelspannung, 2,5 V, auf 1 V oder 4 V ändert. Die 2D-Software ist in der Lage, diese beiden Schwellwerte als getrennte Signale aufzuzeichnen. Anstelle eines der beiden Schalter wird nun ein zusätzlicher Schaltkreis aufgebaut. Die beiden Schaltungen sind im Anhang illustriert. Durch Betätigung eines der beiden Signaltaster an den Lenkergriffen (siehe Abbildung 9), wird im Datalogger ein Eingangskanal aktiviert.



Abbildung 9: Position der Taster (blau) und LED (grün)

Die Taster wurden an der Innenseite der Griffe angebracht und dem Fahrer zugewandt orientiert. Die Auslösung erfolgt unbewusst durch den Druck der Hand gegen das Lenkerende, welcher den Fahrstreifenwechsel einleitet. Die Auslösekraft der Taster ist mit 1,6 N im Datenblatt angegeben. Zusätzlich zu den beiden Tastern wurde eine Signal-LED eingebaut, welche in Abbildung 9 grün markiert ist. Diese unterstützt den Fahrer dabei, den Status des Schalters zu überprüfen. Sobald der Taster betätigt wird, leuchtet eine Leuchtdiode und signalisiert so die Betätigung. Dies ist notwendig, da der Fahrer mit Handschuhen ausgerüstet die Betätigung des Tasters nicht, oder nur sehr schwach, fühlt.

5. Der Versuchsablauf

In diesem Kapitel wird der genaue Ablauf der Versuchsfahrten erklärt. Es werden die durchgeführten Manöver, die gefahrenen Strecken sowie Details der Messungen und deren Anzahl beschrieben.

5.1. Die Fahrstreifenwechselversuche

Bei den Versuchsfahrten in der Doktor-Nekowitsch-Straße wurde zusätzlich zum Messmotorrad ein PKW eingesetzt, welcher vorausfuhr, um das Signal für den Fahrstreifenwechsel zu geben. Vor Ort wurden die Messsysteme und das Kamerasystem hochgefahren, die Aufgabenstellung besprochen und anschließend die erste Messfahrt gestartet. Das vorausfahrende Fahrzeug fuhr dabei mit konstanter Geschwindigkeit in einem Bereich von zirka 50 km/h und betätigte die Warnblinkanlage als Signal für den Start des Fahrstreifenwechsels. Der Spurwechsel wurde nach links eingeleitet, wobei keine Gefahr für den Fahrer bestand, da das Signal nur gegeben wurde, wenn sich kein entgegenkommendes Fahrzeug auf dem linken Fahrstreifen befand. Das Manöver galt nach vollständigem Fahrstreifenwechsel als beendet.

Ein Fahrstreifenwechsel nach links kann in folgende Schritte unterteilt werden (jener nach rechts erfolgt entsprechend gegengleich):

- 1) Aufbau von Schräglage nach links bis ein Maximum erreicht ist
- 2) Nach Erreichen des Maximums die Schräglage gleichmäßig verringern
- 3) In einen Rollwinkel nach rechts überleiten bis zu einem (zumindest lokalen) Maximum
- 4) Nach Erreichen dieses Maximums, den Rollwinkel auf nahezu Null verringern.

Der Fahrer fuhr, wenn es die Situation erlaubte, eine kurze Strecke gerade und in aufrechter Stellung weiter und führte danach einen zweiten Spurwechsel nach rechts durch, bei dem die Reaktionszeit nicht mehr gemessen, der Fahrstreifenwechsel jedoch zur Auswertung herangezogen wurde. Das Motorrad wurde dabei jeweils von der Mitte des Fahrstreifens zur Mitte des benachbarten Fahrstreifens bewegt.

Die erste Versuchsfahrt wurde von Fahrer HE durchgeführt, wobei er die Strecke dreimal in jede Richtung abfuhr und 34 Spurwechsel, mit 17 Reaktionszeitmessungen, aufzeichnete. Die zweite Versuchsfahrt wurde erneut von HE unternommen, wobei er die Versuchsstrecke viermal abfuhr und 40 Spurwechsel, mit 20 Reaktionszeitmessungen, durchführte. Versuchsfahrt 3 wurde von Fahrer SL durchgeführt. Dabei absolvierte er 36 Spurwechsel, mit 18 Reaktionszeitmessungen. Die aus den drei Versuchsfahrten zustande gekommene Anzahl von insgesamt 110 Fahrstreifenwechseln wurde, auch aufgrund des eingeschränkten Geschwindigkeitsbereichs, für ausreichend befunden. Im Anschluss wurden weitere

Versuchsfahrten für die Untersuchung der Reaktionszeit der Fahrer auf ein reaktionsaufforderndes Lichtsignal unternommen. Diese Versuche werden im folgenden Teil beschrieben.

Die Fahrstreifenwechsel auf der Schnellstraße S5 wurden nach demselben Ablauf durchgeführt. Da aber auch Fahrstreifenwechsel mit einem Versatz von einer halben Fahrstreifenbreite absolviert wurden, wurde das Motorrad auch von der Fahrstreifenmitte zu einer benachbarten Leitlinie und zurück, bzw. bei ganzen Fahrstreifenwechseln von Leitlinie zu Leitlinie bewegt. Alle weiteren Informationen wurden bereits in Kapitel 3.4 festgehalten.

5.2. Die Reaktionszeitversuche

Die Reaktionszeitversuche wurden im Zuge der Fahrstreifenwechselversuche durchgeführt, sowie im Rahmen eigenständiger Versuchsfahrten. Während der Spurwechselversuche wurde über das Kamerasystem das Aufleuchten des Aufforderungssignals aufgezeichnet. Daher konnte bei der Auswertung des Videomaterials der Zeitpunkt des Signalbeginns ermittelt werden, siehe Kapitel 6.3.1. Durch den zum Einleiten des Fahrstreifenwechsels getätigten Lenkimpuls wurde der Schalter betätigt, welcher im Datalogger einen Eintrag hinterließ. Dadurch konnte in der späteren Auswertung der Video- und Messdaten die Zeit zwischen Aufforderungssignal und aktivem Eingreifen des Fahrers ins Geschehen bestimmt werden, welche der Reaktionszeit des Fahrers auf das Aufforderungssignal entspricht. Während der Spurwechselversuche wurden 55 Reaktionszeitmessungen durchgeführt.

Bei den separaten Versuchsfahrten wurden keine Fahrstreifenwechsel durchgeführt. Die Reaktionszeit wurde durch Betätigen des Schalters aufgenommen. Die erste Fahrt wurde von SL durchgeführt. Zu Beginn wurde kein bewusstes Signal durch das vorausfahrende Auto eingesetzt, was jedoch dazu führte, dass einerseits kaum Signale, wie Bremslicht, Blinken oder Ähnliches, auftraten und andererseits, wie sich später in der Auswertung zeigte, nicht genau erkennbar war, auf welches Signal reagiert wurde. Das Problem wurde jedoch noch während der Fahrt erkannt und durch den gezielten Einsatz der Warnblinkanlage behoben. Bei dieser Messfahrt wurden 31 Reaktionszeitmessungen aufgezeichnet. Für die letzte Versuchsfahrt von HE an diesem Tag ist anzumerken, dass die Aufzeichnung der Daten nicht funktionierte und deshalb einen Tag später eine gesonderte Versuchsfahrt mit HE stattfand. Es wurden dabei 89 Reaktionszeitmessungen durchgeführt.

6. Die Aufbereitung und Auswertung der Messdaten

Im folgenden Kapitel wird zunächst die Aufbereitung der Rohdaten aus den Dataloggern und dem Videomaterial erklärt. Im Anschluss wird die Vorgehensweise bei der Auswertung der Daten ausführlich beschrieben.

6.1. Einführung in die Aufbereitung der Messdaten

Die beiden Datalogger speichern die Messdaten als Textdatei ab. In einer Textzeile sind alle gemessenen Daten zu einem bestimmten Zeitpunkt eingetragen. Die verschiedenen Daten sind dabei im 2D-System [10] durch Semikolons bzw. Tabstopps und im Racelogic-System [9] durch Leerzeichen voneinander getrennt. Tabelle 3 zeigt einen Ausschnitt der Rohdaten. Dabei ist zu sehen, dass in den ersten beiden Zeilen die Bezeichnungen der Parameter, gefolgt von den zugehörigen Einheiten und folgend die jeweiligen Parameterwerte eingetragen sind. In dieser Form sind die Daten unhandlich und werden daher in Microsoft Excel überspielt, wo sie übersichtlicher (zeilen- und spaltenweise) dargestellt werden können.

Tabelle 3: Überblick der Rohdaten

2D (Semikolon)	Time;Dist;Lenkwinkel;RecOn;Trigger;IMU_ACC_X;IMU_ACC_Y;IMU_A ss_Val;ABS_Fro_Mas_Cyl_Press_Vali;ABS_Front_Master_Cylinder; s;m;deg;;V;m/s ² ;m/s ² ;m/s ² ;deg/s;deg/s;deg/s;m/s ² ;m/s ² ;m/s ² ;c 0.000;0;-0.2;1.0;2.50;0.27;-0.10;10.25;-0.12;0.53;0.74;0.5;- 0.010;0;-0.2;1.0;2.50;0.65;-0.01;9.29;-0.04;0.63;0.30;0.6;-6 0.020;0;-0.2;1.0;2.50;0.54;0.22;10.32;-0.28;0.27;0.65;0.7;0. 0.030;0;-0.2;1.0;2.50;0.56;-0.13;9.66;0.55;0.81;0.36;0.6;0.1 0.040;0;-0.2;1.0;2.50;0.30;-0.13;9.76;-0.12;0.83;0.54;0.4;-6																																																																
2D (Tabstopp)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Time</th> <th>Dist</th> <th>Lenkwinkel</th> <th>RecOn</th> <th>Trigger</th> <th>IMU_ACC_X</th> <th>IMU_ACC_Y</th> <th>IMU_A</th> </tr> <tr> <th>ss_Val</th> <th>ABS_Fro_Mas_Cyl_Press_Vali</th> <th>ABS_Front_Master_Cyl</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> <tr> <th>s</th> <th>m</th> <th>deg</th> <th>V</th> <th>m/s?</th> <th>m/s?</th> <th>m/s?</th> <th>m/s?</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>-2.7</td> <td>1</td> <td>2.5</td> <td>0.81</td> <td>-0.24</td> <td>10.6</td> </tr> <tr> <td>0.01</td> <td>0</td> <td>-2.7</td> <td>1</td> <td>2.5</td> <td>-0.26</td> <td>0.08</td> <td>9.83</td> </tr> <tr> <td>0.02</td> <td>0</td> <td>-2.7</td> <td>1</td> <td>2.5</td> <td>0.94</td> <td>-0.07</td> <td>9.01</td> </tr> <tr> <td>0.03</td> <td>0</td> <td>-2.7</td> <td>1</td> <td>2.5</td> <td>-0.01</td> <td>0.3</td> <td>10.3</td> </tr> <tr> <td>0.04</td> <td>0</td> <td>-2.7</td> <td>1</td> <td>2.5</td> <td>0.57</td> <td>-0.15</td> <td>9.65</td> </tr> </tbody> </table>	Time	Dist	Lenkwinkel	RecOn	Trigger	IMU_ACC_X	IMU_ACC_Y	IMU_A	ss_Val	ABS_Fro_Mas_Cyl_Press_Vali	ABS_Front_Master_Cyl						s	m	deg	V	m/s?	m/s?	m/s?	m/s?	0	0	-2.7	1	2.5	0.81	-0.24	10.6	0.01	0	-2.7	1	2.5	-0.26	0.08	9.83	0.02	0	-2.7	1	2.5	0.94	-0.07	9.01	0.03	0	-2.7	1	2.5	-0.01	0.3	10.3	0.04	0	-2.7	1	2.5	0.57	-0.15	9.65
Time	Dist	Lenkwinkel	RecOn	Trigger	IMU_ACC_X	IMU_ACC_Y	IMU_A																																																										
ss_Val	ABS_Fro_Mas_Cyl_Press_Vali	ABS_Front_Master_Cyl																																																															
s	m	deg	V	m/s?	m/s?	m/s?	m/s?																																																										
0	0	-2.7	1	2.5	0.81	-0.24	10.6																																																										
0.01	0	-2.7	1	2.5	-0.26	0.08	9.83																																																										
0.02	0	-2.7	1	2.5	0.94	-0.07	9.01																																																										
0.03	0	-2.7	1	2.5	-0.01	0.3	10.3																																																										
0.04	0	-2.7	1	2.5	0.57	-0.15	9.65																																																										
Racelogic (Leerzeichen)	<p>[column names]</p> <p>sats time lat long velocity heading height vert-vel Longacc</p> <p>[data]</p> <p>010 080514.900 +2897.71109590 -0983.59054686 000.290 355.48</p> <p>010 080514.910 +2897.71109635 -0983.59054694 000.358 193.65</p> <p>010 080514.920 +2897.71109595 -0983.59054689 000.245 355.39</p> <p>010 080514.930 +2897.71109633 -0983.59054695 000.203 193.26</p> <p>010 080514.940 +2897.71109619 -0983.59054695 000.538 002.60</p>																																																																

Im Anschluss daran werden die beiden Messsysteme synchronisiert. Während das System von Racelogic mit der GPS-Zeit arbeitet, startet das 2D-System die Zeitzählung bei jedem Messbeginn neu bei Null. Die Synchronisierung wird durchgeführt, indem ein Ereignis mit einem markanten Messwertverlauf, im folgenden Beispiel der Rollwinkel während eines Fahrstreifenwechsels, in beiden Messdaten gesucht wird. Die relevanten Daten werden anschließend in ein Diagramm eingefügt und übereinandergelegt. Anschließend wird der Auswahlbereich des zweiten Datensatzes so verschoben, dass die beiden Kurven größtmöglich übereinstimmen. Die Genauigkeit der Übereinstimmung ergibt sich durch die Auflösung der Messdaten zu $\pm 0,01$ Sekunden. Diese Vorgehensweise ist im Folgenden in Abbildung 10 bis Abbildung 12 dargestellt.

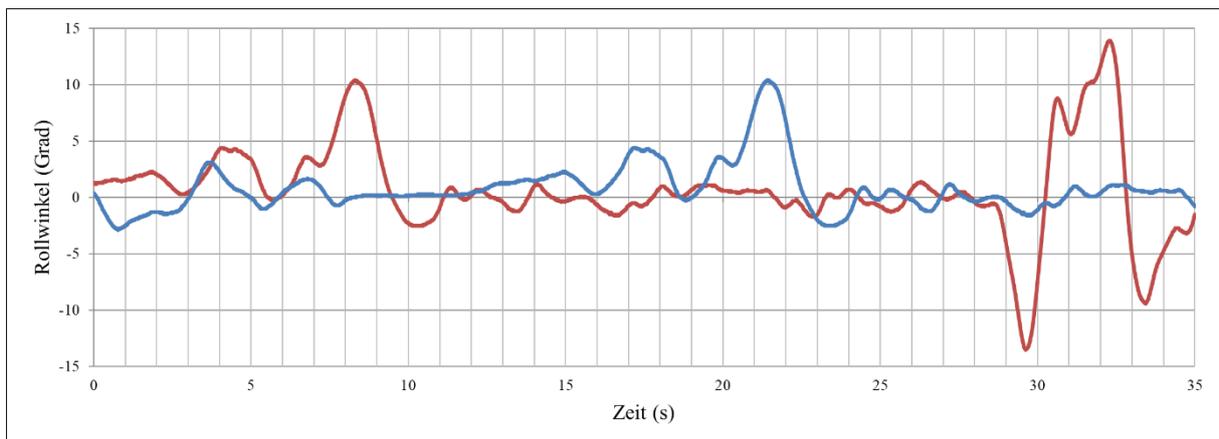


Abbildung 10: Synchronisierung der Daten – Differenz unter einer Minute (VBOX blau, 2D rot)

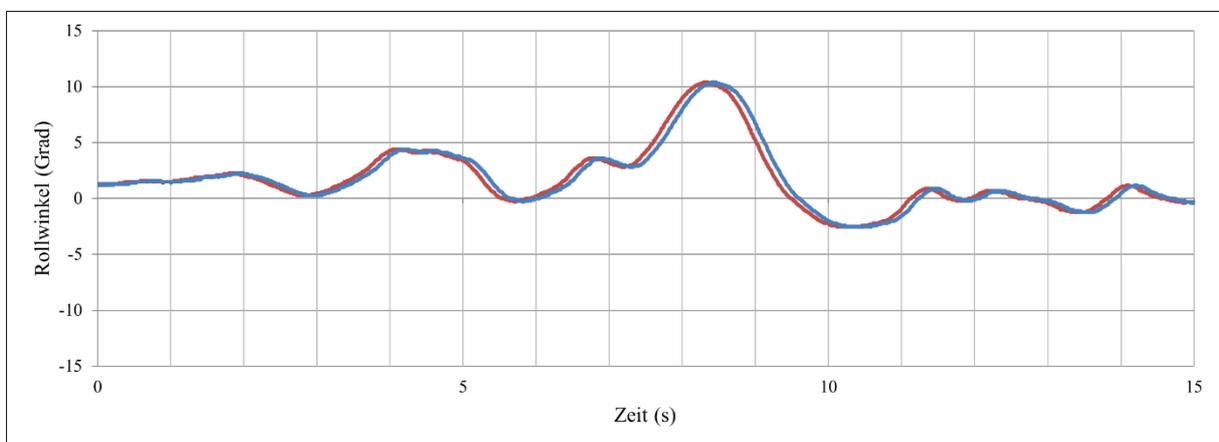


Abbildung 11: Synchronisierung der Daten – Differenz unter 0,2 Sekunden (VBOX blau, 2D rot)

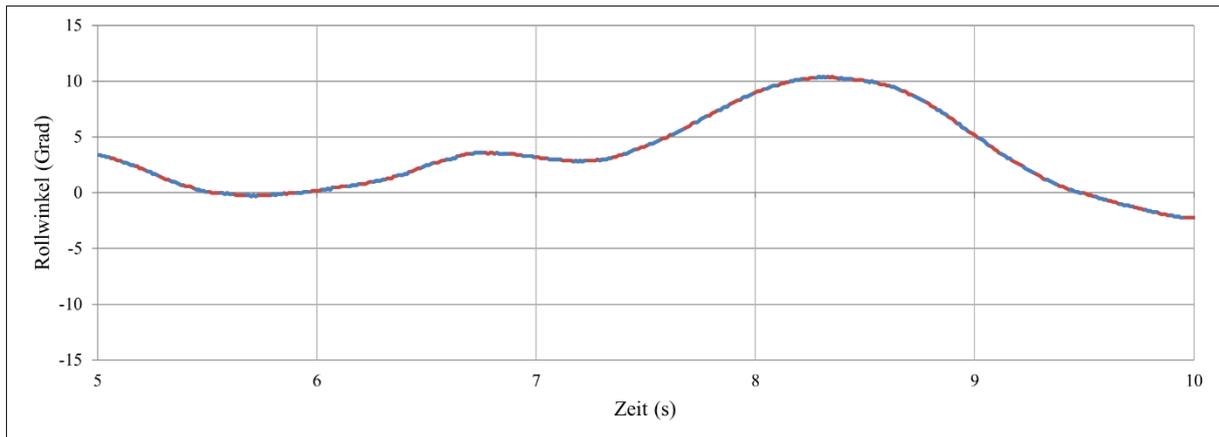


Abbildung 12: Synchronisierung der Daten – Differenz unter 0,01 Sekunden (VBOX blau, 2D rot)

Die Verschiebung der beiden Datensätze beträgt bei den Messfahrten wie folgt:

- 0809_HE_1 58,21 Sekunden (VBOX vor 2D)
- 0809_HE_2 38,69 Sekunden (VBOX vor 2D)
- 0809_SL_1 9,67 Sekunden (2D vor VBOX)
- 0809_SL_2 3,31 Sekunden (VBOX vor 2D)
- 0909_HE_1 24,95 Sekunden (VBOX vor 2D).

Der nächste Schritt der Aufbereitung besteht darin, das Videomaterial aufzuarbeiten und die Zeitpunkte des Aufforderungssignals, siehe Abbildung 13, zu notieren. Die Kameras haben eine Aufnahmezeit von 30 fps. Das bedeutet, dass 30 Bilder pro Sekunde, bzw. ein Bild alle 0,033 Sekunden, aufgezeichnet wird. Da die beiden Messsysteme mit einer Aufnahmezeit von 100 Hz arbeiten, ergeben sich daraus etwa drei Messwerte pro Bild. Daher entspricht die zeitliche Genauigkeit des Bildmaterials der Aufnahmezeit der Kameras.



Abbildung 13: Kamerabild der Reaktionszeitmessung

Abbildung 14 zeigt drei aufeinanderfolgende Bilder von „Signal aus“ bis „Signal ein“. Man erkennt, dass im mittleren Bild die Warnblinkanlage bereits zu leuchten beginnt. Allerdings noch nicht so hell wie im rechten Bild. Bei Videoaufzeichnungen mit einem solchen Verlauf zählt erst jener Zeitpunkt, ab welchem die Signalanlage die volle Helligkeit erreicht hat.



Abbildung 14: Aufforderungssignal der Reaktionszeitmessung

6.2. Die Aufbereitung der Reaktionszeitdaten

Bei der Sichtung der Messdaten zeigte sich, dass die Rollrate sensitiv auf den Fahrstreifenwechsel reagiert. Daher ist es möglich, die Reaktionszeit des Fahrers auch über fahrdynamische Messwerte zu bestimmen. Für die Auswertung werden Datensätze der Rollrate und des Taster-Signals mit einer Dauer von fünf Sekunden mit dem zeitlichen Beginn bei Betätigung des Aufforderungssignals aufbereitet und in Diagrammen veranschaulicht. In Abbildung 15 ist ein solches Diagramm beispielhaft dargestellt.

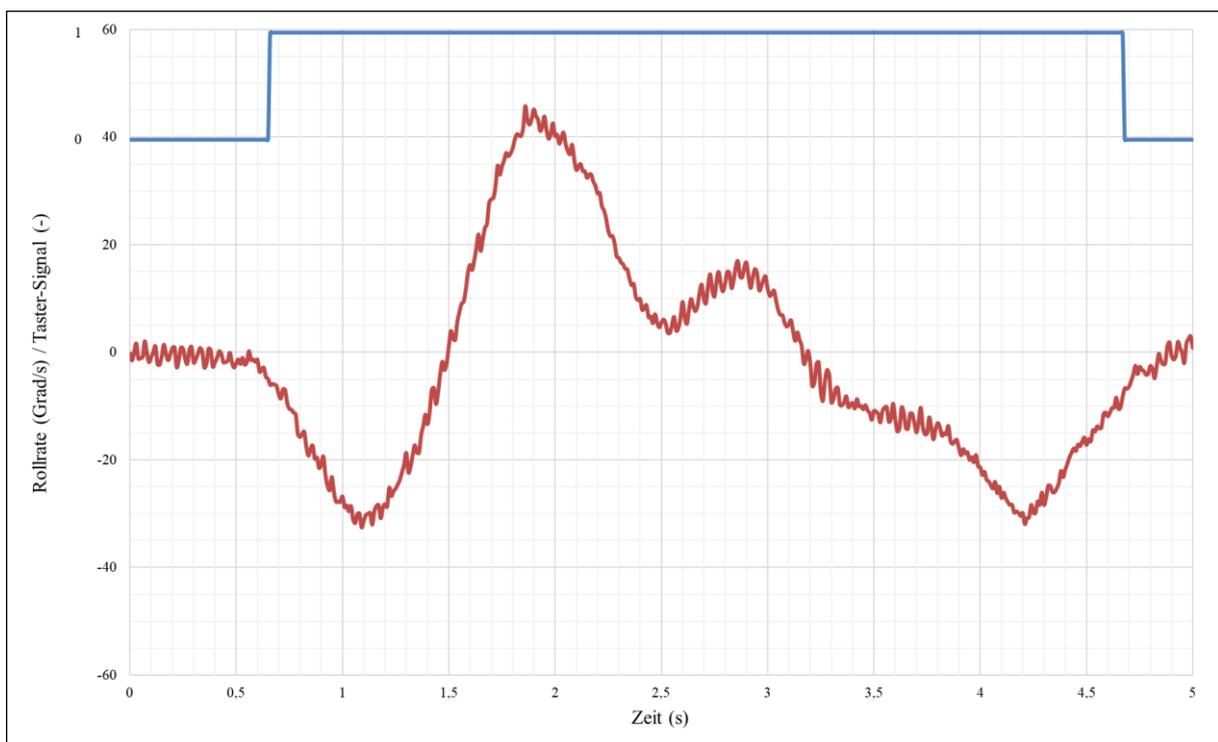


Abbildung 15: Beispieldiagramm für die Auswertung der Reaktionszeit

6.3. Die Auswertung der Reaktionszeitdaten

Die Auswertung der Reaktionszeitdaten wird mit Hilfe von zwei verschiedenen Ansätzen umgesetzt.

- Ansatz 1: die Auswertung der Zeitdifferenz von dem Zeitpunkt des Aufforderungssignals aus der Videoaufzeichnung bis zum Auslösen eines der Taster.
- Ansatz 2: die visuelle Auswertung des Anstiegs der Rollrate aus den zuvor erstellten Diagrammen mit Rollrate und Taster-Signal. Dadurch kann die Fähigkeit der selbstgebauten Schaltung überprüft und eventuell auftretende fehlerhafte Auslösungen detektiert werden.

6.3.1. Die Auswertung der Reaktion durch die Taster

Für die Auswertung der elektronischen Reaktionszeitmessung wird die Differenz zwischen dem per Video ausgewerteten Zeitpunkt des Aufforderungssignals und dem Zeitpunkt der Sprungantwort des Taster-Signals vom Lenker herangezogen. Die Berechnung der Differenz wurde in MS-Excel durchgeführt. Als Beispiel wird dafür folgend ein Ausschnitt der Ergebnistabelle angeführt, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Ergebnisse der Reaktionszeitauswertung (Ausschnitt)

Versuchsfahrt 0809_HE_1					
Versuchsbezeichnung	Zeitpunkt Signal	Zeitpunkt Taster	Reaktionszeit Taster	Zeitpunkt Rollrate	Reaktionszeit Rollrate
0809_HE_1_01	08:06:41,200	08:06:41,830	0,63	08:06:41,700	0,50
0809_HE_1_02	08:06:58,200	08:06:59,560	1,36	08:06:59,500	1,30
0809_HE_1_03	08:07:14,200	08:07:14,970	0,77	08:07:15,100	0,90
0809_HE_1_04	08:09:18,600	08:09:19,470	0,87	08:09:19,200	0,60
0809_HE_1_05	08:09:52,900	08:09:53,410	0,51	08:09:53,400	0,50

Die Genauigkeit der Ergebnisse liegt aufgrund der visuellen Auswertung des Bildmaterials bei $\pm 0,03$ Sekunden.

6.3.2. Die Auswertung der Reaktion durch die Rollrate

Für die Auswertung der Reaktionszeit aus den fahrdynamischen Messwerten der Rollrate, wird der Beginn konstanter Steigung herangezogen. Als Zeitpunkt wird die nächstfolgende ganze Zehntelsekunde (0,10, 0,20 usw.) definiert. Aus dieser Methodik ergibt sich, dass die reale Reaktionszeit kürzer oder gleich der ausgewerteten ist. Zur genaueren Erläuterung werden nachfolgend einige Diagramme dargestellt, in welchen die Beurteilung des Zeitpunktes erklärt wird.

In Abbildung 16 sind die Rollrate und das Taster-Signal der ersten aufgezeichneten Messfahrt dargestellt. Die Rollrate wurde in rot, das Taster-Signal in blau eingefärbt. Das Aufforderungssignal findet zum Zeitpunkt Null statt. Neben der grünen Hilfsgeraden ist der konstante Anstieg der Rollrate zu erkennen. Der Anstieg (in die negative Richtung) beginnt zwischen 0,4 und 0,5 Sekunden nach der Reaktionsaufforderung. Der rote Pfeil zeigt die für dieses Manöver bestimmte Reaktionszeit an. Das Taster-Signal springt bei diesem Versuch bei 0,6 s von Null auf Eins.

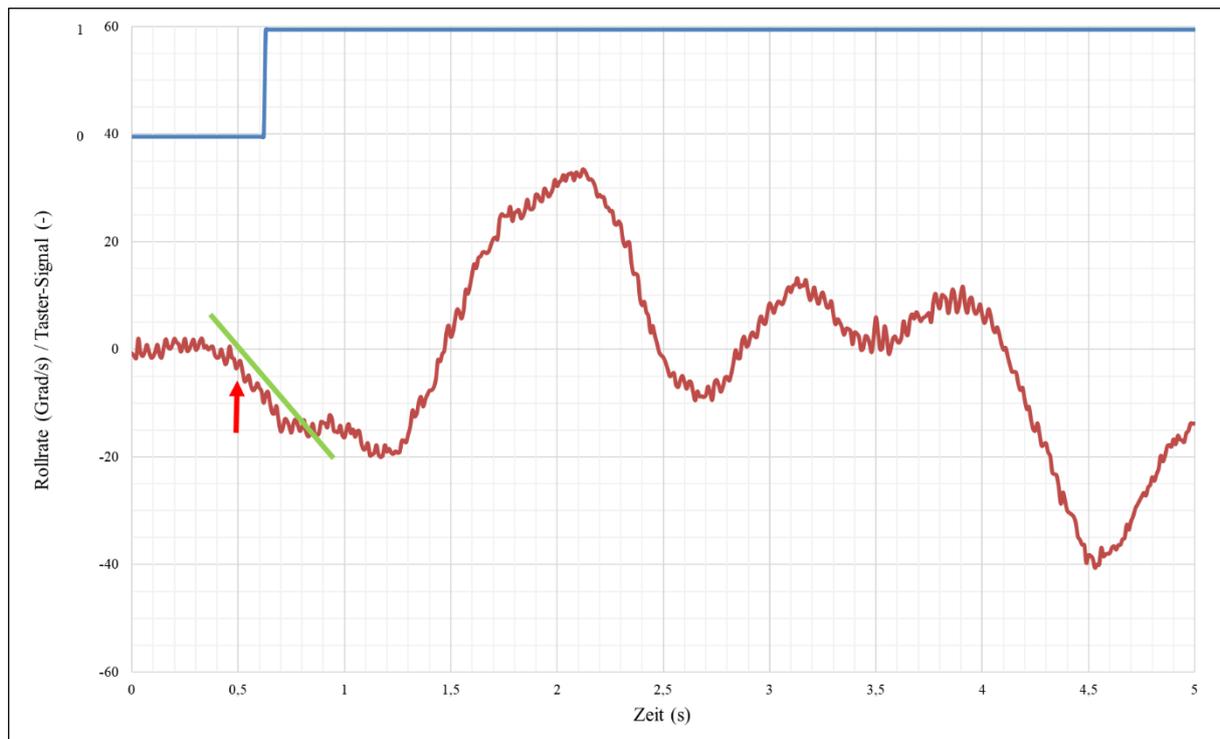


Abbildung 16: Erklärung der visuellen Auswertung der Reaktionszeit

In den folgenden Abbildungen sind Versuche dargestellt, bei denen es zu Auffälligkeiten in den Datensätzen gekommen ist. In Abbildung 17 ist im Anstieg der Rollrate ein Knick zu erkennen. Dieser macht eine weitere Überprüfung des Videomaterials erforderlich, um den Beginn des Manövers eindeutig bestimmen zu können. Die Durchsicht des Bildmaterials ergab, dass das Manöver bereits mit Beginn des flacheren Anstiegs gestartet wurde. Daher liegt die Reaktionszeit graphisch ausgewertet hier bei 0,5 s.

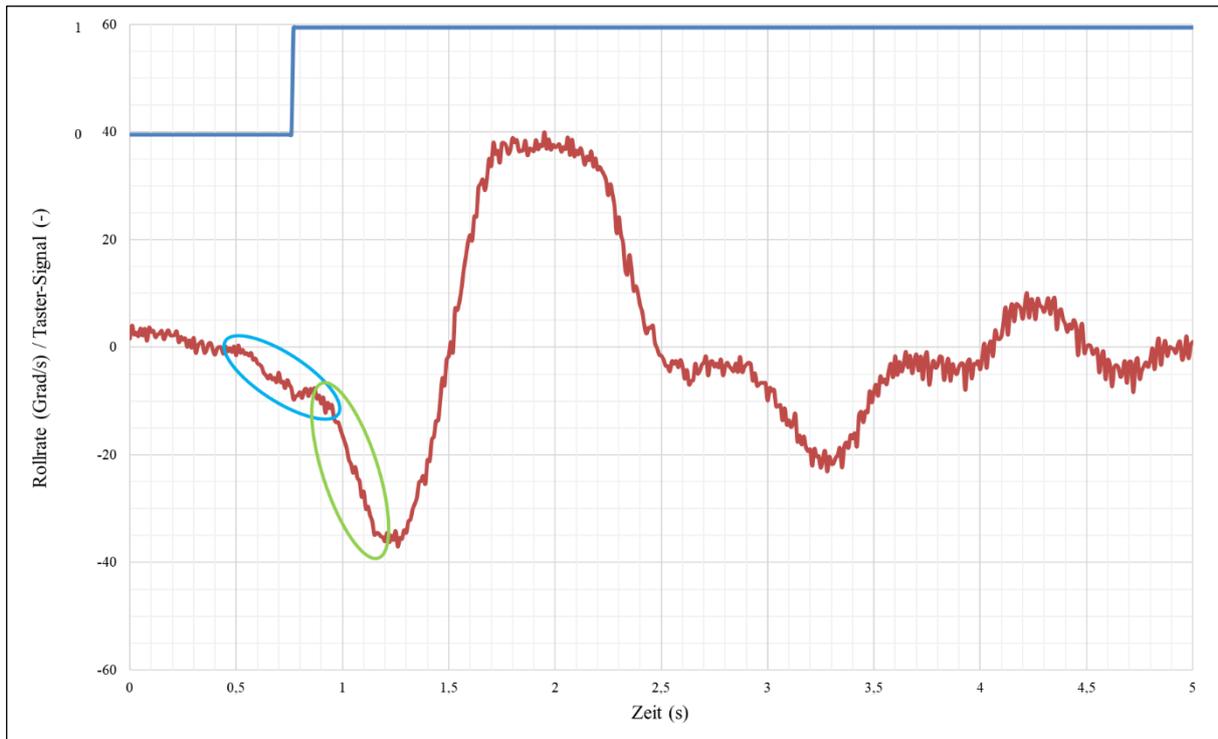


Abbildung 17: Beispielbild der Reaktionszeitauswertung mit zwei Anstiegen im Rollratenverlauf

Bei den bisherigen Abbildungen wurde der Taster während des Manövers nicht wieder gelöst. In Abbildung 18 (links) erkennt man am Verlauf der blauen Kurve, dass der Griff soweit gelockert wurde, dass das Signal wieder auf Null zurückgestellt wurde. Auf die Messung hat dies keinen Einfluss. Die rechte Seite der Abbildung zeigt einen Verlauf des Taster-Signals ohne Sprung auf den Wert Eins. Bei diesem Versuch wurde der Taster nicht ausgelöst. Daher gibt es keinen Messwert der Reaktionszeit für diese Messung.

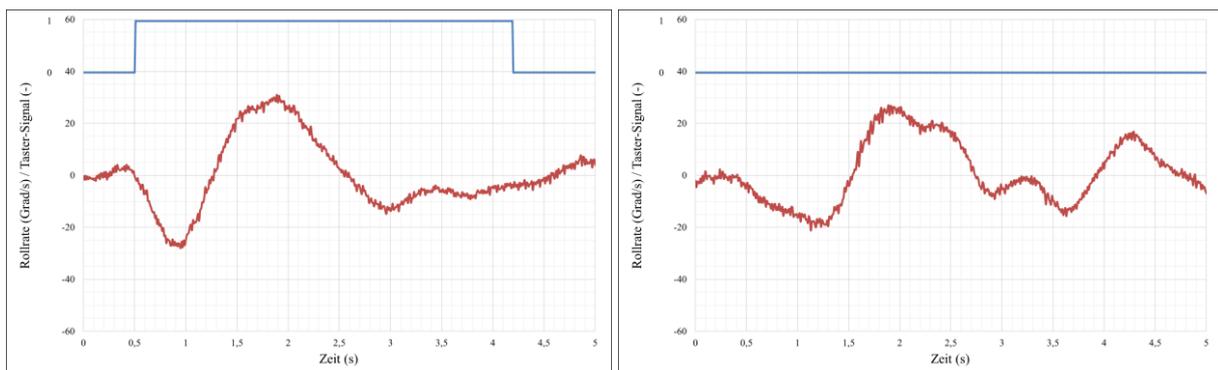


Abbildung 18: Beispielbilder mit besonderen Vorkommnissen im Trigger-Signal

In Abbildung 19 (links) ist im Verlauf des Trigger-Signals ein Bereich zu erkennen, in dem viele Sprünge in kurzer Zeit aufgezeichnet wurden. Dieses „Springen“ ist auch als „Tastenprellen“ bekannt. Dabei schließen die Kontaktflächen des Schalters nicht sauber und lösen mehrmals in kurzer Zeit aus. Auf die Auswertung hat diese Fehlfunktion hier jedoch keinen Einfluss, da die initiale Betätigung ohne Prellen erfolgt ist. Eine weitere Auffälligkeit in den Reaktionszeitdaten konnte festgestellt werden, welche ebenfalls in Abbildung 19 gezeigt wird. Rechts ist zu sehen, dass das Trigger-Signal während des gesamten dargestellten Zeitraums

auf dem Wert Eins liegt. Das bedeutet, dass der Fahrer bereits vor der Aufforderung zum Fahrstreifenwechsel den Schalter ausgelöst hat und damit, wie schon zuvor, keine Aussage über den Zeitpunkt der Reaktion liefert. Auch hier kann nur die graphische Auswertung des Verlaufs der Rollrate verwendet werden.

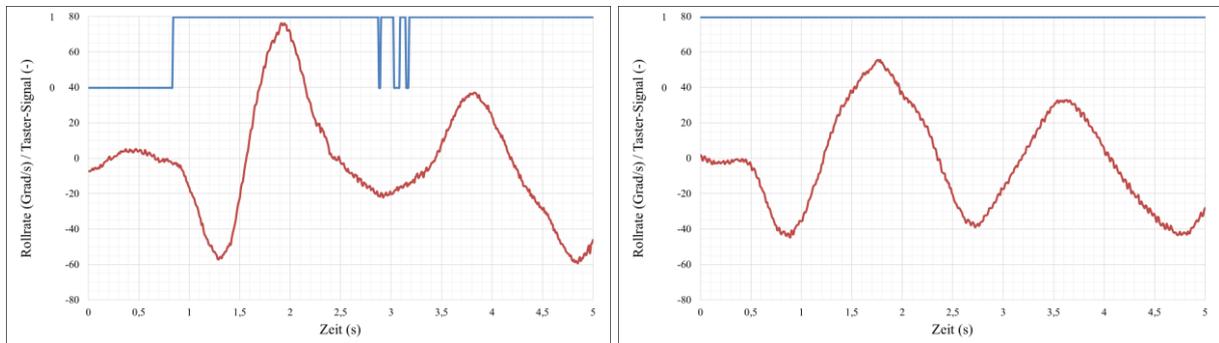


Abbildung 19: Weitere Beispielbilder mit besonderen Vorkommnissen im Trigger-Signal

Die Ergebnisse der fünf Messfahrten sind in Kapitel 7.2 angeführt.

6.4. Die Aufbereitung der Daten der Fahrstreifenwechsel

Für die Auswertung der Spurwechselfersuche werden, ähnlich wie in Kapitel 6.1, die Zeitintervalle der einzelnen Fahrstreifenwechsel aus dem Videomaterial (siehe Abbildung 20) notiert. In Tabelle 5 ist ein Ausschnitt der Mitschrift angeführt.



Abbildung 20: Kameraaufzeichnung eines Fahrstreifenwechsels

Tabelle 5: Ausschnitt der Videomitschrift der Versuchsfahrten auf der Schnellstraße S5

Richtung	Uhrzeit von (ungefähr)	Uhrzeit bis (ungefähr)	Startzeile (ungefähr)	Breite	Geschwindigkeit
links	17:18:11	17:18:16	20445	3,5 m	75 km/h
rechts	17:18:20	17:18:23	21445	3,5 m	75 km/h
rechts	17:19:10	17:19:13	26445	1,75 m	93 km/h
links	17:19:13	17:19:16	26745	1,75 m	93 km/h
rechts	17:20:11	17:20:14	32545	1,75 m	93 km/h

Anschließend wird für jeden Fahrstreifenwechsel ein eigener Datensatz generiert, welcher auf eine einheitliche Größe von 501 Werten pro Parameter, das entspricht fünf Sekunden, gekürzt wird. Aus den einzelnen Datensätzen werden für die folgenden Parameter die Extremwerte des Manövers bestimmt:

- Rollwinkel
- Rollrate
- Lenkwinkel
- Querbearschleunigung
- Gierrate

Außerdem werden die mittlere Geschwindigkeit und eine theoretische Manöverdauer berechnet. Die genaue Vorgehensweise für die Berechnung der Dauer des Fahrstreifenwechsels wird in Kapitel 6.5.4 erläutert. Die Verläufe der zuvor genannten Parameter, sowie zusätzlich von Nickrate, Längs- und Vertikalbeschleunigung werden außerdem in Diagrammen illustriert, um die Daten besser vergleichen zu können. Der Seitenversatz aufgetragen über die Zeit, im Zuge eines Manövers, wird in Kapitel 6.5.6 beispielhaft visualisiert. Er wird jedoch im Zuge dieser Diplomarbeit nur auf seine Verwendbarkeit untersucht, um gegebenenfalls in folgenden Arbeiten berücksichtigt werden zu können. Zusätzlich werden die Abhängigkeiten der verschiedenen Parameter in Streudiagrammen, sowie die Häufigkeitsverteilungen in Histogrammen dargestellt. Diese Diagramme sind in Kapitel 7 angeführt.

6.5. Die Auswertung der Daten der Fahrstreifenwechsel

Dieses Kapitel zeigt die aufbereiteten Daten beispielhaft in einem Diagramm mit typischem Verlauf. Es wird entschieden, ob eine Filterung der Daten notwendig ist und wie diese genau aussieht. Allgemein auftretende Extremwerte werden identifiziert und falls mehrere existieren wird jener ermittelt, welcher davon für die Erstellung der Ergebnisse weiterverwendet werden soll.

6.5.1. Die Auswertung der Rollwinkelmessdaten

Der typische Verlauf des Rollwinkels ist in Abbildung 21 beispielhaft für einen Fahrstreifenwechsel nach rechts dargestellt. Zu Beginn steigt der Rollwinkel, wie in 5.1 beschrieben, stark an bis eine maximale Schräglage nach rechts (Maximum) erreicht ist. Anschließend sinkt er bis auf ein Minimum ab. Dieses Minimum ist die maximale Schräglage nach links. Ab diesem Zeitpunkt wird der Rollwinkel auf Null reduziert. Der Verlauf eines Fahrstreifenwechsels nach links ist lediglich um die x-Achse gespiegelt. Im letzten Abschnitt kann es vermehrt zu einem schwingungsähnlichen Verlauf kommen, siehe Abbildung 22. Dieses Phänomen wurde bereits in [5] erkannt. Wie in Kapitel 2 erwähnt, hatten die dort festgestellten Schwingungen eine Frequenz von etwa 3 Hz. Die aufgetretenen Schwingungen in den Spurwechselversuchen dieser Arbeit lagen mit einer Frequenz von ca. 2,5 Hz sehr nahe an den damaligen Messungen. Der Ursprung dieser Schwingungen wurde in dieser Arbeit nicht näher untersucht, es kann jedoch als eine Art von Einpendeln in die neue Fahrlinie vermutet werden. Selbst für geübte Fahrer ist ein zentimetergenaues Treffen der neuen Fahrlinie mit dem ersten Einlenken eine schwierige Aufgabe.

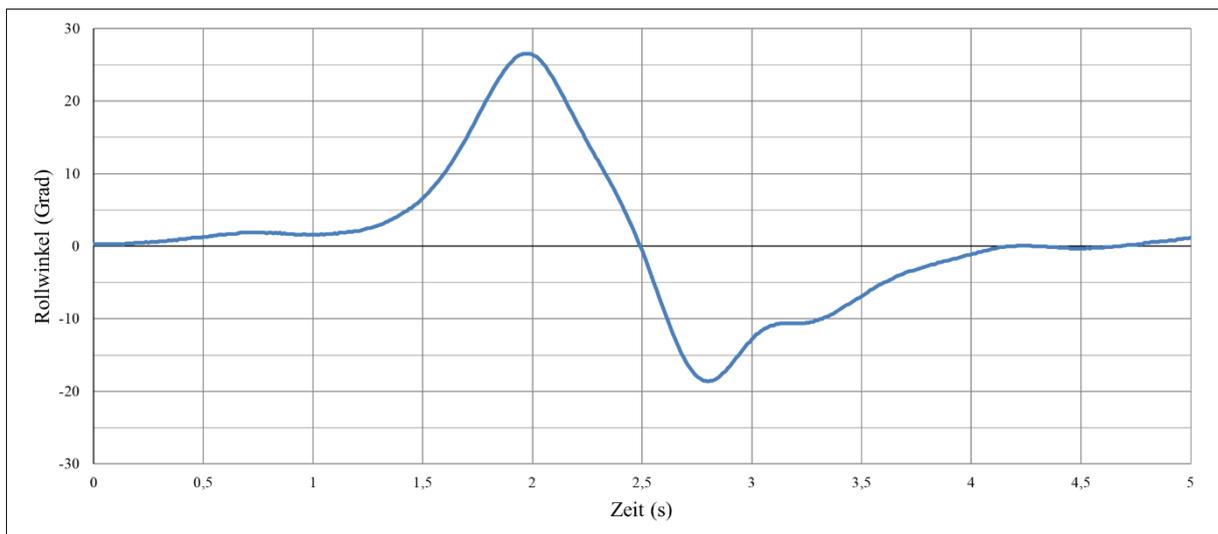


Abbildung 21: Typischer Verlauf des Rollwinkels

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kurve in Abbildung 21 keine störenden Oberschwingungen enthält, welche eine Filterung des Signals notwendig machen würden. Es gibt zwei Extremwerte, welche den Rollwinkel während des Manövers charakterisieren. Dabei handelt es sich jeweils um ein Maximum sowie ein Minimum.

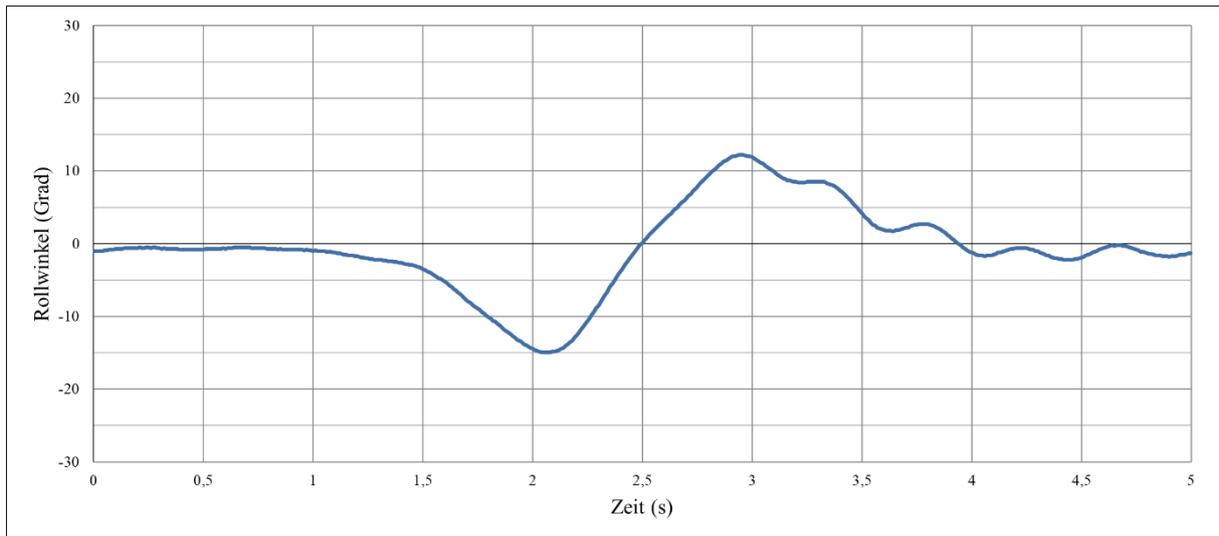


Abbildung 22: Beispielhafter Verlauf des Rollwinkels mit einer Schwingung

6.5.2. Die Auswertung der Rollratenmessdaten

In Abbildung 23 ist ein beispielhafter Verlauf der Rollrate bei einem Fahrstreifenwechsel nach links zu sehen. Die rote Kurve zeigt die Daten eines Versuchs bei etwa 50 km/h. Beim Einleiten des Fahrstreifenwechsels steigt die Rollrate stark an und erreicht ein negatives Maximum, bei einem Fahrstreifenwechsel nach links. Anschließend nimmt die Rollrate ab und wechselt das Vorzeichen. Dabei erreicht sie ein globales Maximum (positiv beim Spurwechsel nach links) und nimmt daraufhin ab und wechselt nochmals das Vorzeichen. Zum Ende hin erreicht die Rollrate erneut ein lokales Maximum (negativ beim Spurwechsel nach links) mit einem Wert ähnlich dem ersten Maximum und fällt abschließend auf Null ab. Damit ist ein Fahrstreifenwechsel eigentlich abgeschlossen. In der Abbildung ist ab etwa 3,75 s erneut ein Anstieg der Rollrate zu erkennen. Dieser gehört jedoch schon zum nächsten Fahrstreifenwechsel.

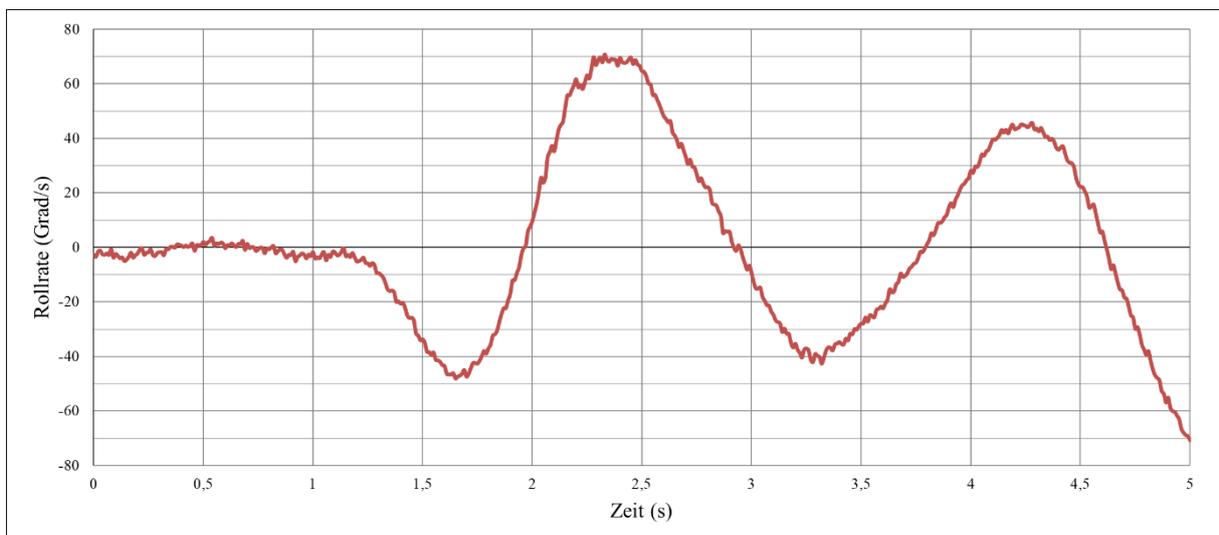


Abbildung 23: Typischer Verlauf der Rollrate

Bei der Rollrate gibt es somit drei charakteristische Extremwerte. Bei dem gezeigten Spurwechsel nach links sind das in chronologischer Reihenfolge ein Minimum (bei etwa 1,7 s), ein Maximum (bei etwa 2,5 s) und zuletzt erneut ein Minimum (bei etwa 3,3 s). Beim Spurwechsel nach rechts ist der Verlauf der Rollrate um die x-Achse gespiegelt und die Extremwerte jeweils gegengleich.

Abbildung 23 zeigt keine störenden Oberschwingungen im Verlauf der Rollrate, daher werden die Messdaten bis 70 km/h nicht gefiltert. Bei höheren Geschwindigkeiten tritt allerdings ein Rauschen auf, siehe Abbildung 24. Obwohl der Verlauf noch gut ersichtlich ist, werden die Daten für Versuche mit einer Geschwindigkeit größer 70 km/h gefiltert. Dadurch werden die hochfrequenten Schwingungen aus den Daten entfernt. Die blaue Kurve stellt dabei die gefilterten Daten dar. Das für die Filterung verwendete Verfahren ist der zentrierte gleitende Durchschnitt. Dabei wird der gefilterte Wert als Mittelwert aus dem ungefilterten Wert zum selben Zeitpunkt und den drei vorhergehenden sowie den drei nachfolgenden ungefilterten Werten gebildet. Mathematisch bedeutet das allgemein:

$$x_g(t) = \frac{\sum_{i=t-3}^{t+3} x(i)}{7}$$

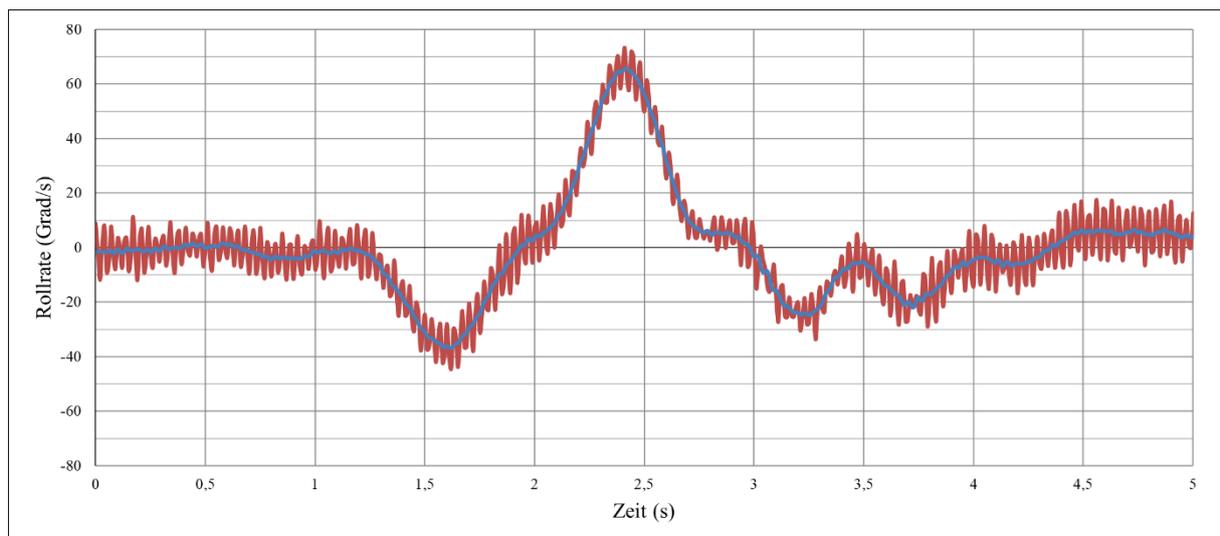


Abbildung 24: Typischer Verlauf der Rollrate bei $v=100\text{km/h}$

6.5.3. Die Berechnung des Parameters „Intensität“

Dass der Verlauf eines Fahrstreifenwechsels von der Fahrgeschwindigkeit und der notwendigen Versatzbreite abhängt ist offensichtlich. Dieses Manöver kann auch schneller oder gemächlicher ausgeführt werden, der dafür relevante Faktor ist der Fahrereinfluss. Um diesen Einfluss des Fahrers quantifizieren zu können wird folgend der Parameter „Intensität“ definiert und erforscht. Die Intensität soll den individuellen Wunsch des Fahrers, dieses Manöver innerhalb einer bestimmten Distanz vollständig zu absolvieren widerspiegeln.

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie dieser Parameter mathematisch definiert werden kann. Der Einfachheit halber, soll die Intensität im Bereich zwischen 0 und 10 definiert werden. Das vom Fahrer ausgeübte Lenkmoment wäre wahrscheinlich der beste Parameter um den Einfluss des Fahrers zu beschreiben. Da jedoch kein Sensor zur Messung dieses Parameters vorhanden war, wird nun untersucht ob es möglich ist, einen anderen fahrdynamischen Parameter zu finden, welcher nicht, bzw. möglichst wenig, von den anderen beiden Eingangsparametern (Geschwindigkeit und Versatzbreite) abhängt und dabei möglichst empfindlich auf den Fahrerwunsch reagiert, um von diesem die Intensität ableiten zu können. Der maximal aufgetretene Rollwinkel hat sich dabei als vielversprechend gezeigt. In Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die Abhängigkeiten des Rollwinkels aller Versuche über den Eingangsparameter Versatzbreite sowie Fahrgeschwindigkeit dargestellt. Man erkennt, dass bei beiden Spurversatzbreiten annähernd dieselben Grenzwerte erreicht werden. Die Abhängigkeit des Rollwinkels von der Versatzbreite ist damit, zumindest in den für diese Arbeit durchgeführten Versuchen, als sehr gering einzustufen. Ebenso ist ersichtlich, dass zumindest bis 80 km/h der gleiche Rollwinkelbereich genutzt wird. Darüber hinaus erreicht Fahrer HE zwischen 50 km/h und 100 km/h ebenfalls die gleichen Werte. Über 100 km/h wurden keine Manöver über eine ganze Fahrstreifenbreite durchgeführt. Daher wird auch der Einfluss der Geschwindigkeit auf den Rollwinkel, im untersuchten Bereich, als gering eingeschätzt.

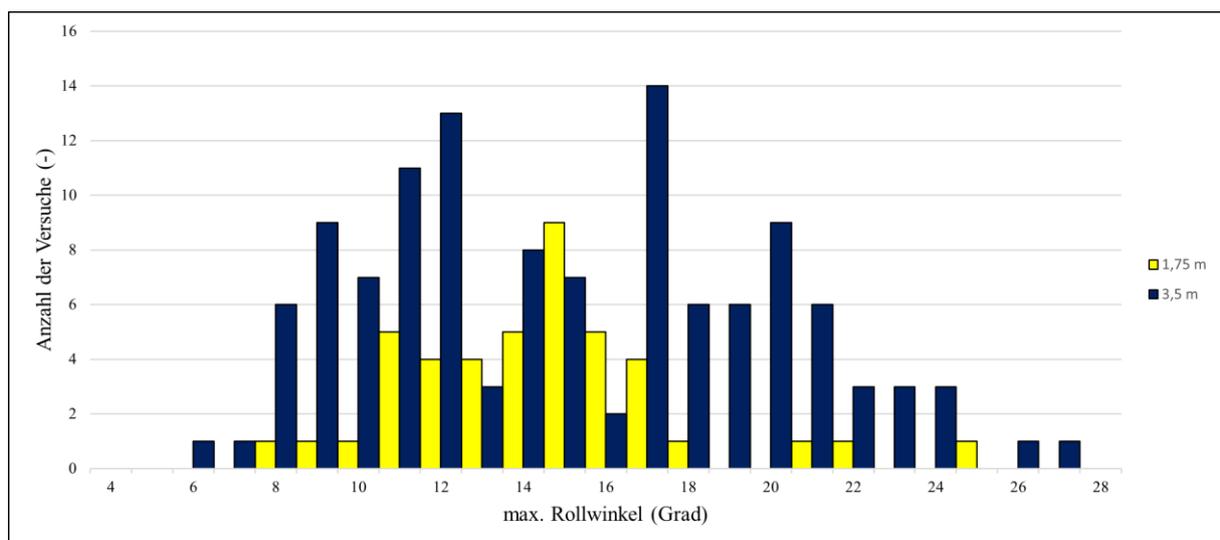


Abbildung 25: Abhängigkeit des Rollwinkels über die Breite

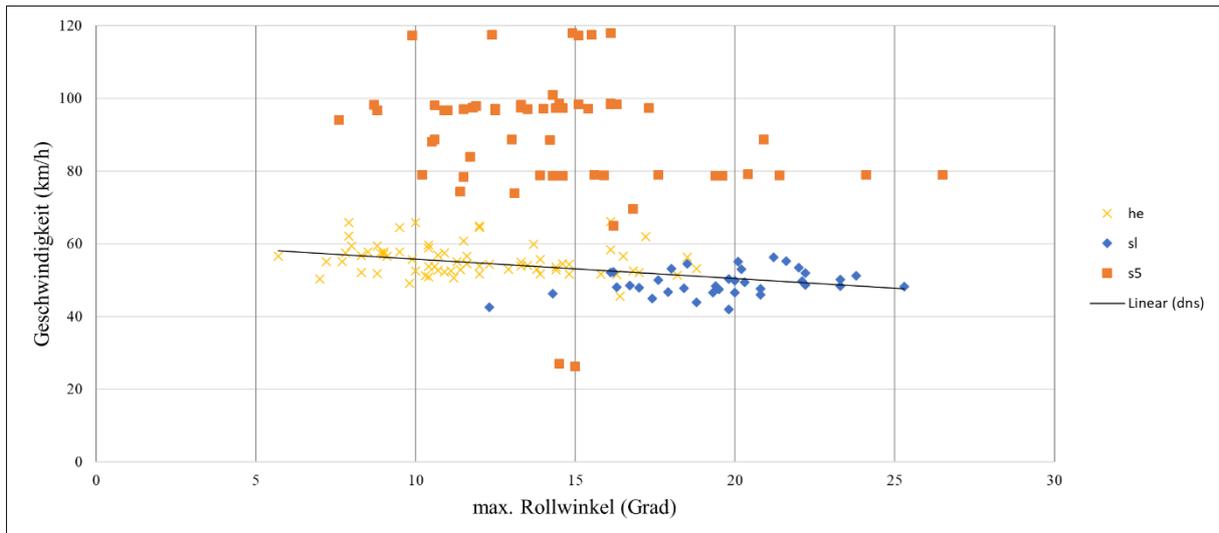


Abbildung 26: Abhängigkeit des Rollwinkels über die Geschwindigkeit

Die aufgetretenen maximalen Rollwinkel erstrecken sich von 5 Grad bis 26,5 Grad. Es wird davon ausgegangen, dass die durchgeführten Spurwechselmanöver auf der Skala noch nicht an die Obergrenze reichen. Daher wird ein funktionaler Zusammenhang gesucht, welcher den gewünschten Skalenbereich mit den gemessenen Rollwinkelwerten hinreichend verknüpft. Der Mittelwert der Skala wird aufgrund der gemessenen maximalen Rollwinkel auf den Wert 13 Grad definiert. In Abbildung 27 sind drei Beziehungen zwischen Intensität und Rollwinkel dargestellt. Die durchgezogenen Linien zeigen die Funktionsgraphen, die Punkte stellen die Messpunkte der Versuche auf den Funktionen dar. Alle Beziehungen sind dadurch definiert, dass sie bei Null beginnen und bei 13 Grad eine Intensität von 5 ergeben. Die violette Linie zeigt die Funktion

$$I := \frac{5}{13^2} \phi_{max}^2$$

Sie löst die untere Hälfte der Skala tendenziell besser auf, da eine Intensität von 1 schon mehr als 5 Grad Rollwinkel voraussetzt. Allerdings führt diese Formel dazu, dass die Intensität hier bereits bei unter 20 Grad Rollwinkel über die gewünschte Obergrenze hinausreicht. Die rote Linie stellt die Formel

$$I := \frac{5}{13} \phi_{max}$$

dar. Da sie im Nullpunkt beginnt, überschreitet sie ebenfalls bereits für eine Messfahrt die Obergrenze, welche bei dieser Beziehung bei 26 Grad liegt. Die türkise Linie beschreibt die Formel:

$$I := \frac{5}{\sqrt{13}} \sqrt{\phi_{max}}$$

Bei einem Rollwinkel von 5 Grad ergibt sie bereits eine Intensität von etwa 3. Damit ist der Bereich niedriger Intensität bei den durchgeführten Messfahrten in nur 2 Intensitätseinheiten

abgedeckt. Vorteil dieser Beziehung ist jedoch, dass speziell der Bereich höherer Intensität feiner aufgelöst wird und bei den Messfahrten nicht die Obergrenze erreicht wurde.

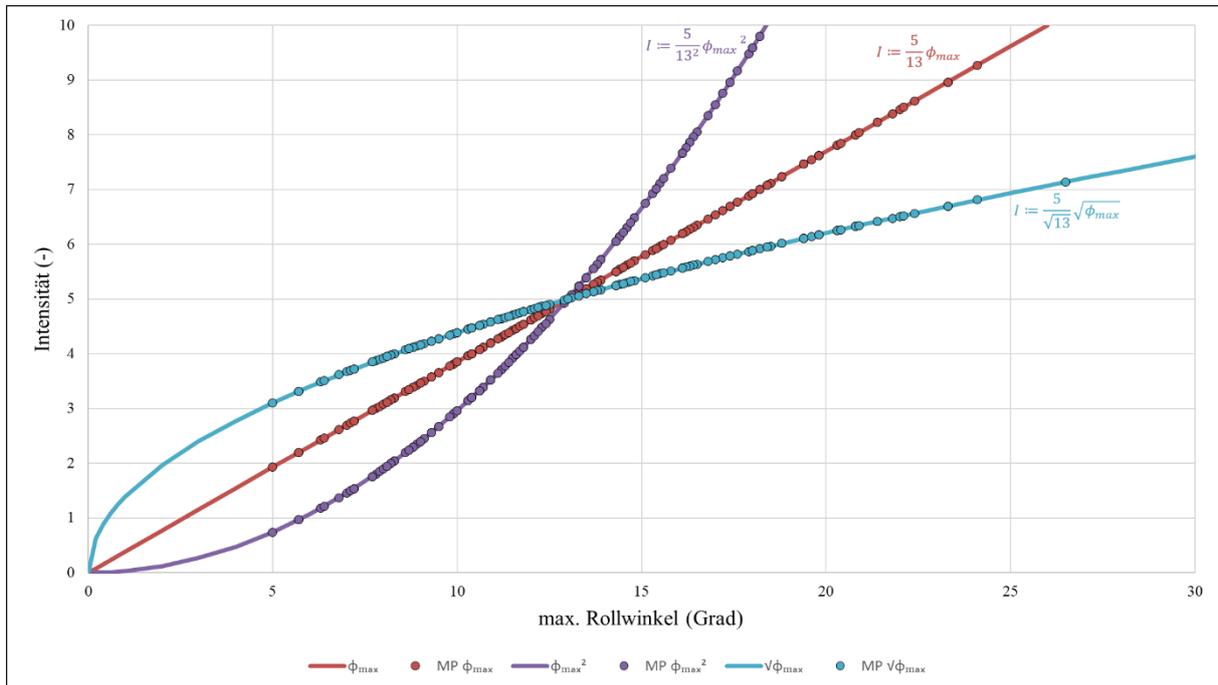


Abbildung 27: Funktionskurven und Messpunkte der Intensität

Für diese Arbeit wird daher die Intensität I wie folgt definiert:

$$I := \frac{5}{\sqrt{13}} \sqrt{\phi_{max}}$$

Bei dieser Formel handelt es sich um einen rein heuristischen Ansatz, welcher aufgrund der vorliegenden Daten entstanden ist. Auch Ansätze mit weiteren Parametern sind für eine genauere Beschreibung der Intensität denkbar. Sollte in folgenden Untersuchungen das Lenkmoment in den Ansatz mit einfließen, ist es nötig, auch die Fahrgeschwindigkeit zu inkludieren, da die Kreiselmomente der Räder geschwindigkeitsabhängig das Lenkmoment beeinflussen.

In den folgenden Abbildungen werden Verläufe von Rollwinkel und Rollrate bei unterschiedlicher Intensität dargestellt. Abbildung 28 zeigt einen Fahrstreifenwechsel nach rechts mit einer relativ hohen Intensität von 7,1. Der maximal erreichte Rollwinkel beträgt $26,5^\circ$ während die maximal auftretende Rollrate einen Wert von 76 %/s aufweist. Abbildung 29 zeigt einen Fahrstreifenwechsel nach links mit einer relativ niedrigen Intensität von 4,4. Der maximal auftretende Rollwinkel ist $< 10^\circ$ bei einer maximalen Rollrate von $< 30\text{ %/s}$. Trotz des großen Unterschieds in der Intensität liegt die Manöverdauer bei beiden Fahrstreifenwechseln bei ca. 3 s. Außerdem sind die Verläufe beider Manöver ähnlich und weisen die typischen Kennzeichen eines Fahrstreifenwechsels auf.

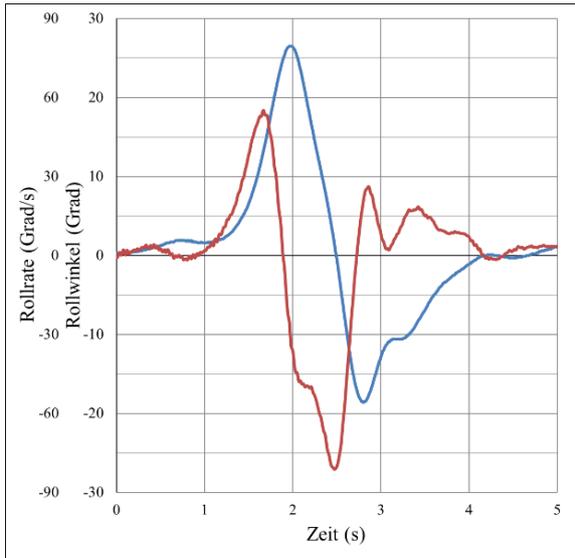


Abbildung 28: Verlauf von Rollwinkel (blau) und Rollrate (rot) eines Fahrstreifenwechsels nach rechts mit hoher Intensität ($I=7,1$) bei 79 km/h

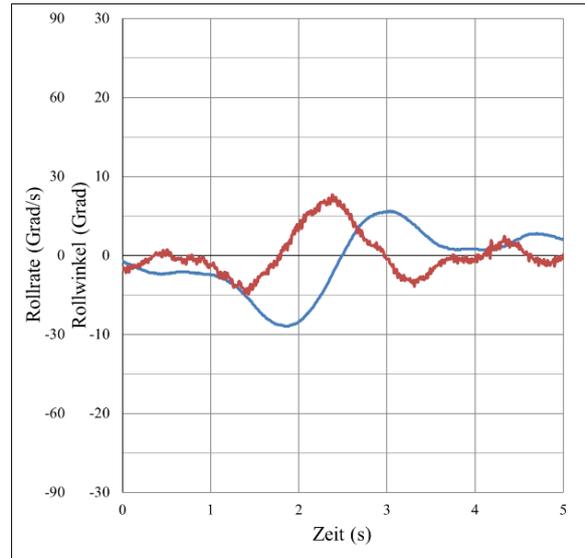


Abbildung 29: Verlauf von Rollwinkel (blau) und Rollrate (rot) eines Fahrstreifenwechsels nach links mit geringer Intensität ($I=4,4$) bei 58 km/h

6.5.4. Die Berechnung der „theoretischen Spurwechseldauer“

Die Zeitdauer eines Fahrstreifenwechsels wird nach folgendem Verfahren bestimmt, da die genaue Spurwechseldauer schwierig eingegrenzt werden kann. Abbildung 30 zeigt einen typischen Verlauf eines realen Fahrstreifenwechsels. Der Beginn des Manövers ist mit dem Anstieg der Rollrate gut definierbar, wie in Kapitel 6.3.2 erklärt. Jedoch ist das Ende des gezeigten Fahrstreifenwechsels schwierig zu definieren, da z.B. der Rollwinkel nach dem Maximum bei 2,9 s nicht bis Null abnimmt, sondern erneut zunimmt und erst nach über fünf Sekunden wieder Null erreicht.

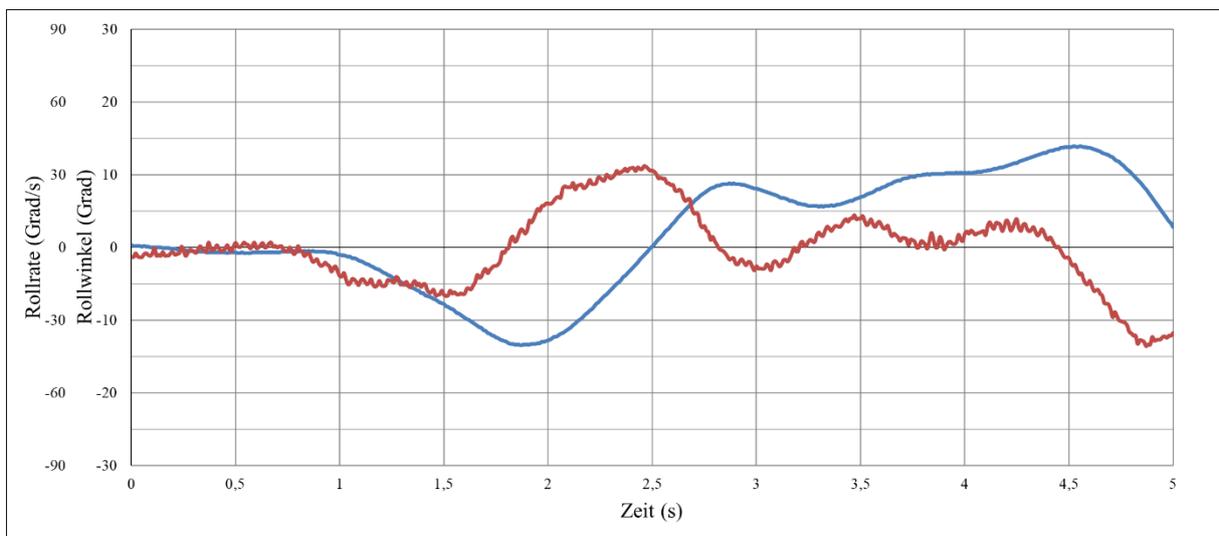


Abbildung 30: Typischer Verlauf von Rollwinkel und Rollrate beim Fahrstreifenwechsel nach links

Daher wird in dieser Arbeit eine theoretische/ideale Manöverdauer definiert. Die theoretische Spurwechseldauer wird definiert als die doppelte Zeitspanne von dem Anstieg der Rollrate bis zum Nulldurchgang des Rollwinkels zur Halbzeit des Manövers. Zum besseren Verständnis ist dies in Abbildung 31 illustriert. Die nach diesem Vorgehen berechnete Manöverdauer gibt damit die minimale Zeitspanne von Beginn bis Ende eine Fahrstreifenwechsels an.

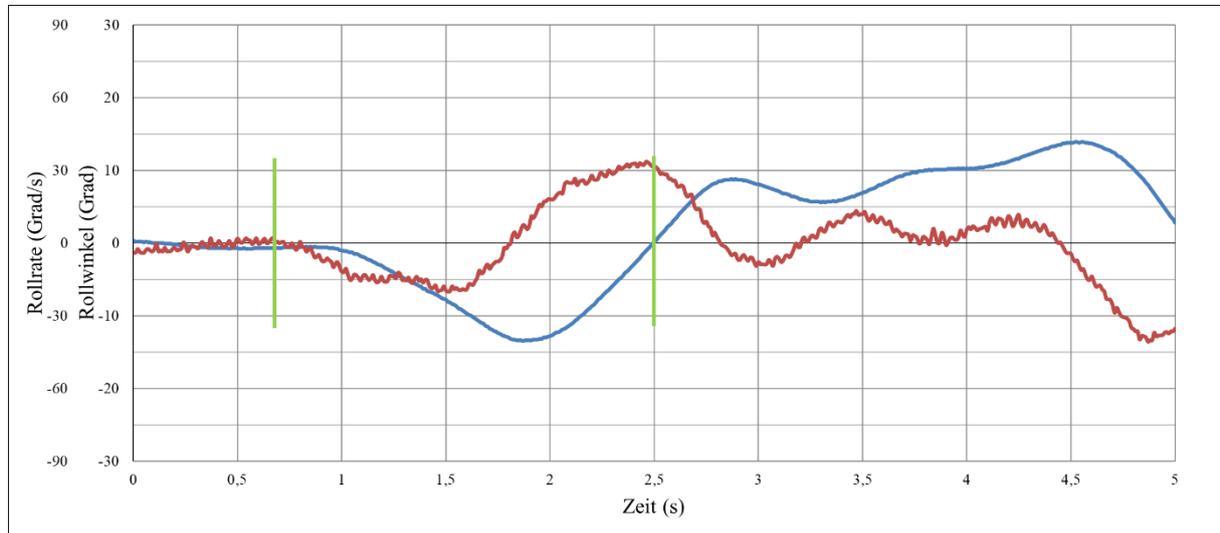


Abbildung 31: Visualisierung der Definition der halben Manöverdauer

6.5.5. Die Auswertung der Geschwindigkeitsmessung

Für das in den Ergebnissen verwendete Tempo während des Fahrstreifenwechsels wird die von den Sensoren aufgezeichnete Geschwindigkeit über eine Dauer von einer Sekunde, $\pm 0,5$ s vom Nulldurchgang des Rollwinkels, gemittelt.

6.5.6. Die Auswertung der Versatzbreite

Die Auswertung der Versatzbreite wird mittels der aufgezeichneten Videodaten durchgeführt. Dabei wird lediglich zwischen halben und ganzen Fahrstreifenbreiten Versatz unterschieden. Der Vollständigkeit halber wird im Zuge der Datenauswertung auch die Genauigkeit der GPS-Aufzeichnung überprüft, um herauszufinden, ob über die GPS-Position eine präzise Ermittlung der Versatzbreite möglich wäre. Die Auswertung wird nur für die Fahrstreifenwechsel auf der Doktor-Nekowitsch-Straße durchgeführt. Für die vorliegende Arbeit werden die Ergebnisse dieser Auswertung nicht verwendet, weil die Unterschiede der realen Versatzbreite aller Versuche bei einer vorgegebenen Distanz von 1,75 m oder 3,5 m ohnehin gering sind.

Für die Auswertung der Versatzbreite über das GPS-Signal müssen die aufgezeichneten Längen- und Breitenkoordinaten in ein kartesisches Koordinatensystem mit der zurückgelegten Strecke in x- und dem seitlichen Versatz in y-Richtung umgewandelt werden. Abbildung 32 zeigt die gemessenen GPS-Koordinaten eines Versuchs in einem kartesischen Koordinatensystem.

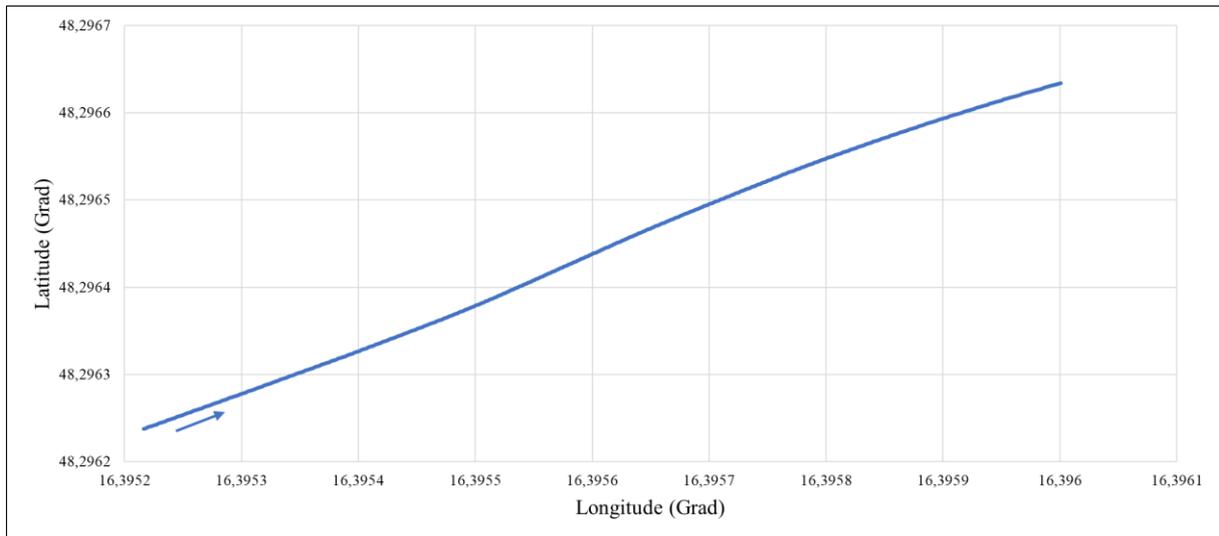


Abbildung 32: GPS-Position eines Versuchs

Der erste Schritt ist nun, das Koordinatensystem um den noch zu bestimmenden Winkel zu drehen, um die zurückgelegte Strecke parallel zu der horizontalen Abszisse zu positionieren. Dazu werden die Koordinaten zweier Fixpunkte auf der Doktor-Nekowitsch-Straße gewählt. Der erste Punkt liegt am Anfang der gefahrenen Strecke mit den Koordinaten (48.2962377, 16.3952166). Der zweite Punkt liegt am Ende der abgefahrenen Strecke mit den Koordinaten (48.2999875, 16.4029409). Der Winkel zur horizontalen Achse ergibt sich, in kartesischen Koordinaten, zu rund $25,89^\circ$. Die gedrehten Fahrlinien sind in Abbildung 33 dargestellt.

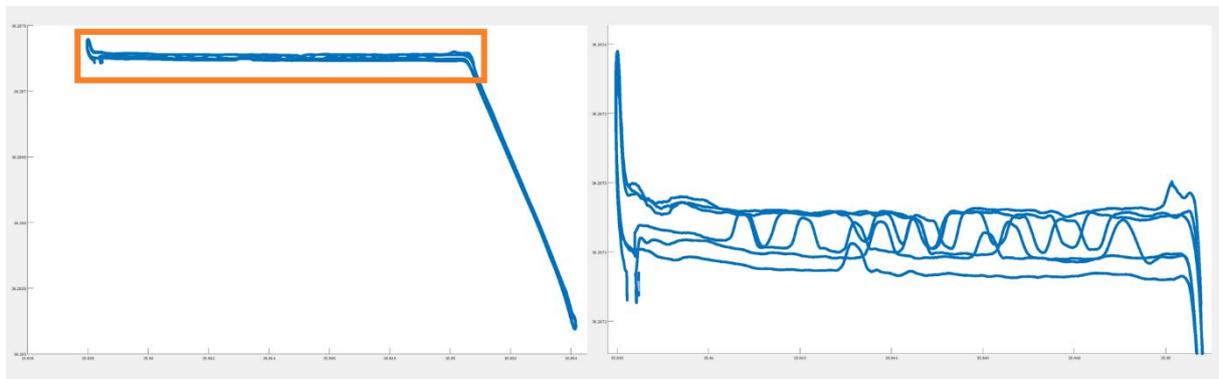


Abbildung 33: Gedrehte Fahrlinien einer Versuchsfahrt (links); Ausschnitt vergrößert (rechts)

Der letzte Schritt ist es nun, die Versatzbreite möglichst genau zu ermitteln. Da ein Längengrad nicht der gleichen Distanz entspricht wie ein Breitengrad, muss diese Strecke ermittelt werden. Hierzu wird der Verlauf der gedrehten GPS-Positionen in Matlab dargestellt und ein repräsentativer Fahrstreifenwechsel in den Videoaufzeichnungen gesucht, welcher den vorgegebenen und bekannten Versatz von 3,5 m möglichst genau erfüllt, siehe Abbildung 34. Dadurch können die Messdaten der GPS-Position auf die Versatzbreite kalibriert werden und liefern sehr präzise Werte des lateralen Versatzes.

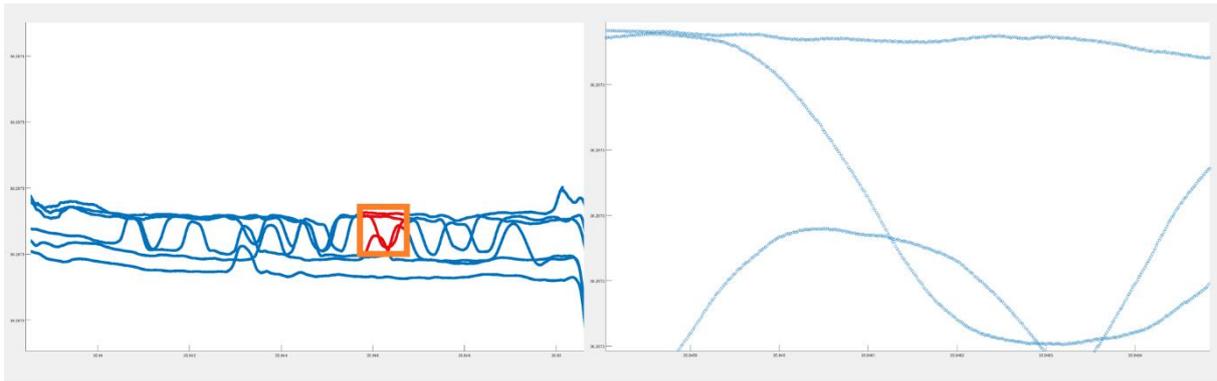


Abbildung 34: Ausgewählte Daten zum Abgleich der Versatzbreite

Der gesuchte Spurwechsel (SL01re04) wird aus den Daten extrahiert (siehe Abbildung 35) und separat analysiert. Die erhaltenen Datenpunkte werden in eine neue Variable gespeichert. Anschließend wird die Differenz (MIN/MAX) der y-Koordinatenwerte ermittelt und damit der Wert für einen Spurversatz von 3,5 m definiert.

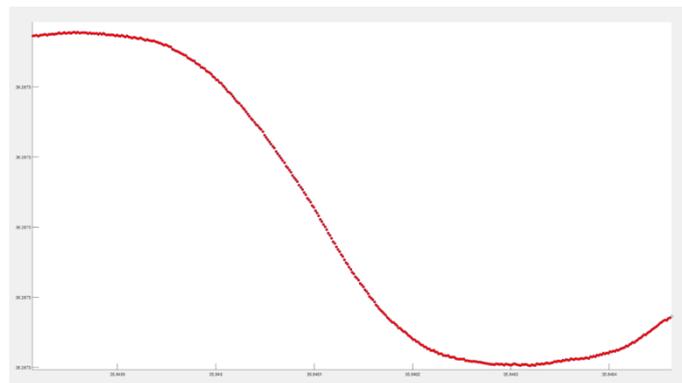


Abbildung 35: Extrahierter Fahrstreifenwechsel

Ein anderer Ansatz wurde in einer Projektarbeit [12] verfolgt. Dabei wurde versucht, den seitlichen Versatz über die gemessenen Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten zu ermitteln. Dafür wurden Daten der Versuche auf der Doktor-Nekowitsch-Straße herangezogen, in welchen die Strecke einmal in eine Richtung von beiden Fahrern abgefahren wurde. Es wurde der seitliche Versatz mit den Messdaten der drei IMUs berechnet und mit dem Ergebnis der GPS-Daten verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Berechnung des Versatzes über die Messdaten der IMUs möglich ist. Der mittlere quadratische Fehler zwischen den IMUs und dem GPS-Signal lag bei 0,5 m. Allerdings waren die Messsignale stark verrauscht und mussten daher gefiltert werden. Da für die Berechnung der Position die Signale integriert werden müssen, führten die Messfehler zu einem Integrationsdrift. Es musste ein Kompromiss zwischen der Stärke der Filterung und der Genauigkeit der Ergebnisse eingegangen werden, da eine zu starke Filterung der Messdaten zu einer Unterschätzung der Versatzbreite geführt hätte.

Für die präzise Ermittlung der Versatzbreite scheint die Berechnung über die GPS-Position vielversprechender. Um die größtmögliche Genauigkeit aus den GPS-Daten zu erhalten, sollte eine Verifizierung der GPS-Position im Zuge der Messaufzeichnung durchgeführt werden.

Dabei sollte z.B. ein Spurwechsel von der Begrenzungslinie zur Leitlinie durchgeführt werden. Der Abstand ist dabei leicht nachmessbar und der Versatz in den GPS-Daten kann anschließend kalibriert werden.

6.5.7. Die Auswertung der Lenkwinkelmessung

In Abbildung 36 ist ein typischer Verlauf des Lenkwinkels bei einem Fahrstreifenwechsel nach links dargestellt, am Beispiel von Fahrer SL. Es ist zu erkennen, dass ein Versatz der Nulllage vorliegt. Dieser findet sich auch in allen weiteren Lenkwinkeldiagrammen wieder, daher wird ein Korrekturwert von +0,8 Grad für die weitere Auswertung berücksichtigt. Des Weiteren treten einige signifikante Extremwerte auf. Zuerst ein lokales Minimum (Lenkwinkel nach rechts), welches durch den Lenkimpuls zum Einleiten des Fahrstreifenwechsels entsteht. Gefolgt von einem Maximum (Lenkwinkel nach links), welches auftritt, sobald der maximale Rollwinkel erreicht ist. Dabei gibt der Fahrer erneut einen Lenkimpuls, um das Rollen auf die andere Seite einzuleiten. Zuletzt tritt wiederum ein Minimum auf, ausgelöst durch den Lenkimpuls des Fahrers, um den Rollwinkel des Motorrads auf die Nulllage zurückzuführen. Der Lenkwinkelverlauf ab Sekunde 3,5 hat für diesen Versuch keine Relevanz. Diese Messdaten gehören zu dem nachfolgenden Spurwechsel nach rechts, welcher ohne ausreichende Pause durchgeführt wurde. Der Verlauf des Lenkwinkels ist für einen Fahrstreifenwechsel nach rechts um die horizontale Achse gespiegelt. Eine Filterung der Daten ist offensichtlich nicht erforderlich.

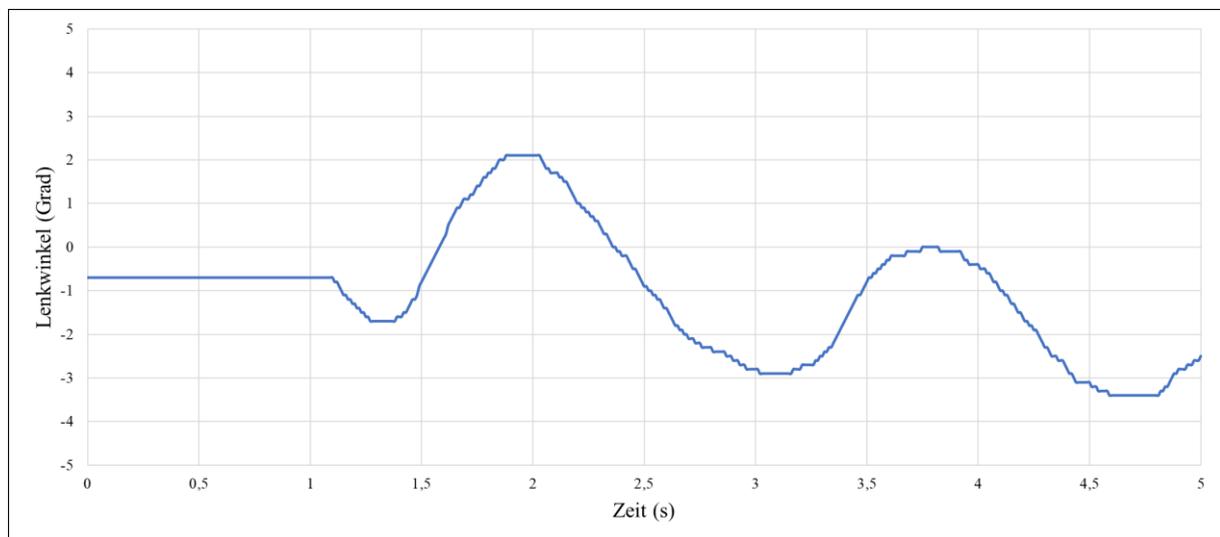


Abbildung 36: Typischer Verlauf des Lenkwinkels bei einem Fahrstreifenwechsel nach links

6.5.8. Die Auswertung der Gierratenmessung

In Abbildung 37 ist der typische Verlauf der Gierrate, am Beispiel einer Fahrt von Fahrer HE auf der Schnellstraße, dargestellt. Es handelt sich dabei um einen Fahrstreifenwechsel nach rechts. Man erkennt, dass die Daten etwas verrauscht sind. Dies trifft jedoch nur auf wenige

Versuche zu. Trotzdem werden zur besseren Vergleichbarkeit alle Versuche für die weitere Verwendung gefiltert.

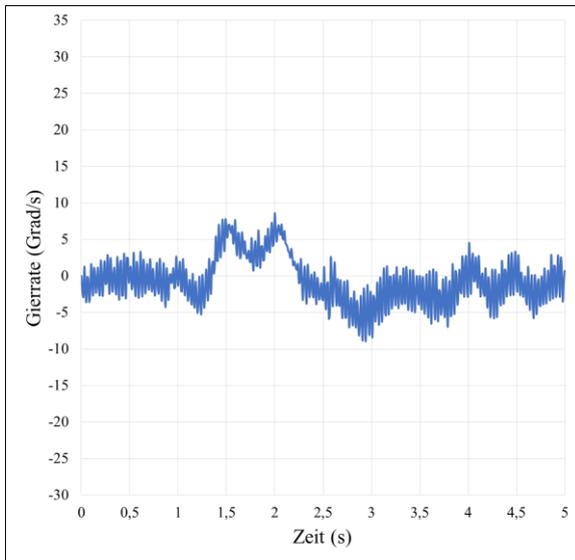


Abbildung 37: Beispielhafter ungefilterter Verlauf der Gierrate

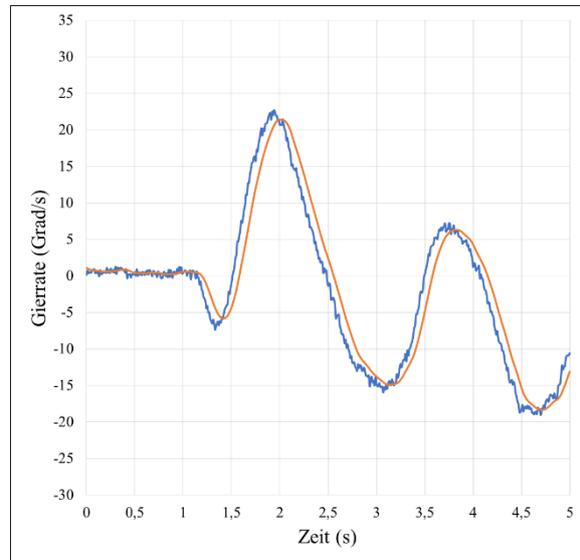


Abbildung 38: Beispielhafter Verlauf der Gierrate; ungefiltert (blau), gefiltert (orange)

Der verwendete Filter ist die sogenannte „doppelte exponentielle Glättung“. Die eingesetzte allgemeine Formel lautet:

$$y_t^* = \alpha y_t + (1 - \alpha) y_{t-1}^*, \quad \text{mit } \alpha = 0,2$$

Diese wird einmal auf die gemessenen Werte und nochmals auf die Ergebnisse der ersten Filterung angewendet. Durch die Filterung erfolgt eine zeitliche Verschiebung der Kurve. Da die gefilterten Werte allerdings nur für Extremwerte herangezogen werden, hat dies keinen weiteren Einfluss auf die Ergebnisse. Der ideale Verlauf der Gierrate zeichnet sich durch drei Extremwerte aus. Einem lokalen Minimum (Gierrate nach rechts), gefolgt von einem Maximum (Gierrate nach links) und einem Minimum (beim Spurwechsel nach links), dargestellt in Abbildung 38. Wie schon in Kapitel 6.5.7 erklärt, folgt auch hier ab dem Nulldurchgang bei etwa 3,5 s der nächste Fahrstreifenwechsel. Vergleicht man die Zeitverläufe von Gierrate und Lenkwinkel zeigt sich, dass beide Kurven synchron verlaufen.

6.5.9. Die Auswertung der Nickratenmessung

Abbildung 39 zeigt einen beispielhaften Verlauf der Nickrate bei einem Spurwechselmanöver von Fahrer HE auf der Schnellstraße S5. Es ist ersichtlich, dass die Daten sehr verrauscht sind, was eine Filterung der Daten unbedingt notwendig macht. Als Filterungsverfahren wird auch bei dieser Auswertung die „doppelte exponentielle Glättung“ mit der allgemeinen Formel aus Kapitel 6.5.8 angewendet. Allerdings zeigen die Verläufe der Nickrate selbst nach der Filterung keine systematischen Ähnlichkeiten. Daher wird der Parameter Nickrate in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

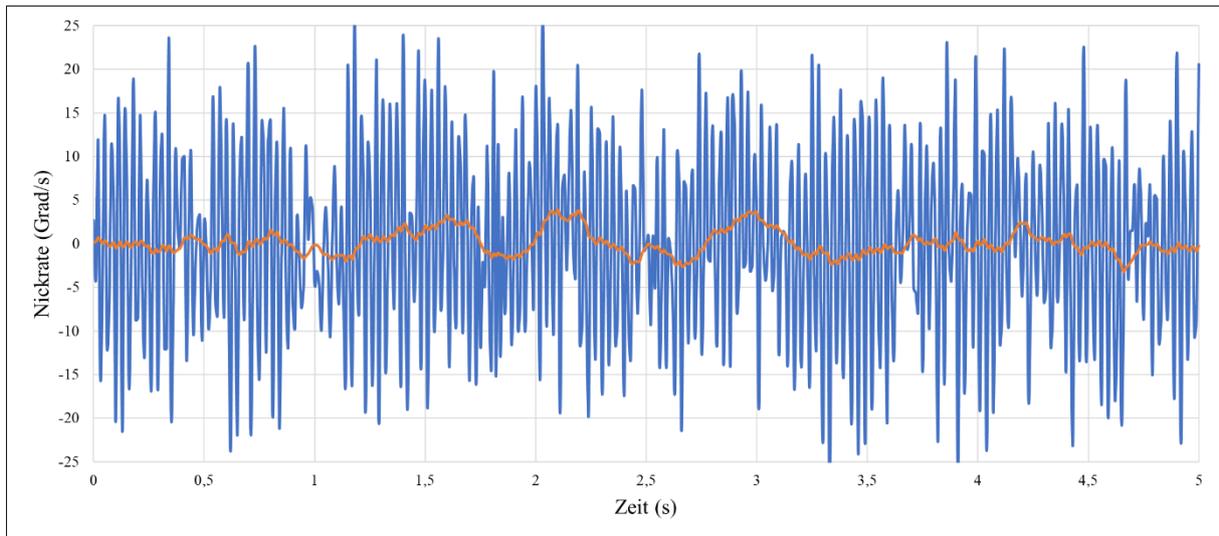


Abbildung 39: Beispielhafter Verlauf der Nickrate

6.5.10. Die Auswertung der Längsbeschleunigungsmessung

Der Zeitverlauf der Längsbeschleunigung eines beispielhaften Fahrstreifenwechsels ist in Abbildung 40 dargestellt. Man erkennt, dass die Daten mit anderen Schwingungen überlagert sind. Daher ist eine Filterung der Messdaten erforderlich. Es wird dasselbe Filterungsverfahren wie bei Gier- und Nickrate angewendet: die „doppelte exponentielle Glättung“ mit der allgemeinen Formel aus Kapitel 6.5.8. Wie schon bei den Verläufen der Nickrate ist auch hier nach der Filterung keine systematische Ähnlichkeit in den Zeitreihen der Längsbeschleunigung zu erkennen. Daher wird die Längsbeschleunigung in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

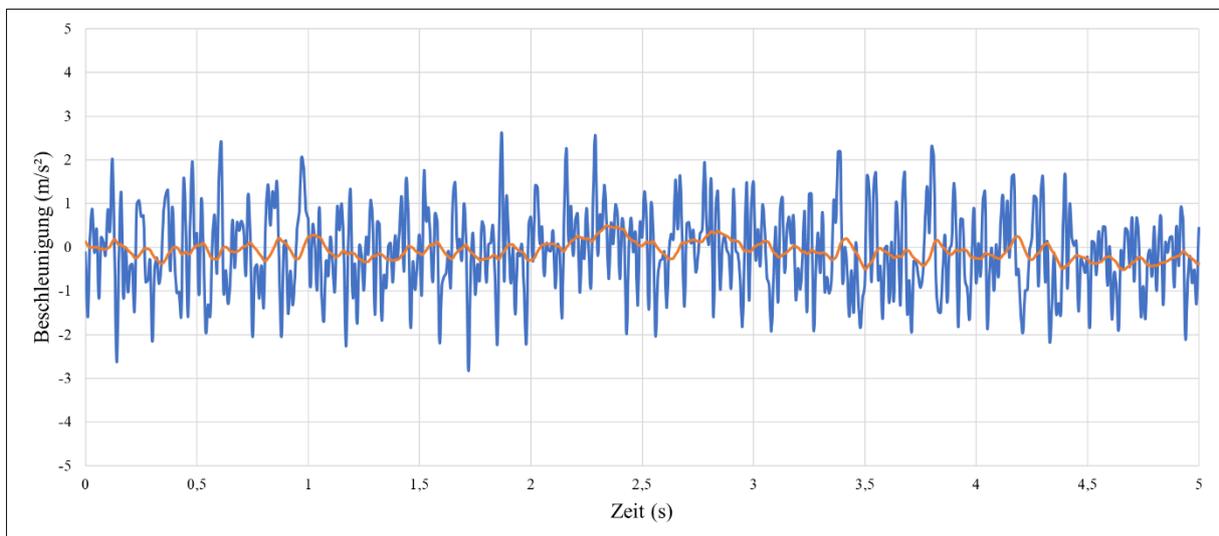


Abbildung 40: Beispielhafter Verlauf der Längsbeschleunigung

6.5.11. Die Auswertung der Querbeschleunigungsmessung

In Abbildung 41 ist beispielhaft der Verlauf der Querbeschleunigung während eines Fahrstreifenwechsels nach links gezeigt. Auch bei der Beschleunigung in y-Richtung muss

das Filterungsverfahren aus Kapitel 6.5.8 angewendet werden. Nach der Filterung charakterisiert sich der Verlauf durch zwei Extremwerte, ein Minimum (Beschleunigung nach links) gefolgt von einem Maximum (Beschleunigung nach rechts). Bei einem Fahrstreifenwechsel nach rechts ist die Kurve an der horizontalen Achse gespiegelt.

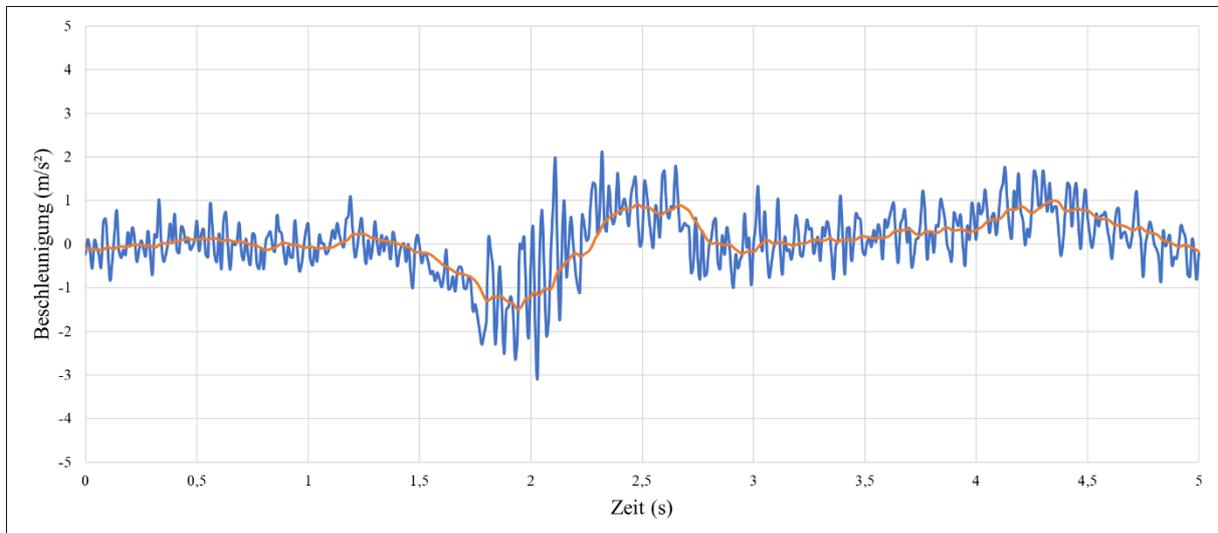


Abbildung 41: Beispielhafter Verlauf der Querbeschleunigung

6.5.12. Die Auswertung der Vertikalbeschleunigungsmessung

Zuletzt wird in Abbildung 42 die Vertikalbeschleunigung beispielhaft visualisiert. Man erkennt, dass die Daten ohne Filterung kaum zu beurteilen sind. Das Filterungsverfahren aus Kapitel 6.5.8 wird erneut eingesetzt. Nach erfolgter Filterung der Daten ist zu erkennen, dass der Mittelwert der Zeitreihe bei etwa $+10 \text{ m/s}^2$ (Beschleunigung nach oben) liegt. Das liegt daran, dass die Fallbeschleunigung ($-9,81 \text{ m/s}^2$) entlang dieser Achse wirkt. Abgesehen davon ist keine systematische Ähnlichkeit im Verlauf der Vertikalbeschleunigung aller Versuche zu erkennen. Wie schon bei der Längsbeschleunigung wird daher wird auch der Messwert der Beschleunigung in z-Richtung in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

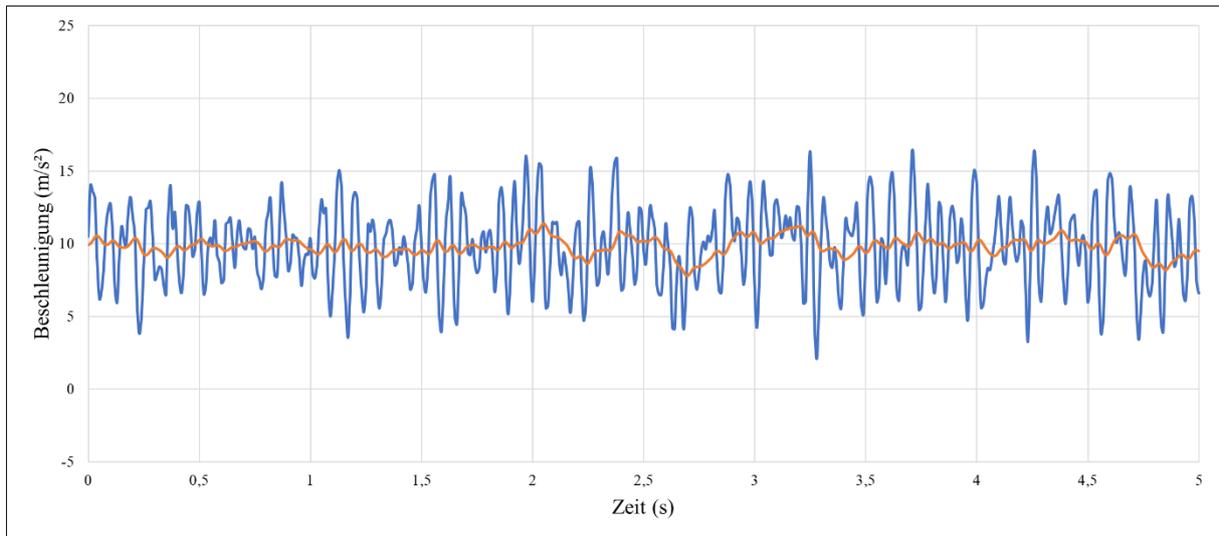


Abbildung 42: Beispielhafter Verlauf der Vertikalbeschleunigung

7. Die Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die aus den ausgewerteten Daten gewonnenen Ergebnisse der Versuchsfahrten und die daraus gezogenen Rückschlüsse, unterteilt in die Ergebnisse der Fahrstreifenwechsel- und der Reaktionszeitversuche, angeführt.

7.1. Die Ergebnisse der Fahrstreifenwechselversuche

Im folgenden Kapitel werden statistische Werte für die Extremwerte der Parameter Rollwinkel, Rollrate, Intensität, Dauer, Geschwindigkeit, Versatzbreite, Lenkwinkel, Gierrate und Querschleunigung angegeben. Es werden die Ergebnisse nach Fahrer und dem Geschwindigkeitsbereich unterteilt und verglichen. Der Einfluss der jeweiligen Parameter auf den Fahrstreifenwechsel wird in den folgenden Unterkapiteln einzeln und in Abhängigkeit zu den anderen Parametern in Streudiagrammen betrachtet. Bei einigen Diagrammen sind Trendlinien gezeichnet, welche mit der Methode der kleinsten Quadrate berechnet wurden. Diese sollen den visuellen Eindruck einer linearen Abhängigkeit zusätzlich bestätigen. Die Parameter Nickrate, Längs- und Vertikalbeschleunigung werden in diesem Kapitel nicht mehr betrachtet, wie in Kapitel 6.5 ausführlich erklärt ist.

7.1.1. Statistische Ergebnisse

Die statistischen Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 6 auszugsweise und im Anhang vollständig festgehalten. Die Tabelle gibt den Mittelwert \bar{x} , den Median \tilde{x} , die Standardabweichung σ , sowie den Maximal- und Minimalwert für die zuvor angeführten Parameter an. Sie ist gegliedert in Fahrstreifenwechsel nach links und rechts und unterteilt für jede Messfahrt und jeden Fahrer. Zur besseren Vergleichbarkeit sind außerdem die Messfahrten von HE, sowie aller Fahrten auf der Doktor-Nekowitsch-Straße (DNS) und der Schnellstraße S5 zusammengefasst. Damit können die Fahrer, die unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereiche und auch die Kombination aller Versuche verglichen werden. Fehlerhafte Versuche werden ebenfalls in der Tabelle angeführt, die Messwerte aber aus den Ergebnissen ausgeschlossen.

Tabelle 6: Auszug der statischen Ergebnisse der Fahrstreifenwechsel

Umfang		HE	SL	DNS	S5	Gesamt
Rollwinkel li SW li	n	74	36	110	57	167
	\bar{x}	-11,44	-20,53	-14,53	-13,34	-14,10
	\tilde{x}	-10,70	-20,05	-13,50	-13,95	-13,70
	σ	2,76	2,26	5,05	2,85	4,40
	MAX	-17,20	-25,30	-25,30	-19,60	-25,30
	MIN	-7,00	-16,70	-7,00	-7,60	-7,00
	Fehlerhaft	2	0	2	0	2

Es wurden insgesamt 167 Fahrstreifenwechsel durchgeführt. Davon wurden 131 von Fahrer HE und 36 von Fahrer SL unternommen. Im Ortsgebiet wurden 110 Manöver absolviert, bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 50 km/h. Auf der Schnellstraße wurden 57 Spurwechsel bei höheren Geschwindigkeiten durchgeführt und aufgezeichnet. Bei Fahrstreifenwechseln mit einer vollen Fahrstreifenbreite Versatz betrug die Anzahl 120 und bei einem Versatz von einer halben Fahrstreifenbreite betrug die Anzahl 43. Die fehlenden Manöver haben keinen verwertbaren Fahrstreifenwechsel dargestellt. Die durchschnittliche Geschwindigkeit lag bei 67 km/h, das maximale Tempo bei 118 km/h und das niedrigste bei 26 km/h. Die Details der einzelnen Parameter und die Unterschiede zwischen den Fahrern und Geschwindigkeiten werden in den folgenden Kapiteln detailliert betrachtet.

7.1.2. Die Ergebnisse der Rollwinkelbewertung

In Abbildung 43 ist die Häufigkeit des aufgetretenen maximalen Rollwinkels während der Versuche im Ortsgebiet dargestellt. Der gewählte Wert ist der erste auftretende Extremwert des Verlaufs, welcher in Kapitel 6.5.1 genauer beschrieben wurde. Die Säulen sind blau für Fahrer HE beziehungsweise rot für Fahrer SL gefärbt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die beiden Fahrer unterschiedliche Bereiche der gefahrenen Rollwinkel haben. Fahrer HE hat ein Maximum im Bereich 10 bis 12 Grad, bei einer Spanne von etwa 6 bis 19 Grad. Bei Fahrer SL liegt die maximale Häufigkeit bei 20 Grad, mit einer Spanne von etwa 13 bis 26 Grad. Dafür gibt es zumindest zwei mögliche Erklärungen. Erstens, dass Fahrer HE weniger aggressive Fahrstreifenwechsel durchführt, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, und/oder zweitens, dass unterschiedliche Techniken angewendet werden. Fahrer HE saß während des Manövers neutral auf dem Motorrad, während Fahrer SL neben der neutralen Sitzposition auch die Technik „Drücken“ einsetzte. Bei dieser Fahrtechnik „drückt“ der Fahrer das Motorrad vom Körper weg in die „Schräglage“, dabei erreicht das Motorrad einen größeren Rollwinkel als der Oberkörper des Fahrers. Verglichen mit den in Kapitel 2 erwähnten Hypothesen von Sharp in [7], dass die optimale Steuerung des Lenkmoments kaum vom Körperrollmoment abhängig sei und dass die Körperbewegung hauptsächlich der besseren Sicht diene, bedeutet das jedoch, dass die angewendete Kurvenfahrtechnik nur wenig Einfluss auf das Manöver hat. Dies bestärkt zusätzlich die zuvor beschriebene Annahme, dass SL den Fahrstreifenwechsel forscher durchgeführt hat als HE.

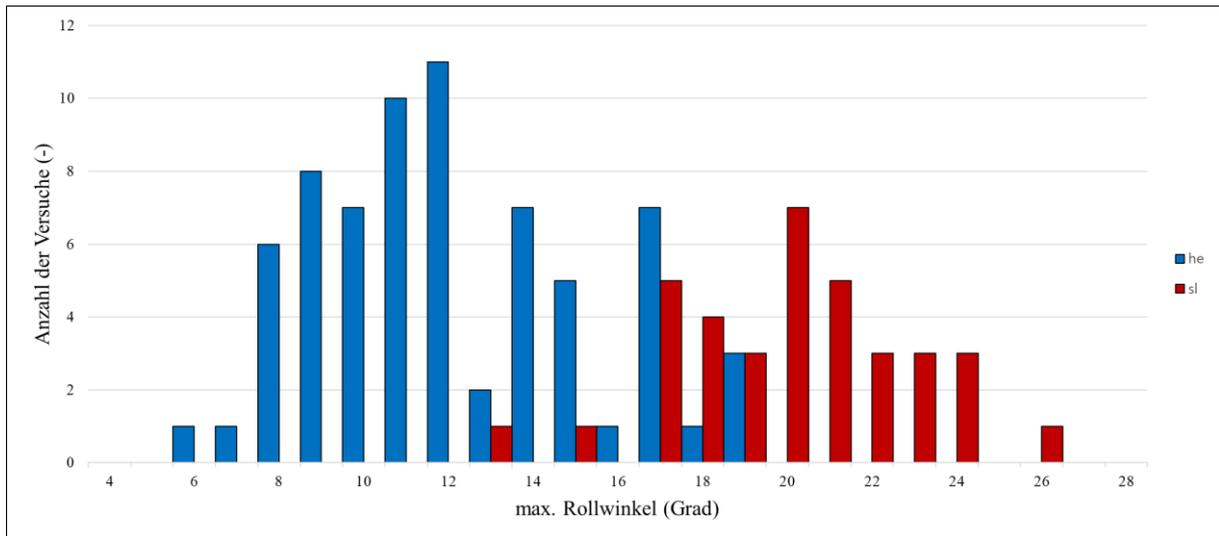


Abbildung 43: Histogramm des Rollwinkels der Fahrer

Die Häufigkeiten im höheren Geschwindigkeitsbereich sind in Abbildung 44 den Werten aus dem Ortsgebiet gegenübergestellt. Die orangen Säulen zeigen die kombinierten Häufigkeiten aus Abbildung 43, die grünen Säulen jene die außerhalb des Ortsgebiets. Wie schon zuvor erwähnt, wurden die Versuche auf der Schnellstraße ausschließlich von Fahrer HE durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass die maximale Häufigkeit bei 15 Grad liegt. Damit liegt es zwischen den beiden Peaks der Fahrer im Ortsgebiet. Verglichen mit den Daten von HE im Ortsgebiet hat es eine Verschiebung des Peaks in Richtung höherer Rollwinkel gegeben, obwohl die Fahrstreifenwechsel auf der Schnellstraße hauptsächlich nur einen Versatz von einer halben Fahrstreifenbreite aufwies. Die Spanne bei höheren Geschwindigkeiten reicht von etwa 8 bis 26 Grad maximalen Rollwinkel. Der höchste erreichte Wert für den Rollwinkel lag bei 26,5 Grad.

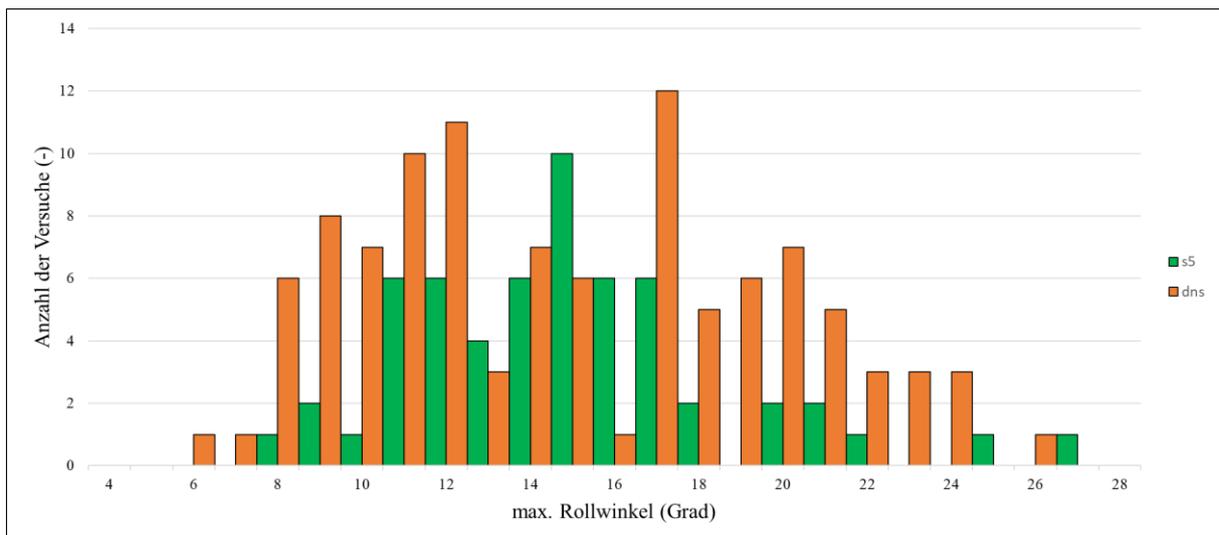


Abbildung 44: Histogramm des Rollwinkels der Geschwindigkeitsbereiche

In Abbildung 45 sind die Häufigkeiten getrennt in Fahrstreifenwechsel nach links (violett) bzw. rechts (grau) graphisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Maximum bei

Fahrstreifenwechseln nach links niedriger ist. Bei Manövern nach rechts gibt es zwei Maxima, einmal bei 12 Grad und einmal bei 17 Grad. In diesem Diagramm werden alle Versuche, innerhalb und außerhalb des Ortsgebiets betrachtet.

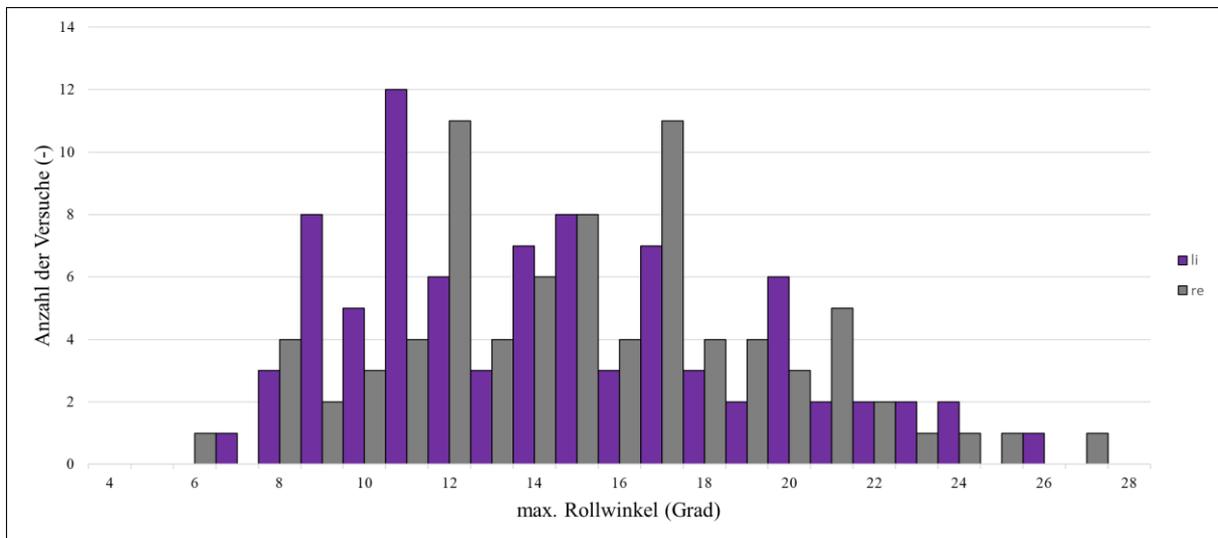


Abbildung 45: Histogramm des Rollwinkels der Manöverrichtung

7.1.3. Die Ergebnisse der Rollratenauswertung

In Abbildung 46 ist der Vergleich der Fahrer in Bezug auf die maximale Rollrate dargestellt. Der verwendete Wert ist der zweite auftretende Extremwert, siehe Kapitel 6.5.2. Wie schon bei dem Rollwinkel ist zu erkennen, dass die beiden Fahrer unterschiedliche Bereiche abdecken. Fahrer SL (rot) hat erneut den oberen Bereich der Skala befüllt, während HE (blau) geringere Werte für die maximale Rollrate erzielte. Fahrer HE erreichte am häufigsten eine maximale Rollrate von 25 bis 30 Grad/s, bei einer Spanne von 15 bis 60 Grad/s. Fahrer SL erreichte hingegen eine maximale Häufigkeit bei 55 Grad/s, bei einer Spanne von 20 bis 80 Grad/s. Die großen Unterschiede zwischen den beiden Fahrern sind, wie schon beim Rollwinkel, durch eine unterschiedliche Intensität bzw. auch eine andere Fahrtechnik zu erklären.

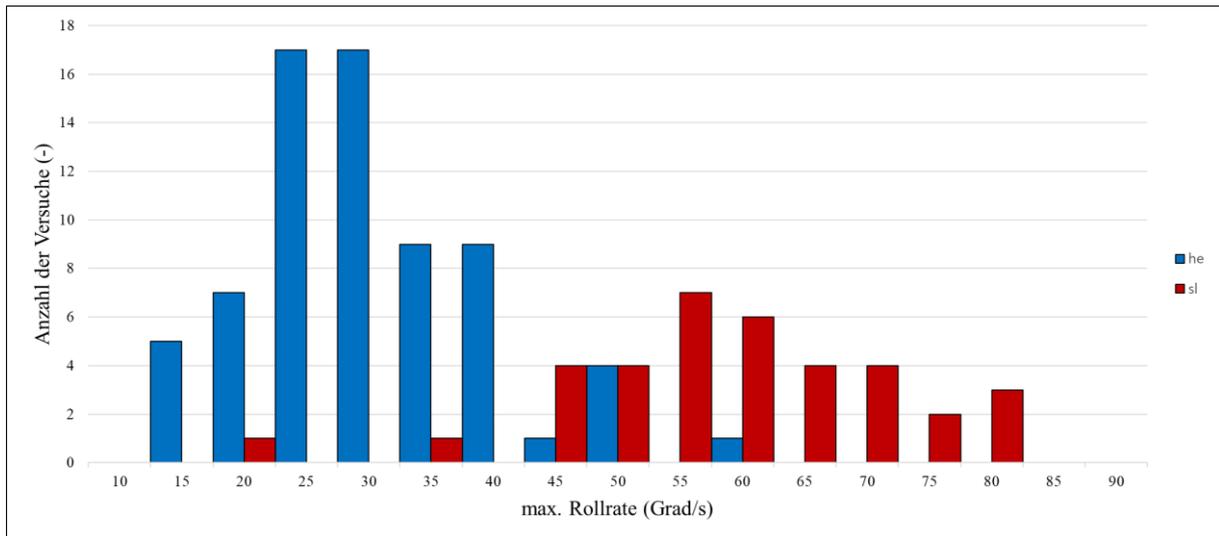


Abbildung 46: Histogramm der Rollrate der Fahrer

Die Unterschiede zwischen Manövern unterschiedlicher Geschwindigkeitsbereiche sind in Abbildung 47 illustriert. Die Versuche im niedrigeren Geschwindigkeitsbereich sind dabei wieder orange, jene im höheren Geschwindigkeitsbereich grün dargestellt. Wie schon bei der Verteilung des Rollwinkels ist auch bei der Rollrate zu erkennen, dass die größte Häufigkeit bei höherer Geschwindigkeit höher liegt. Die Spanne bei höherem Tempo reicht von etwa 20 bis 80 Grad/s. Die maximale Rollrate liegt bei 81 Grad/s.

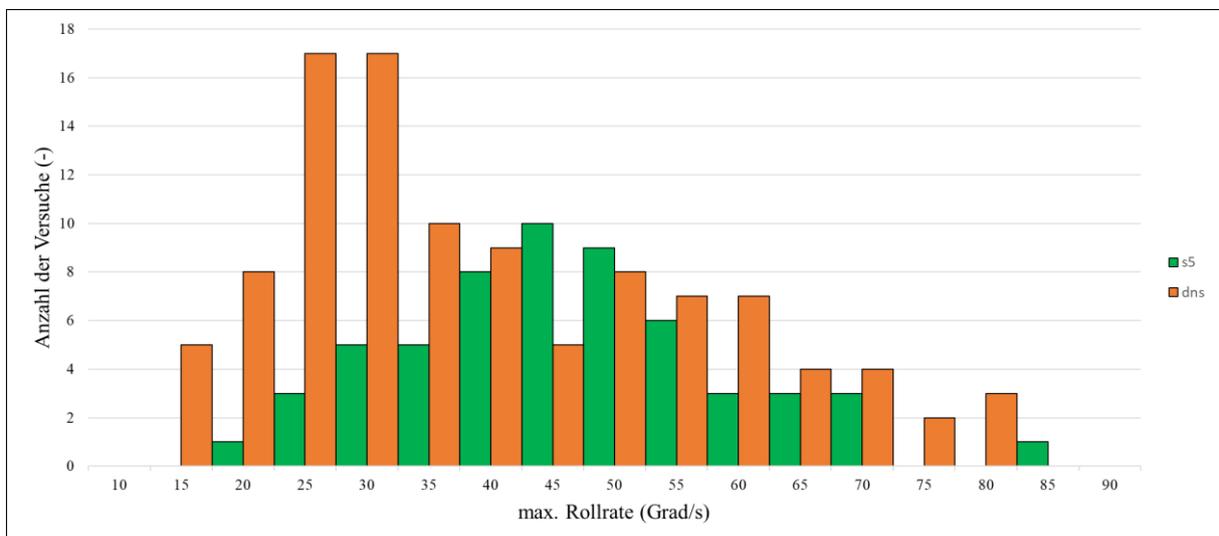


Abbildung 47: Histogramm der Rollrate der Geschwindigkeitsbereiche

Manöver nach rechts bzw. links werden in Abbildung 48 verglichen. Auch hier ähneln sich die Verteilungen deutlicher als beim Rollwinkel.

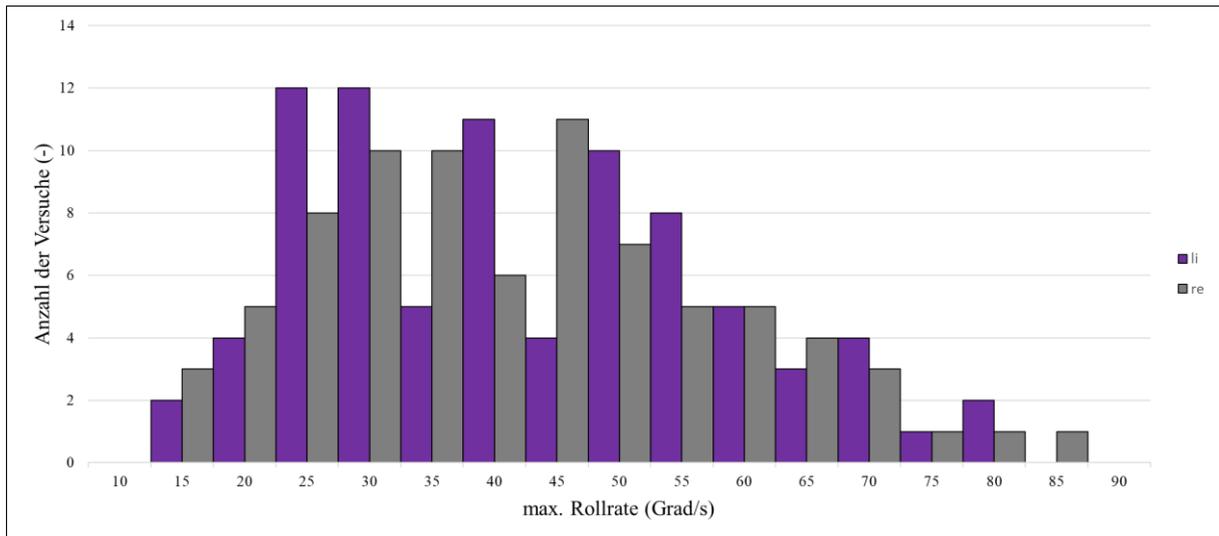


Abbildung 48: Histogramm der Rollrate der Manöverrichtung

Abbildung 49 zeigt die Abhängigkeit der maximalen Rollrate vom maximalen Rollwinkel farblich getrennt in die beiden Fahrer, sowie die Versuche auf der Schnellstraße. Die Versuche der beiden Fahrer passen gut zusammen und zeigen einen deutlichen Trend, welcher durch eine lineare Trendlinie anschaulich gemacht wird. Auch die Punkte der Manöver im höheren Geschwindigkeitsbereich zeigen einen deutlichen Trend. Allerdings scheint dieser steiler als bei geringerer Geschwindigkeit zu sein. Ob dies nun rein aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeit entsteht, oder aber daran liegt, dass die meisten Manöver auf der Schnellstraße nur einen Versatz von einer halben Fahrstreifenbreite aufweisen, kann aus diesen Messungen nicht eindeutig festgestellt werden.

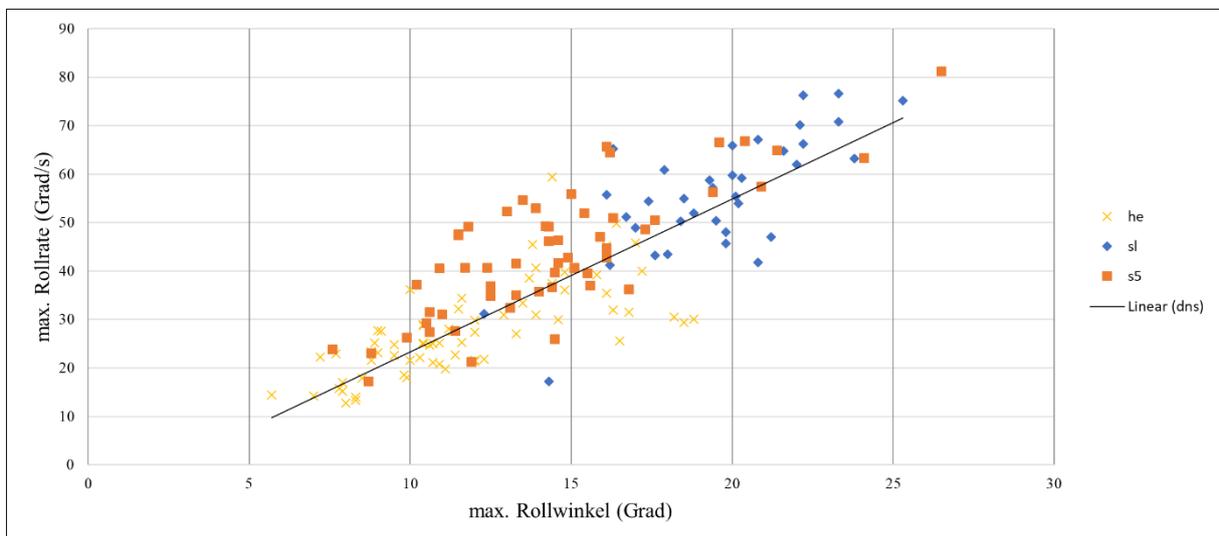


Abbildung 49: Abhängigkeit der Rollrate vom Rollwinkel

7.1.4. Die Ergebnisse der Intensitätsauswertung

Abbildung 50 beschreibt die Intensität bei den Versuchen im Ortsgebiet. Die blauen Säulen zeigen die Versuche von Fahrer HE und die roten jene von Fahrer SL, wodurch ersichtlich

wird, dass die beiden Fahrer unterschiedliche Bereiche der Intensität erreichen. Fahrer HE hat die meisten Versuche mit einer Intensität von 4,75, bei einer Spanne von 3,5 bis 6,25 absolviert. Bei Fahrer SL liegt die maximale Häufigkeit bei einem Wert von 6,25, mit einer Spanne von 5 bis 7. Es zeigt sich, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, dass Fahrer SL aufgrund der höheren Intensität sportlicher fahrstreifenwechselt als HE.

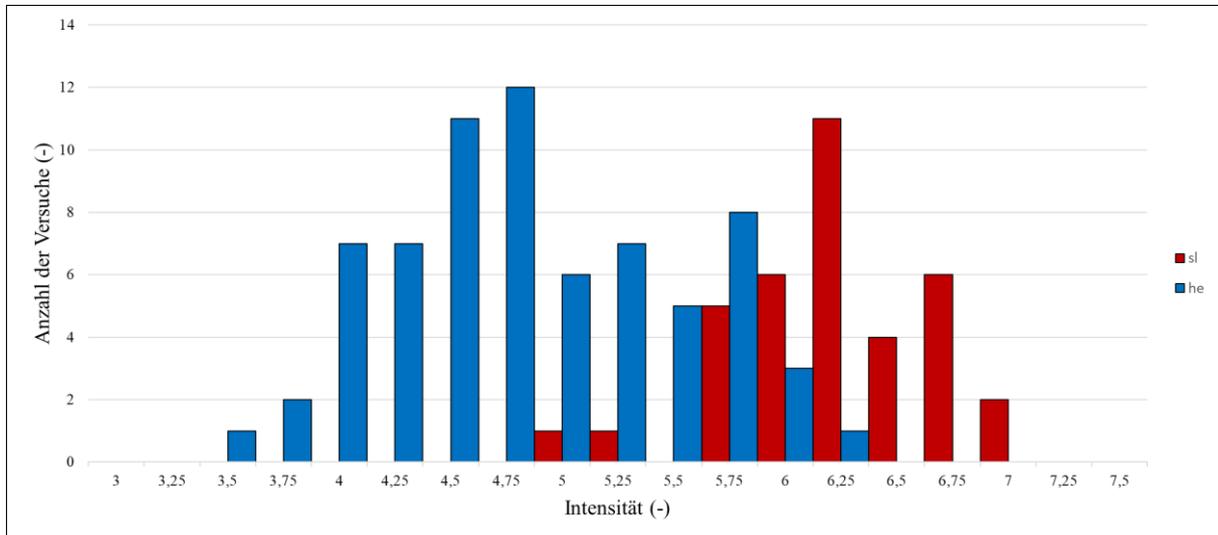


Abbildung 50: Histogramm der Intensität der Fahrer

Die Intensität der gefahrenen Strecken auf der Schnellstraße wird in Abbildung 51 mit den Werten aus den gefahrenen Versuchen innerhalb des Ortsgebiet verglichen. Die orangen Säulen verdeutlichen die Intensität aus Abbildung 50, die grünen Säulen jene der Versuche auf der Schnellstraße. Wie bereits beschrieben, wurden die Versuche auf der Schnellstraße von Fahrer HE gefahren. Das Diagramm zeigt, dass die Häufigkeit bei einer Intensität von 5,5 ein Maximum erreicht. Die Spanne reicht von 4 bis 7,25.

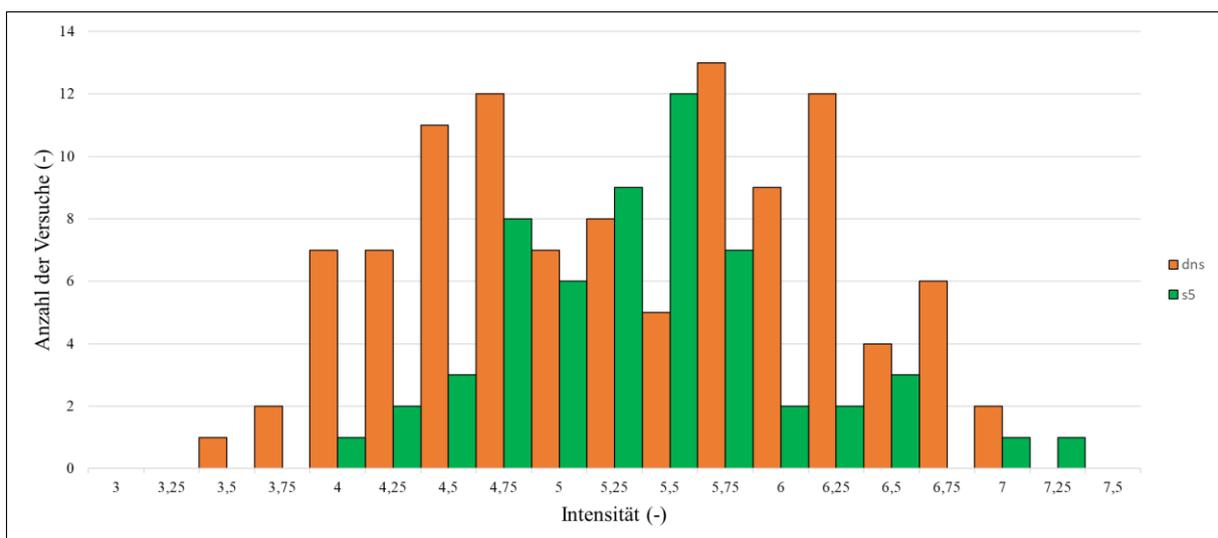


Abbildung 51: Histogramm der Intensität der Geschwindigkeitsbereiche

In Abbildung 52 stellt das Diagramm die Intensität beim Fahrstreifenwechsel nach links bzw. nach rechts dar. Die grauen Säulen stehen für den Fahrstreifenwechsel nach rechts, die violetten für die nach links. In diesem Diagramm werden alle gefahrenen Versuche betrachtet.

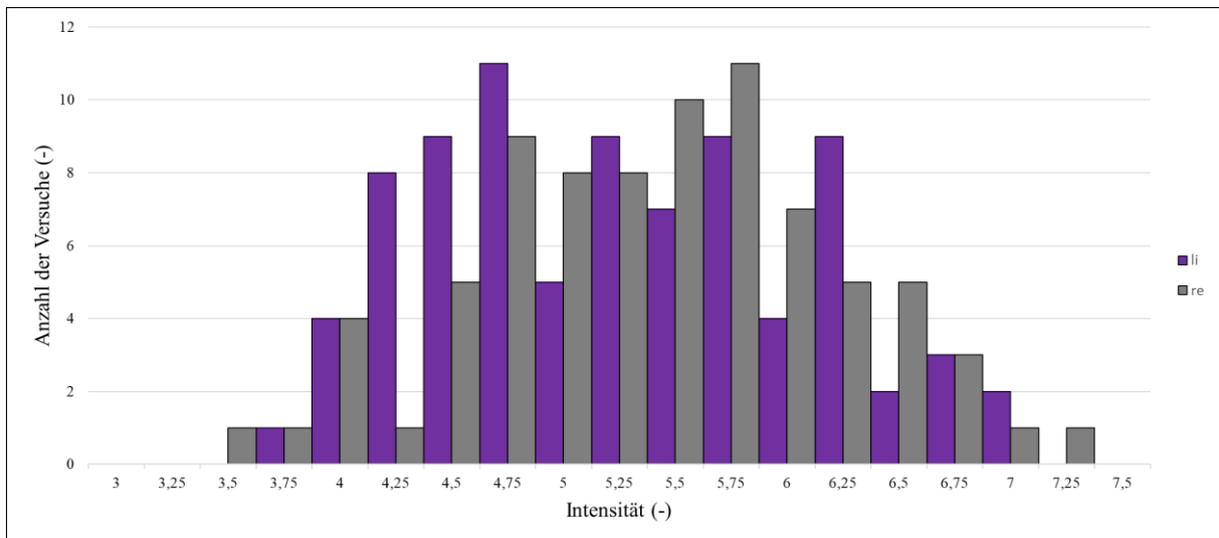


Abbildung 52: Histogramm der Intensität der Manöverrichtung

Die Beziehung von maximalem Rollwinkel und Intensität ist in Abbildung 53 dargestellt. Da sich die Intensität aus dem maximalen Rollwinkel berechnet, ist es nicht verwunderlich, dass die Punkte aller Versuche auf einer Linie zu liegen kommen. Die Linie hat die Funktion aus Kapitel 6.5.3, dort ist auch beschrieben, warum diese Funktion gewählt wurde.

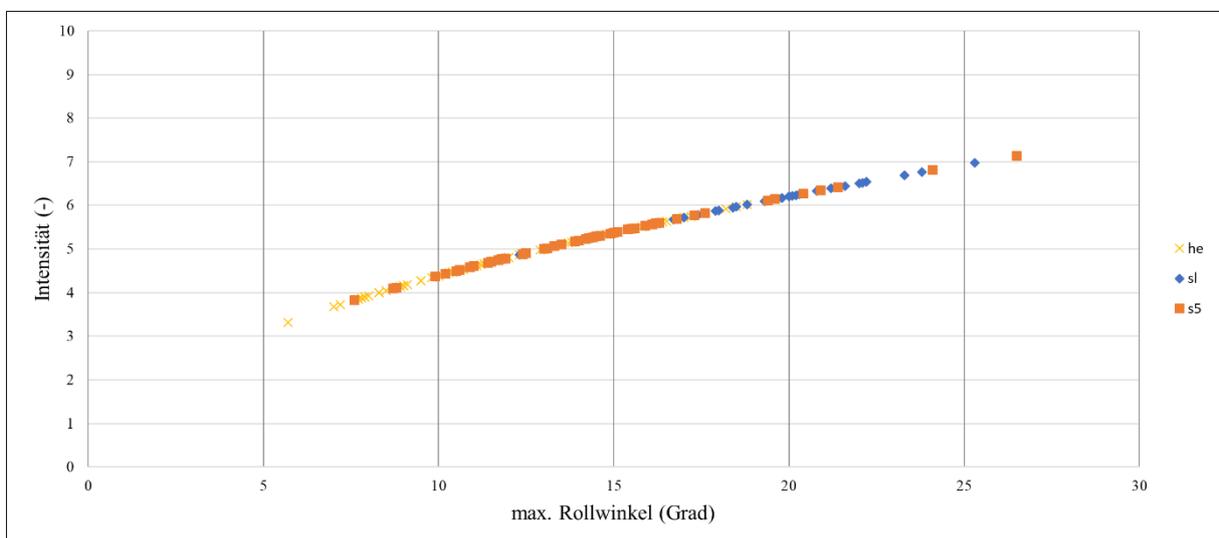


Abbildung 53: Abhängigkeit der Intensität vom Rollwinkel

In Abbildung 54 ist die Abhängigkeit der Intensität von der maximalen Rollrate aufgezeigt. In Bezug auf Abbildung 49 ist zu erkennen, dass die lineare Beziehung von Rollwinkel und Rollrate dazu führt, dass die Intensität in einer ähnlichen Beziehung zu Rollwinkel und Rollrate steht. Auffällig ist trotzdem, dass die Versuche auf der Schnellstraße tendenziell niedrigere Intensität bei gleicher Rollrate aufweisen. Das mag jedoch daran liegen, dass die meisten

Versuche auf der Schnellstraße nur einen Versatz von einer halben Fahrstreifenbreite aufweisen und daher weniger hohe Werte für den Rollwinkel, bei gleicher Rollrate, erreichen.

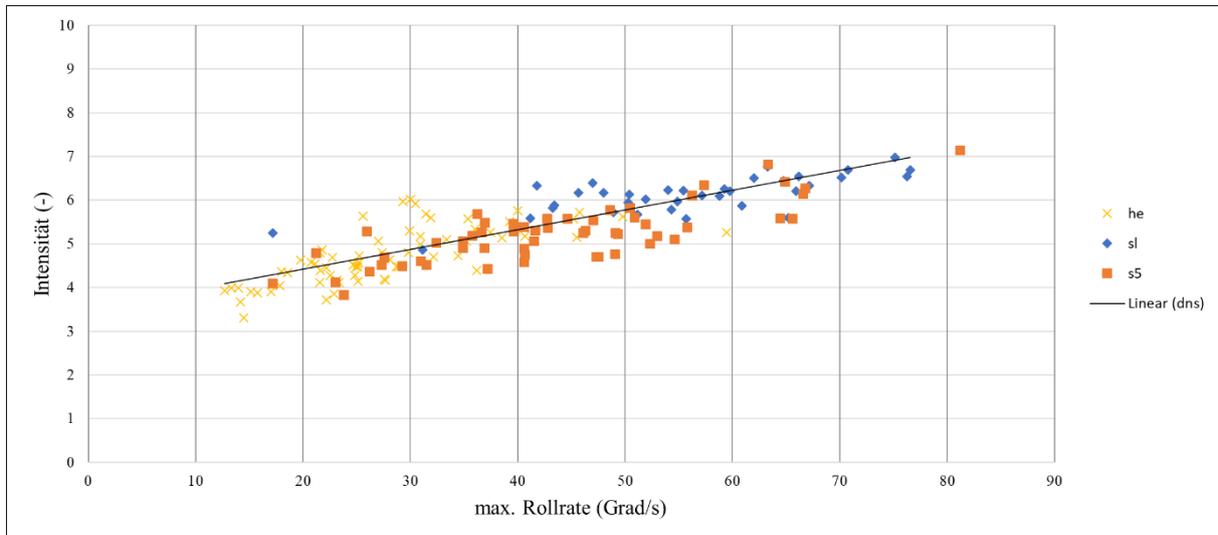


Abbildung 54: Abhängigkeit der Intensität von der Rollrate

7.1.5. Die Ergebnisse der Auswertung der theoretischen Manöverdauer

In Abbildung 55 wird die Dauer der Versuche im Ortsgebiet visualisiert. Die roten Säulen zeigen die Dauer der Manöver, welche von Fahrer SL durchgeführt und die in blau gefärbten jene, welche von Fahrer HE gefahren wurden. In der Abbildung zeigt sich, dass die beiden Fahrer ungefähr die gleiche Dauer für die Fahrstreifenwechsel benötigen. Fahrer SL hat bei den meisten Versuchen zwischen 2,75 und 3 Sekunden benötigt, bei einer Spanne von 2,25 bis 5. Bei Fahrer HE liegt die größte Häufigkeit bei einer Dauer 3 bis 3,5 Sekunden, mit einer Spanne von 2,5 bis 5,25. Es wird mit dem Diagramm deutlich, dass der Fahrer SL die Fahrstreifenwechsel etwas schneller durchführt als der Fahrer HE.

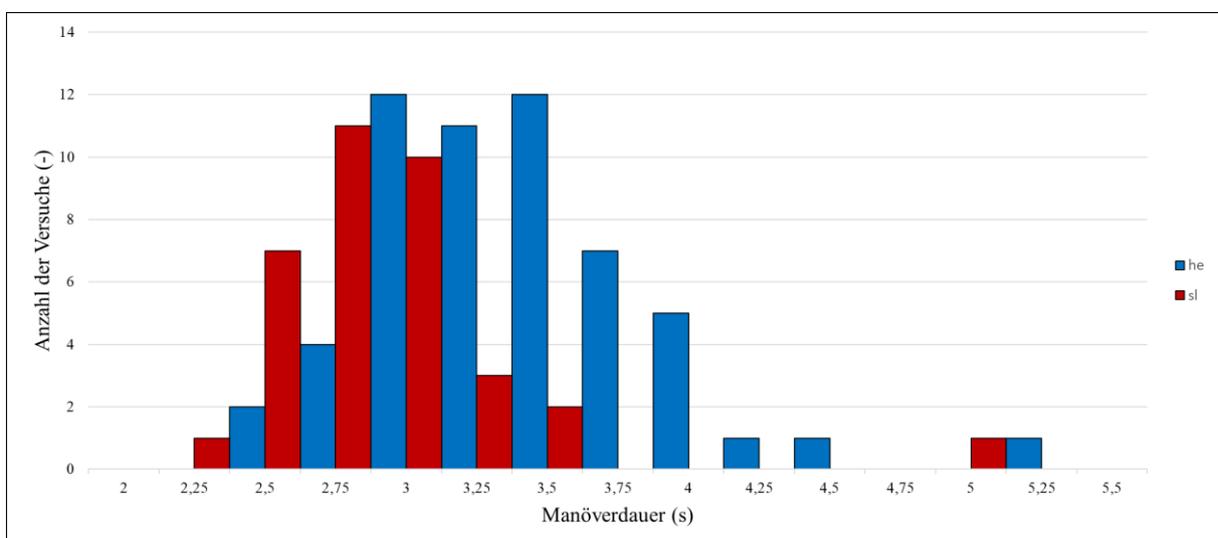


Abbildung 55: Histogramm der Manöverdauer der Fahrer

Abbildung 56 zeigt die Unterschiede zwischen den gefahrenen Manövern auf der Schnellstraße von Fahrer HE und vergleicht diese mit der Dauer der beiden Fahrer im Ortsgebiet aus Abbildung 55. Die orangen Säulen verdeutlichen die Dauer aus Abbildung 55, die grünen Säulen jene der gefahrenen Fahrstreifenwechsel auf der Schnellstraße. Im Diagramm ist zu erkennen, dass die größte Häufigkeit im Ortsgebiet bei 3 Sekunden liegt und auf der Schnellstraße ebenfalls. Die Spanne der im Ort gefahrenen Dauer beträgt 2,25 bis 5,25 Sekunden, die der auf der Schnellstraße gefahrenen Versuche haben eine Spanne von 2 bis 4,75 Sekunden. Es ist zu erkennen, dass sich die Dauer des Fahrstreifenwechsels kaum verändert abhängig vom Geschwindigkeitsbereich. Außerhalb des Ortsgebiets sind die Fahrstreifenwechsel mehrheitlich mit einem Versatz von der halben Breite eines Fahrstreifens durchgeführt worden. In den folgenden Abbildungen wird noch deutlicher, dass die Manöverdauer scheinbar immer in einem Bereich von 2 bis 4 Sekunden zu liegen kommt, außer bei Ausreißern. Der Mittelwert liegt gut abgesichert bei ca. 3 Sekunden. Dabei ist nochmals zu erwähnen, dass dies eine idealisierte Zeitspanne für die Dauer eines Fahrstreifenwechsels ist, siehe Kapitel 6.5.4.

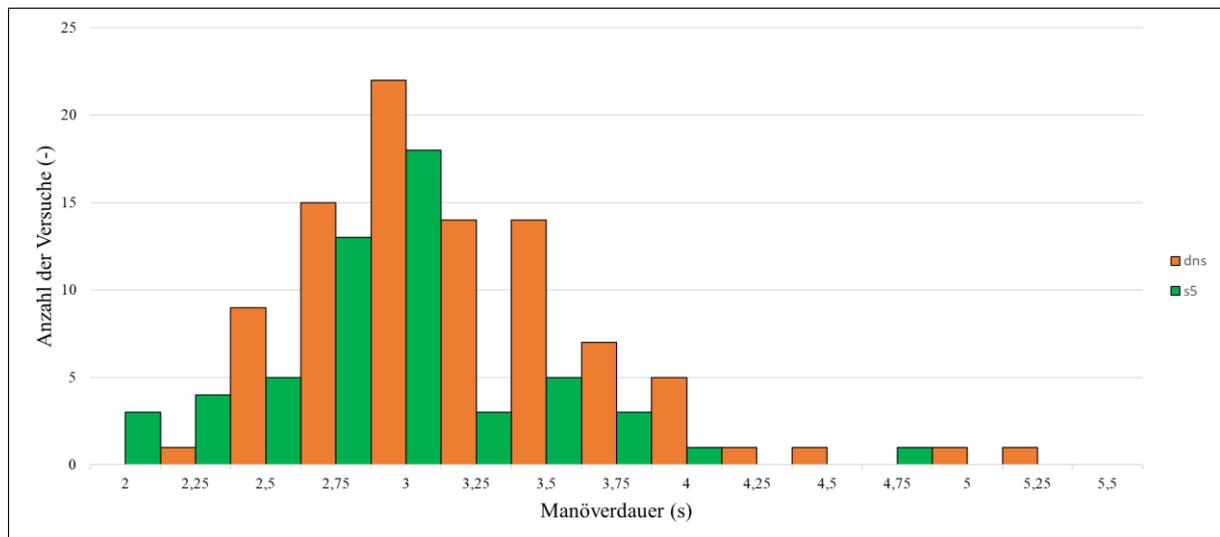


Abbildung 56: Histogramm der Manöverdauer der Geschwindigkeitsbereiche

In Abbildung 57 wird die Häufigkeit der Dauer der Fahrstreifenwechsel nach links bzw. nach rechts unterschieden. Die grauen Säulen verdeutlichen die Werte für den Fahrstreifenwechsel nach rechts, die violetten für jene nach links. Es zeigt sich, dass die größte Anzahl der Dauer, so wie auch die Rollrate und Intensität, wie vorhin beschrieben, beim Fahrstreifenwechsel nach links niedriger liegt als bei jenen nach rechts. Für die Manöver nach rechts wird die größte Häufigkeit bei 3 Sekunden erreicht, bei einer Spanne von 2,25 bis 5 Sekunden. Bei den Fahrstreifenwechseln nach links ergibt sich eine maximale Häufigkeit bei 2,75 Sekunden, bei einer Spanne von 2 bis 5,25 Sekunden. In diesem Diagramm werden alle gefahrenen Versuche betrachtet. Es lässt sich ableiten, dass die Fahrstreifenwechsel nach links etwas schneller durchgeführt werden als jene nach rechts.

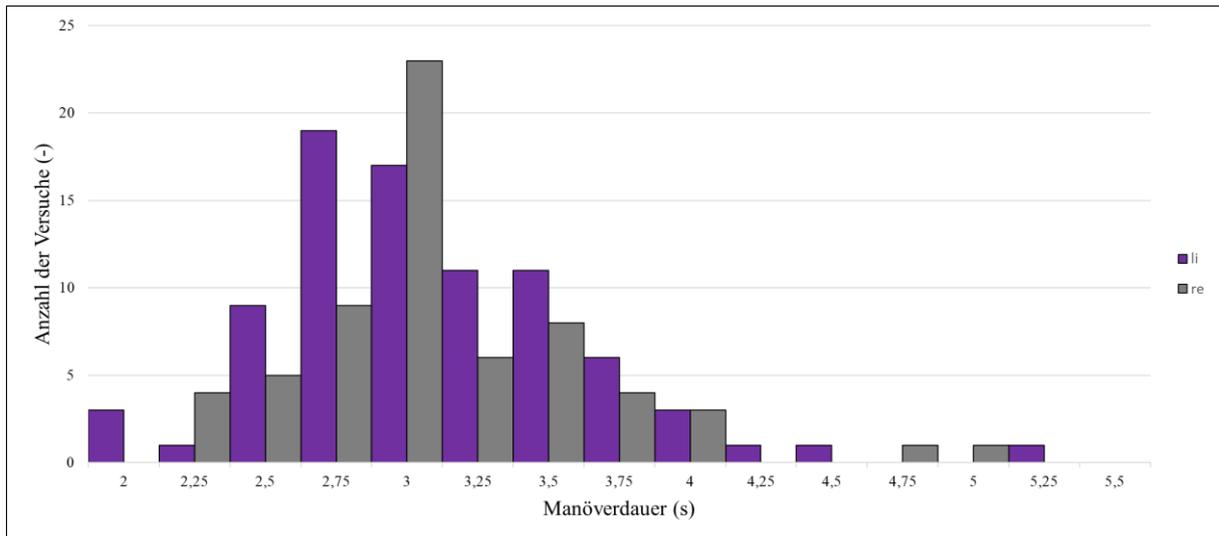


Abbildung 57: Histogramm der Manöverdauer der Manöverrichtung

Abbildung 58 zeigt die Beziehung von Manöverdauer und maximalen Rollwinkel. Man erkennt, dass die linke Seite der Punktwolke von HE, die Rechte von SL ist. Die Messungen auf der Schnellstraße sind über die ganze Punktwolke verstreut, was nochmals verdeutlicht, dass die Manöverdauer für alle durchgeführten Versuche sehr ähnlich ist.

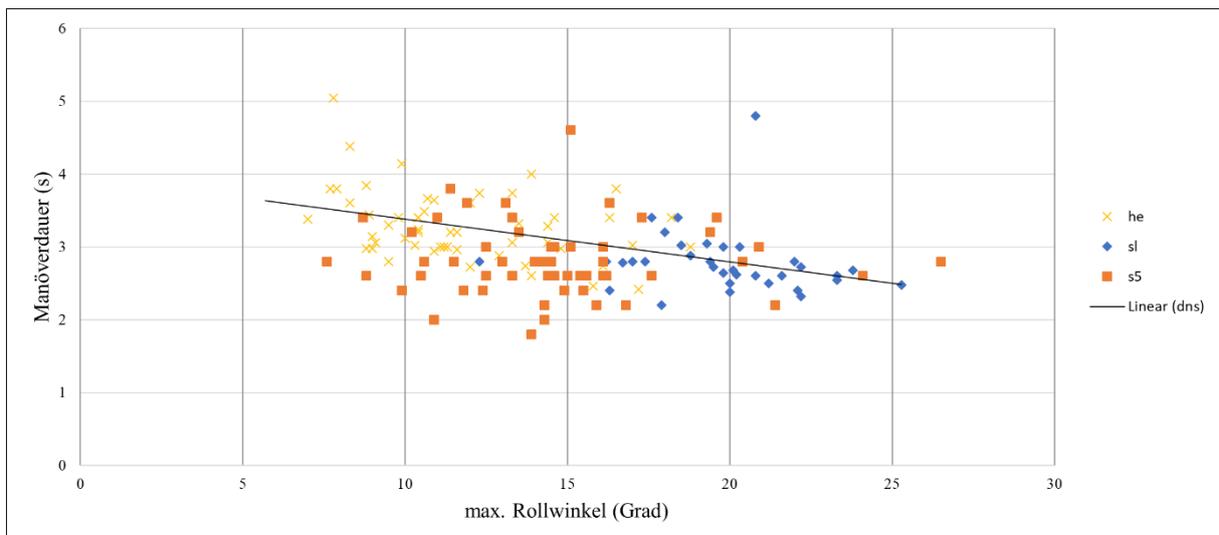


Abbildung 58: Abhängigkeit der Manöverdauer vom Rollwinkel

Abbildung 59 zeigt, dass die Manöverdauer scheinbar linear von der maximalen Rollrate abhängt. Man erkennt, dass die Manöverdauer geringfügig abnimmt, wenn die maximale Rollrate steigt. Wie schon zuvor erwähnt, bewegt sich die Manöverdauer grob zwischen 2 und 4 Sekunden, mit ein paar Ausnahmen bis 5 Sekunden.

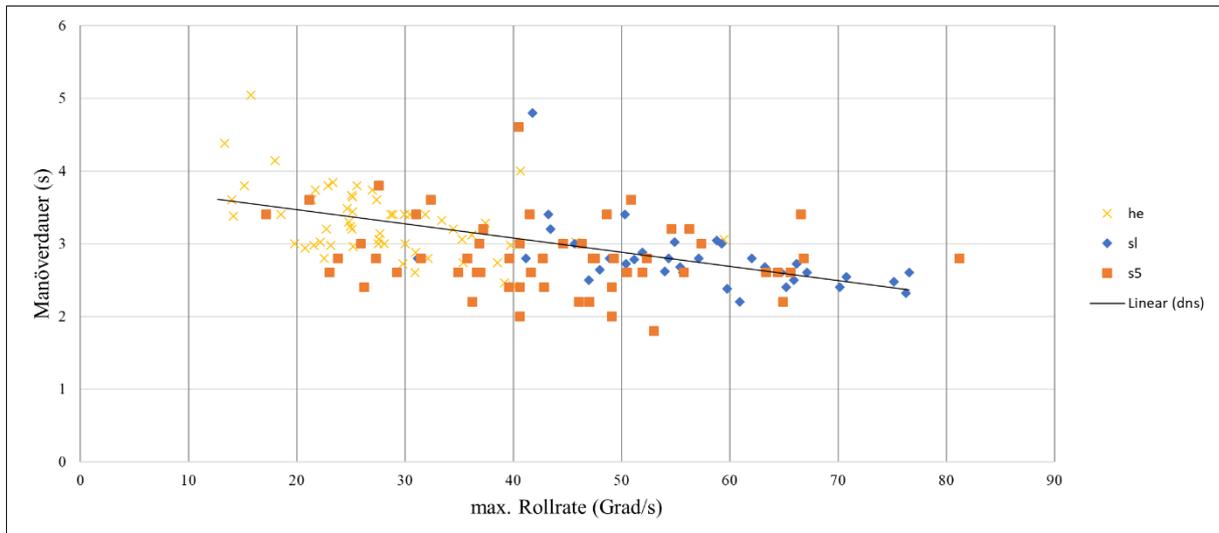


Abbildung 59: Abhängigkeit der Manöverdauer von der Rollrate

Abbildung 60 zeigt, wie die Intensität die Manöverdauer beeinflusst. Die lineare Trendlinie für das Ortsgebiet zeigt eindeutig, dass mit steigender Intensität die Manöverdauer sinkt. Auch die Versuche auf der Schnellstraße liegen im gesamten von den beiden Fahrern abgedeckten Bereich. Zusätzlich ist jedoch anzumerken, dass bei deutlich geringerer Intensität die gleichen oder noch kürzere Zeiten erreicht werden. Dies liegt daran, dass auf der Schnellstraße größtenteils Fahrstreifenwechsel mit einer halben Fahrstreifenbreite Versatz durchgeführt wurden.

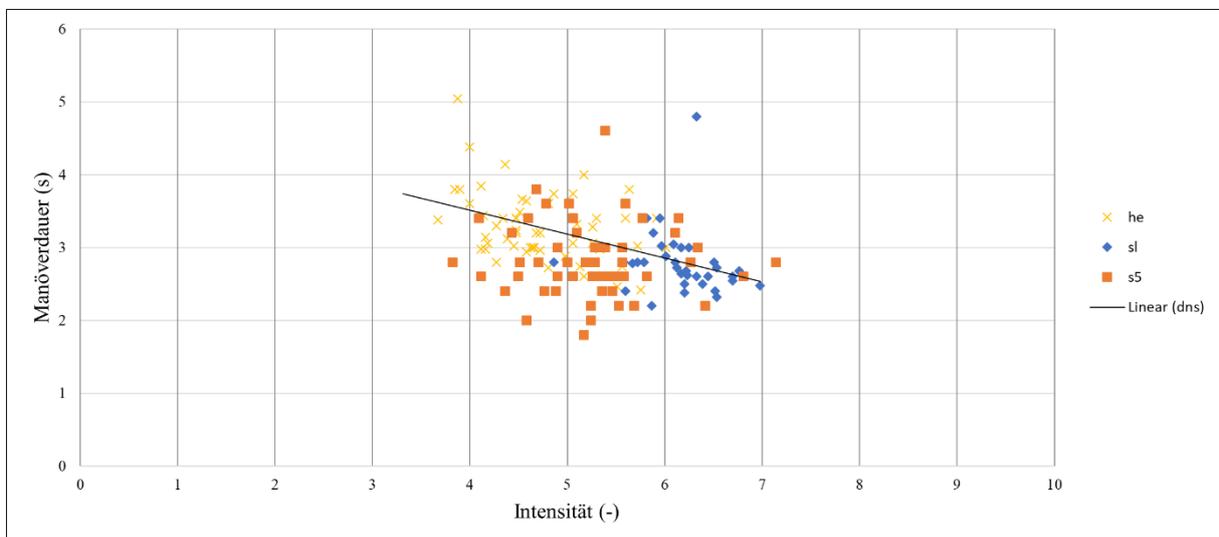


Abbildung 60: Abhängigkeit der Manöverdauer von der Intensität

7.1.6. Die Ergebnisse der Geschwindigkeitsauswertung

In Abbildung 61 wird die Geschwindigkeit aller gefahrener Fahrstreifenwechsel dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Mehrheit der Versuche bei einer Geschwindigkeit von etwa 55 km/h durchgeführt wurde. Weiters zeigt sich, dass auch bei rund 100 km/h mehrere Versuche

stattgefunden haben. Die Geschwindigkeitsspanne der gefahrenen Manöver erstreckt sich von etwa 30 km/h bis zu maximal 118 km/h.

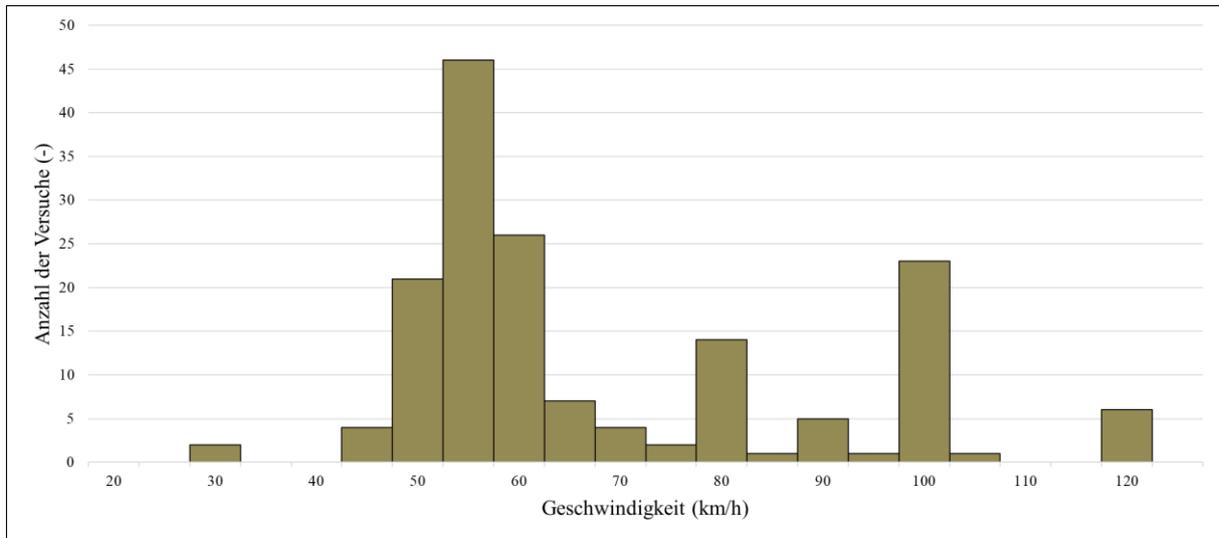


Abbildung 61: Histogramm der Geschwindigkeit

Abbildung 62 zeigt die Abhängigkeit des maximalen Rollwinkels von der gefahrenen Geschwindigkeit. Wie in Kapitel 6.5.3 schon beschrieben ist zu erkennen, dass die erreichten maximalen Rollwinkel über den untersuchten Geschwindigkeitsbereich gleich sind. Daher werden die Parameter in dieser Arbeit als weitgehend unabhängig voneinander angesehen.

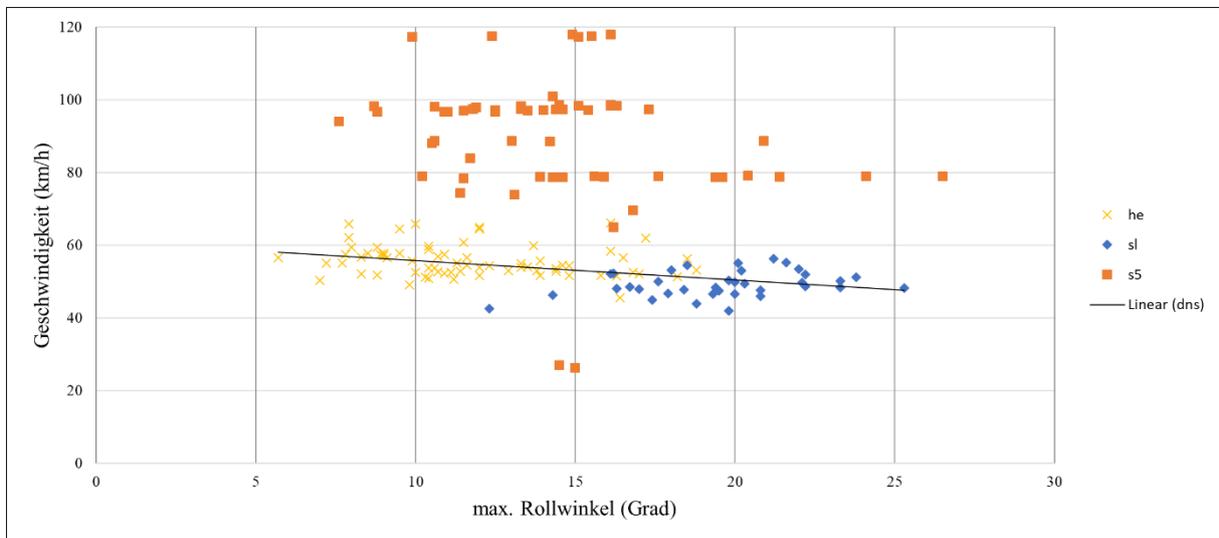


Abbildung 62: Abhängigkeit der Geschwindigkeit vom Rollwinkel

Abbildung 63 zeigt die Beziehung von Geschwindigkeit und maximaler Rollrate. Es ist zu erkennen, dass die maximale Rollrate, wie schon der Rollwinkel, von der Geschwindigkeit weitestgehend unabhängig ist.

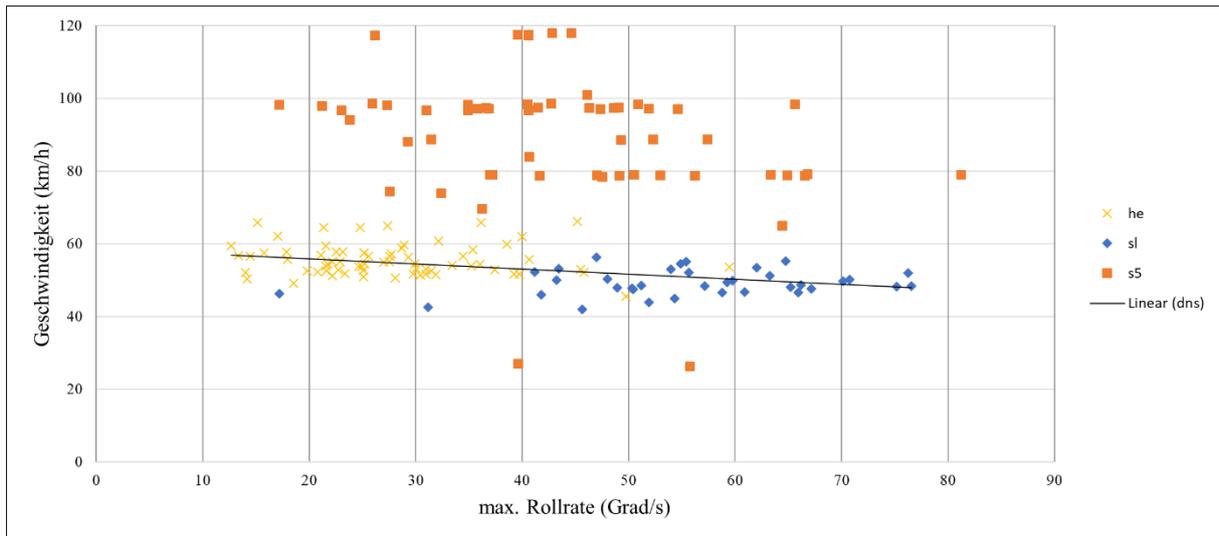


Abbildung 63: Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Rollrate

Abbildung 64 zeigt die Beziehung von Intensität und Geschwindigkeit. Da die Intensität aus dem Rollwinkel errechnet wird und auch per Definition unabhängig von der Geschwindigkeit ist, wird hier nicht näher auf das Diagramm eingegangen.

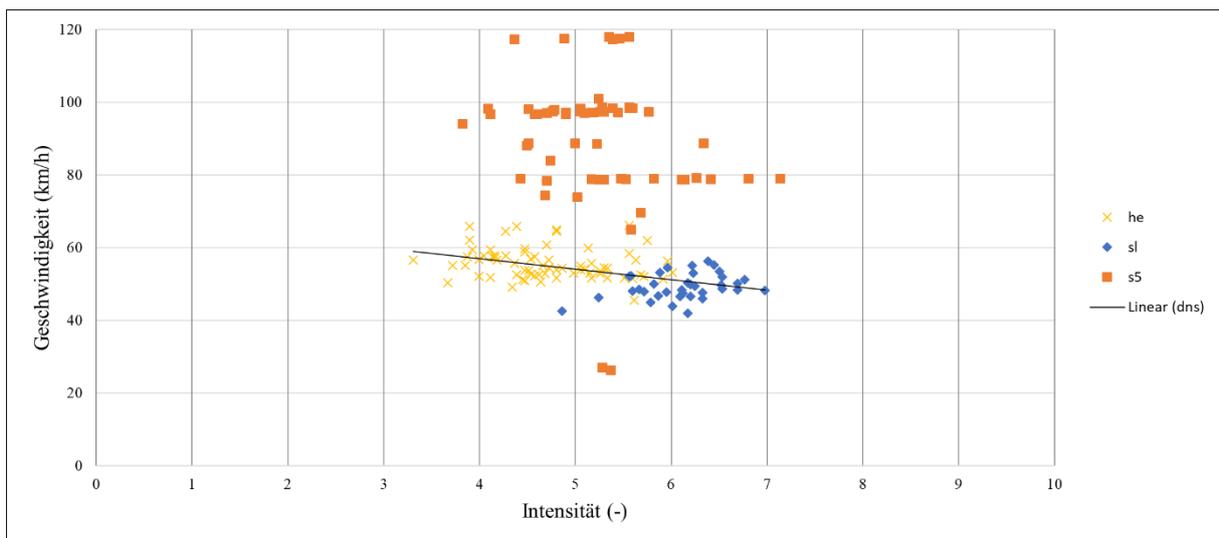


Abbildung 64: Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Intensität

Abbildung 65 zeigt die Abhängigkeit der Manöverdauer von der Geschwindigkeit. Man erkennt, dass die Dauer über den gesamten Geschwindigkeitsbereich bei etwa drei Sekunden liegt. Bei höheren Geschwindigkeiten ist zu erkennen, dass die Zeit tendenziell sinkt. Das liegt daran, dass die meisten Versuche auf der Schnellstraße mit einem Spurversatz von einer halben Fahrstreifenbreite durchgeführt wurden und dabei die benötigte Zeit merklich kürzer ist.

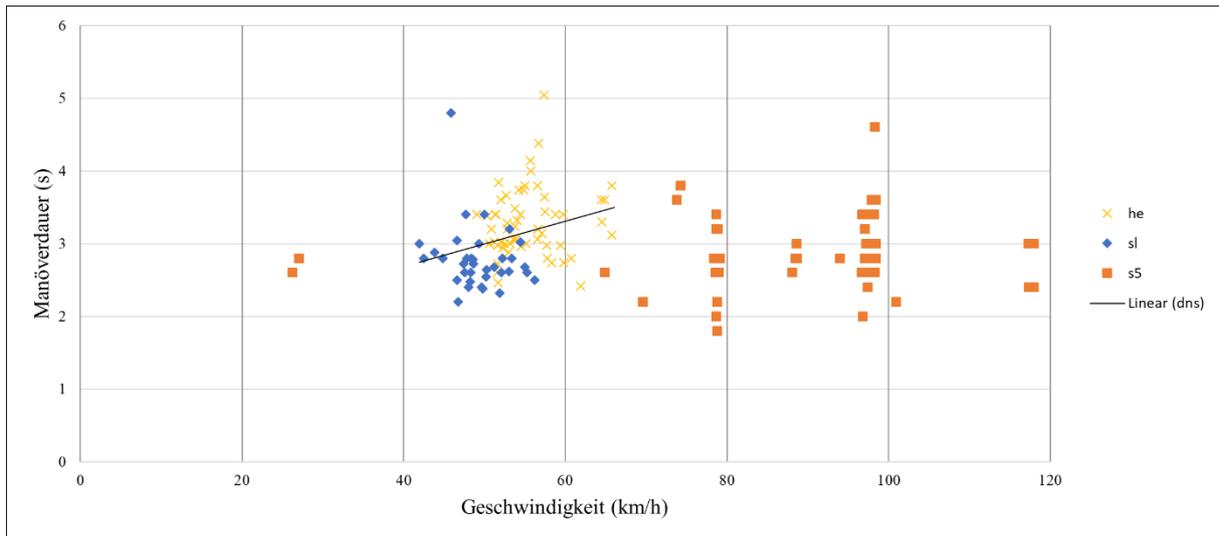


Abbildung 65: Abhängigkeit der Manöverdauer von der Geschwindigkeit

7.1.7. Die Ergebnisse der Versatzbreitenauswertung

Es wurden bei den Versuchen 120 Fahrstreifenwechsel mit einer Versatzbreite von 3,5 m und 43 Fahrstreifenwechsel mit einer halben Fahrstreifenbreite (1,75 m) durchgeführt. Da durch diese beiden fixen Versatzbreiten Streudiagramme nicht zielführend sind, werden in diesem Kapitel die Verteilungen der Parameter für die beiden Versatzbreiten getrennt in Histogrammen dargestellt.

Abbildung 66 zeigt die Verteilung von maximalem Rollwinkel bei den zwei Versatzbreiten. Man erkennt, dass der Großteil der Manöver mit einem halben Fahrstreifen Versatzbreite unter 18 Grad Rollwinkel liegt. Bei den vollen 3,5 m liegen hingegen etwa die Hälfte der Versuche über 18 Grad. Das lässt darauf schließen, dass bei kleinerer Versatzbreite nicht so viel Rollwinkel notwendig bzw. möglich ist, da der gewünschte Versatz früher erreicht ist.

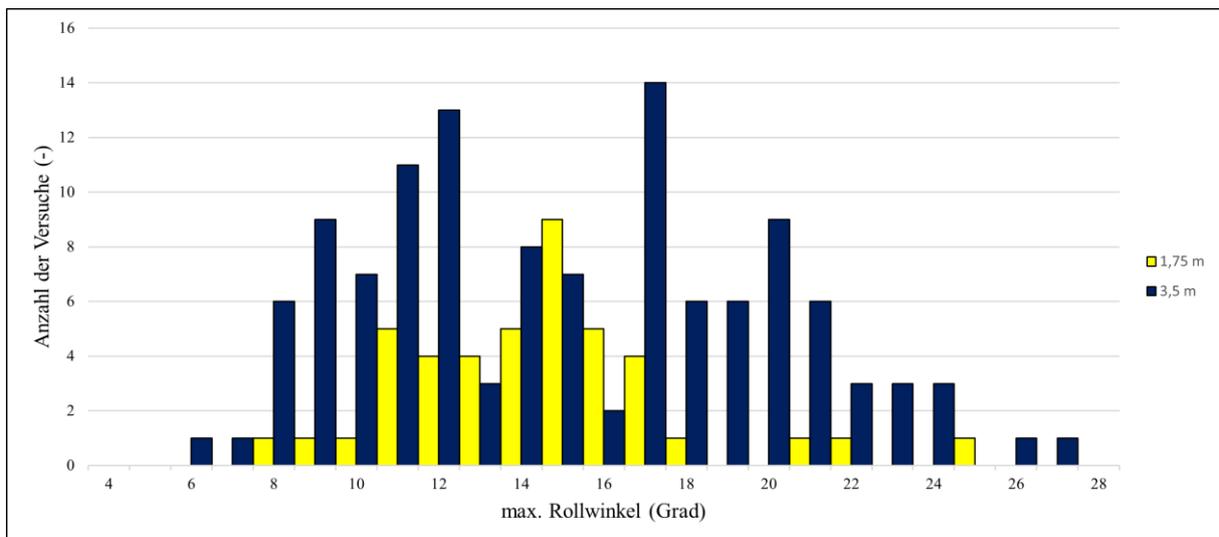


Abbildung 66: Abhängigkeit des Rollwinkels von der Versatzbreite

Abbildung 67 zeigt die Verteilung der maximalen Rollrate bei den beiden Versatzbreiten. Es ist zu erkennen, dass die Spanne bei der halben Versatzbreite etwas geringer ist. Da die höchsten Rollraten von Fahrer SL stammen, er aber keine Manöver mit der halben Versatzbreite absolviert hat, ist es möglich, dass dies nur der Einfluss des Fahrers ist. Es ist davon auszugehen, dass die maximale Rollrate weitgehend unabhängig von der Manöverbreite ist.

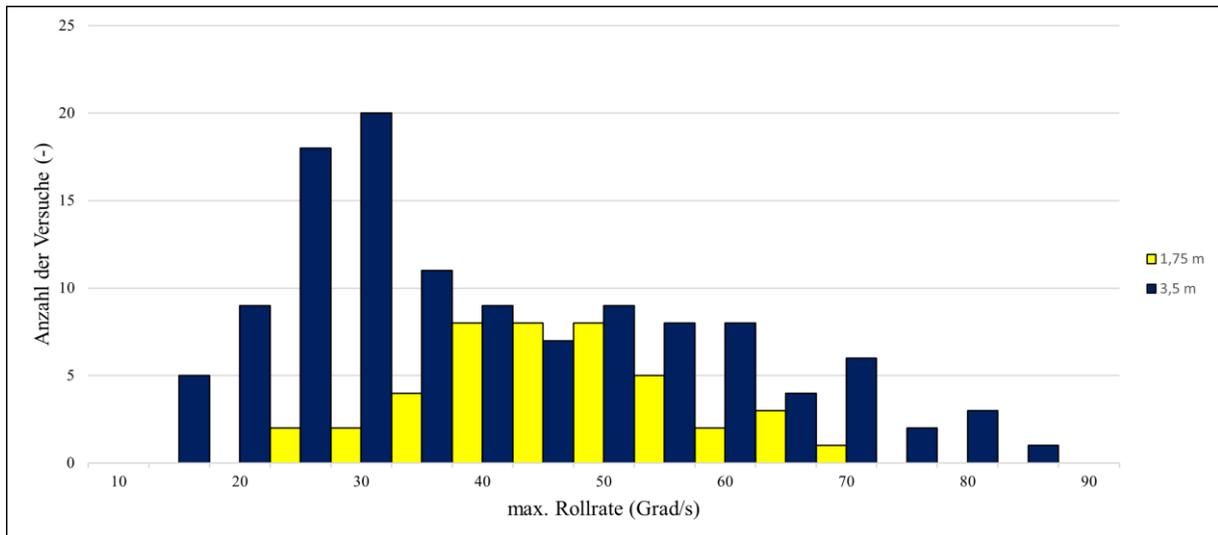


Abbildung 67: Abhängigkeit der Rollrate von der Versatzbreite

Abbildung 68 zeigt die Verteilung der Intensität über den beiden Versatzbreiten. Laut der Definition ist die Intensität unabhängig von der Versatzbreite. Dies ist auch im Diagramm gut zu erkennen, da bei beiden Manöverbreiten die gleiche Spanne an Intensitätswerten erreicht wurde. Die zwei Spitzen in der Verteilung bei 3,5 m liegen an den unterschiedlichen Intensitätsbereichen der beiden Fahrer.

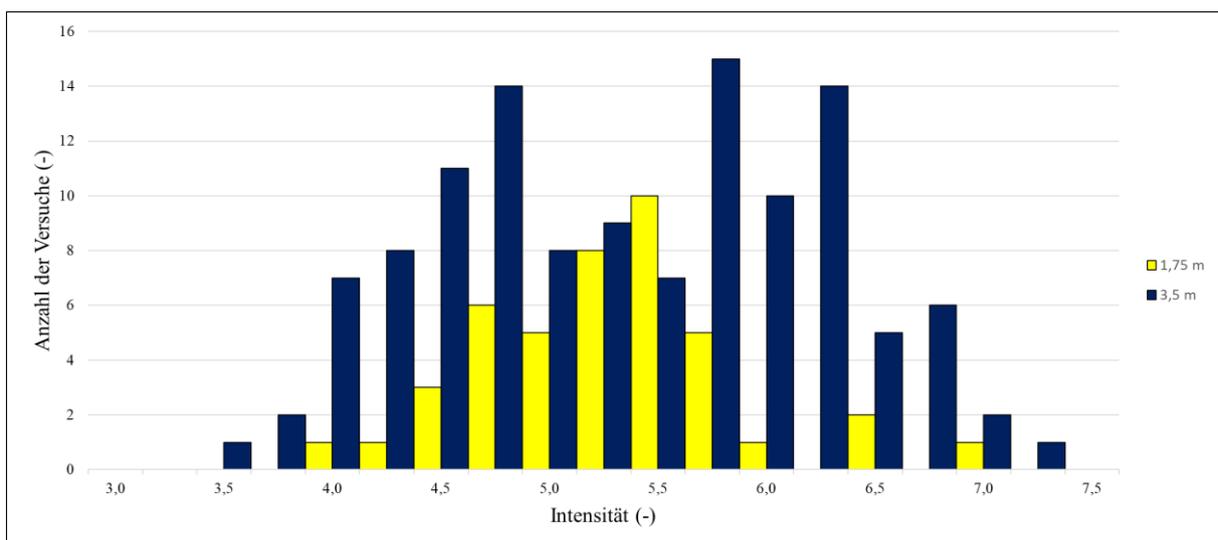


Abbildung 68: Abhängigkeit der Intensität von der Versatzbreite

Abbildung 69 zeigt die Verteilung der Manöverdauer der beiden Versatzbreiten. Man erkennt, dass bei der halben Versatzbreite deutlich kürzere Zeiten erreicht werden. Das liegt vor allem

daran, dass bei einem ähnlichen Rollwinkel der gewünschte Versatz früher erreicht wird. Daraus folgt, dass die Versatzbreite der größte Einflussfaktor für die Dauer eines Fahrstreifenwechsels ist.

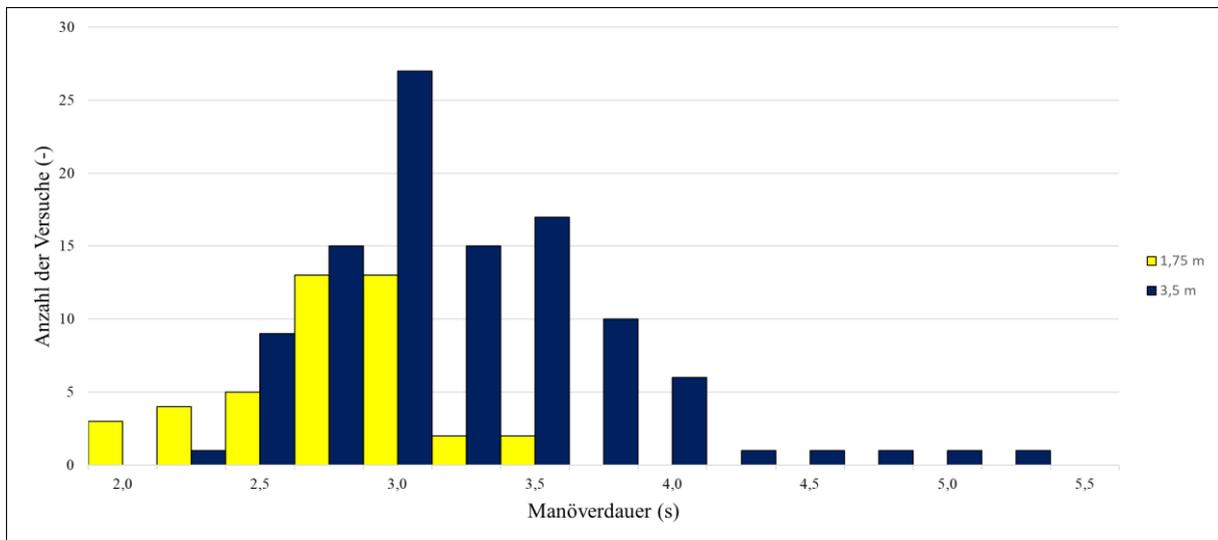


Abbildung 69: Abhängigkeit der Manöverdauer von der Versatzbreite

In Abbildung 70 ist die Verteilung der beiden Versatzbreiten über der Geschwindigkeit dargestellt. Man erkennt, dass bei den Fahrten auf der Doktor-Nekowitsch-Straße nur Manöver mit einem Versatz von einer vollen Fahrstreifenbreite durchgeführt wurden. Die Versuche mit dem halben Versatz wurden nur im Zuge der Fahrten auf der Schnellstraße durchgeführt. Der Versuch mit etwa 30 km/h fand auf einem Rastplatz in der Nähe der Schnellstraße statt.

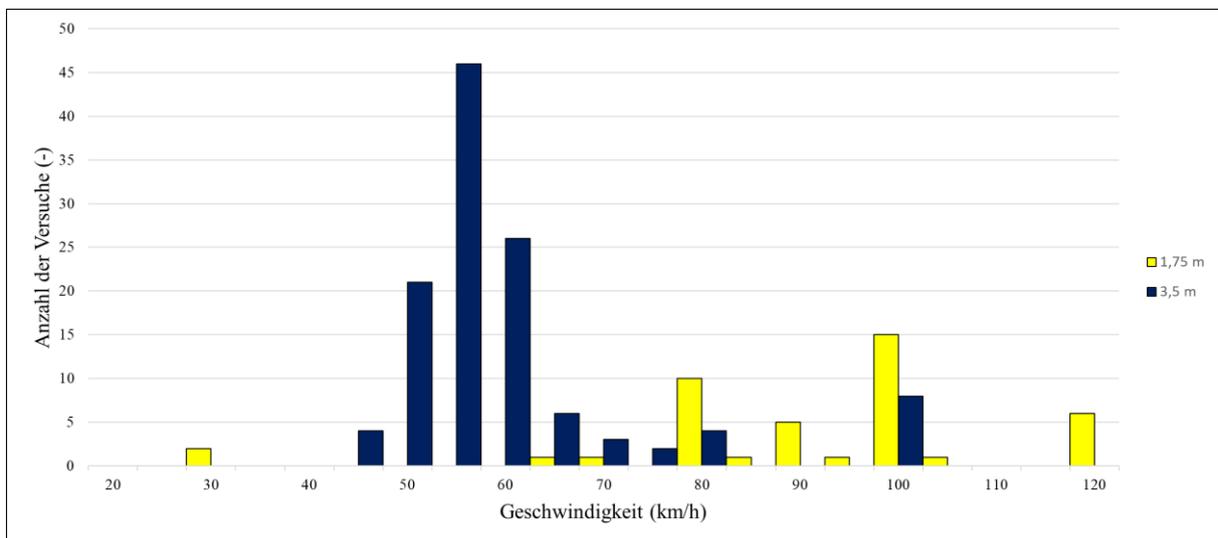


Abbildung 70: Abhängigkeit der Versatzbreite von der Geschwindigkeit

7.1.8. Die Ergebnisse der Lenkwinkelauswertung

In den nachfolgenden Abbildungen werden verschiedene Daten bezüglich des Lenkwinkels gegenübergestellt und zum Vergleich gebracht. Diese Daten sind ausschließlich für die

Versuchsfahrten im Ortsgebiet verfügbar, da sie bei den Manövern auf der Schnellstraße nicht gemessen wurden. Der verwendete Wert ist der zweite auftretende Extremwert. Dieser ist in Kapitel 6.5.7 genauer beschrieben. In Abbildung 71 wird der Lenkwinkel der beiden Fahrer HE und SL im Ortsgebiet vergleichend gegenübergestellt. Die blauen Säulen beschreiben den Lenkwinkel des Fahrers HE und zeigen maximale Häufigkeiten bei 1 bis 1,5 Grad, bei einer Spanne von 0,25 bis 3 Grad. Die rot gefärbten Säulen stehen für den Lenkwinkel des Fahrers SL und zeigen zwei Maxima bei 2,75 Grad und 3,25 Grad. Die Spanne beträgt in diesem Fall 1,5 bis 4,5 Grad. Es zeigt sich, dass der Fahrer SL deutlich aggressiver einlenkt als der Fahrer HE und dabei auch einen höheren Lenkwinkel erreicht.

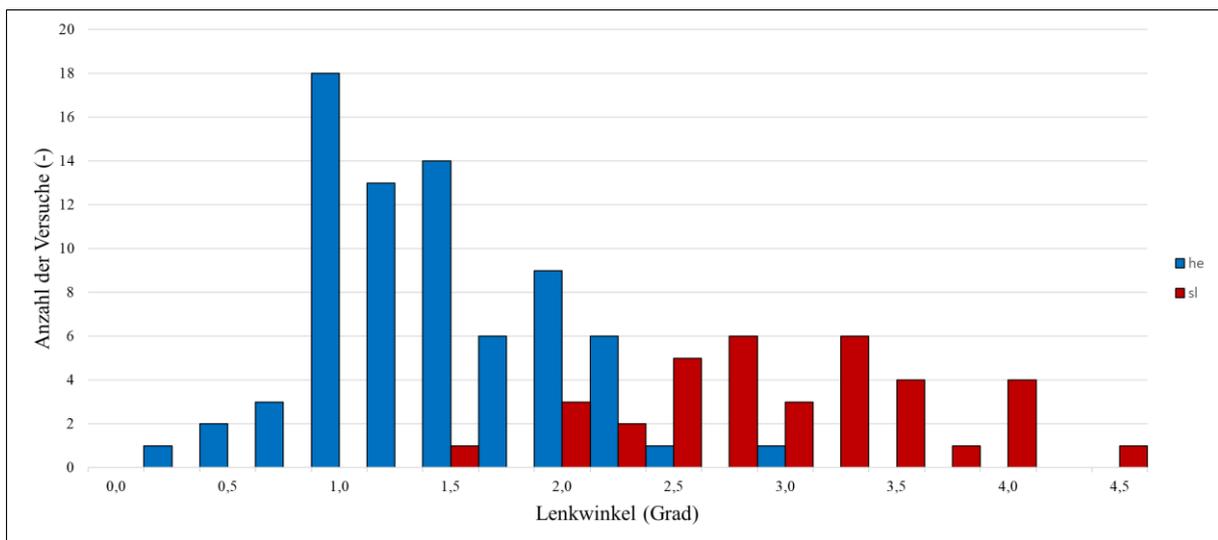


Abbildung 71: Histogramm des Lenkwinkels der Fahrer

In folgender Abbildung 72 wird dargestellt, wie sich der Lenkwinkel im Vergleich zur Lenkrichtung verhält. Dabei wurden sowohl die Versuchsfahrten von Fahrer HE als auch des Fahrers SL berücksichtigt. Die in violett gefärbten Säulen zeigen den Lenkwinkel der links gefahrenen Manöver. Es werden zwei Maximalwerte ersichtlich. Der erste Wert liegt bei 1 Grad, der zweite Wert bei 2 Grad. Die Spanne für die nach links gefahrenen Manöver liegt zwischen 0,75 Grad und 4,5 Grad. Die grauen Säulen verdeutlichen den Lenkwinkel der nach rechts gefahrenen Fahrstreifenwechsel und zeigen eine maximale Häufigkeit bei 1 Grad. Die Gesamtspanne beginnt bei 0,25 Grad und endet bei 3,5 Grad.

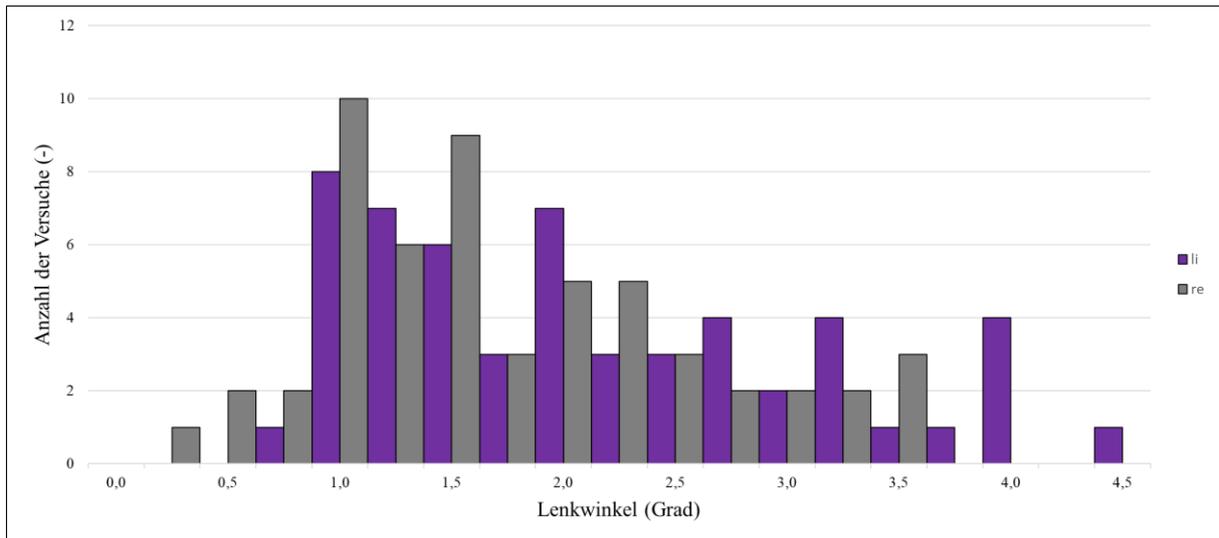


Abbildung 72: Histogramm des Lenkwinkels der Manöverrichtung

Abbildung 73 zeigt die Abhängigkeit von Lenkwinkel und maximalem Rollwinkel. Man erkennt, dass der Rollwinkel stark vom Lenkwinkel abhängt. Im folgenden Absatz ist genauer erklärt, wieso diese Beziehung für den Fahrstreifenwechsel so wichtig ist.

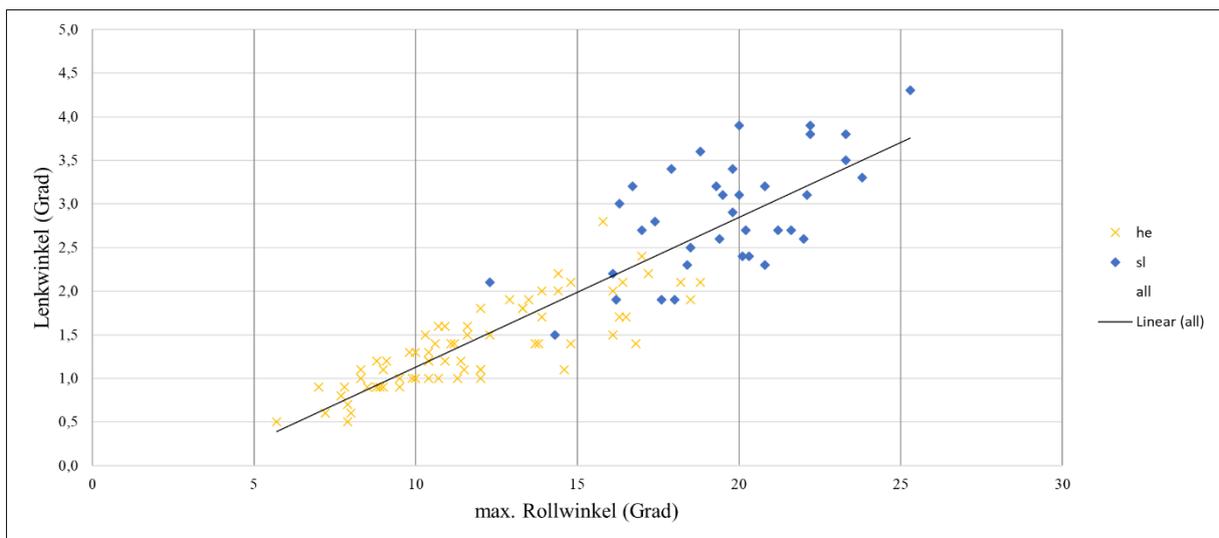


Abbildung 73: Abhängigkeit des Lenkwinkels vom Rollwinkel

Abbildung 74 zeigt die Beziehung von Lenkwinkel und maximaler Rollrate. Man erkennt, dass die Rollrate stark vom Lenkwinkel abhängt. Dies liegt daran, dass der Lenkwinkel bzw. vielmehr das Lenkmoment die Rollrate vorgibt. Je größer das Lenkmoment bzw. der Lenkwinkel, desto größer der Anstieg der Rollrate, desto höher auch die Intensität und der maximale Rollwinkel.

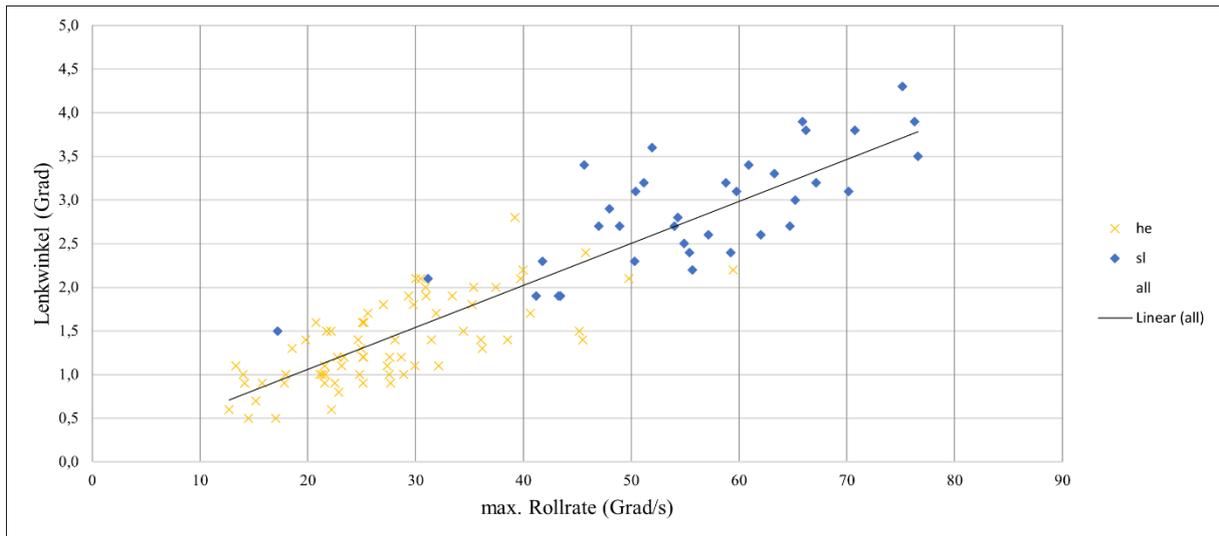


Abbildung 74: Abhängigkeit des Lenkwinkels von der Rollrate

Abbildung 75 zeigt, wie der Lenkwinkel von der Intensität des Fahrers abhängt. Es ist zu erkennen, dass für das Erreichen höherer Intensität ein größerer Lenkwinkel notwendig ist.

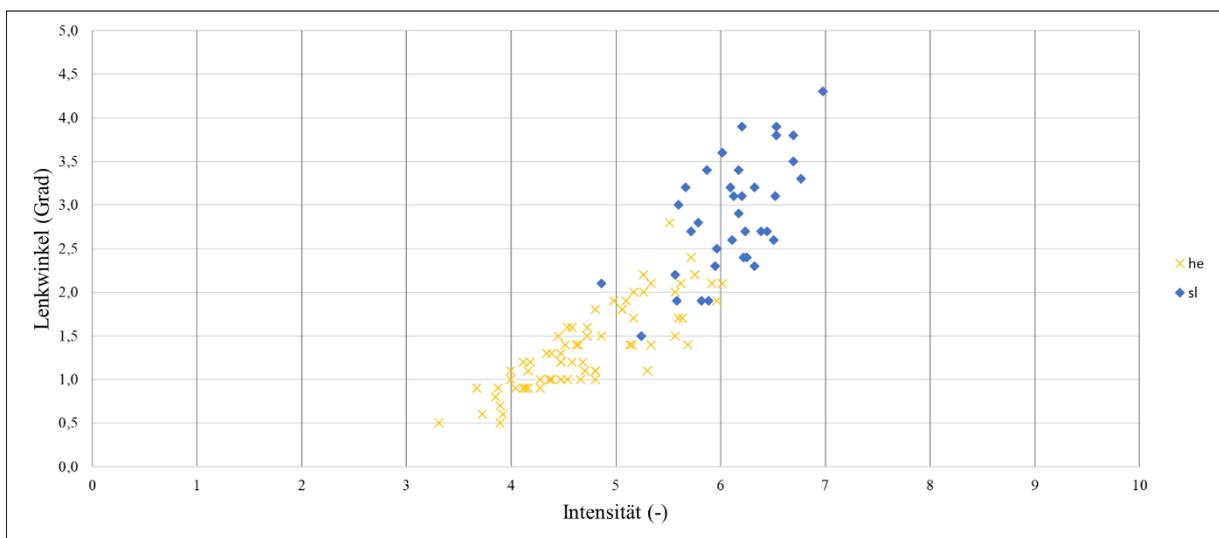


Abbildung 75: Abhängigkeit des Lenkwinkels von der Intensität

Abbildung 76 zeigt die Abhängigkeit von Manöverdauer und Lenkwinkel. Eine nahezu lineare Beziehung der beiden Parameter, jedoch mit deutlicher Streuung, wird sichtbar.

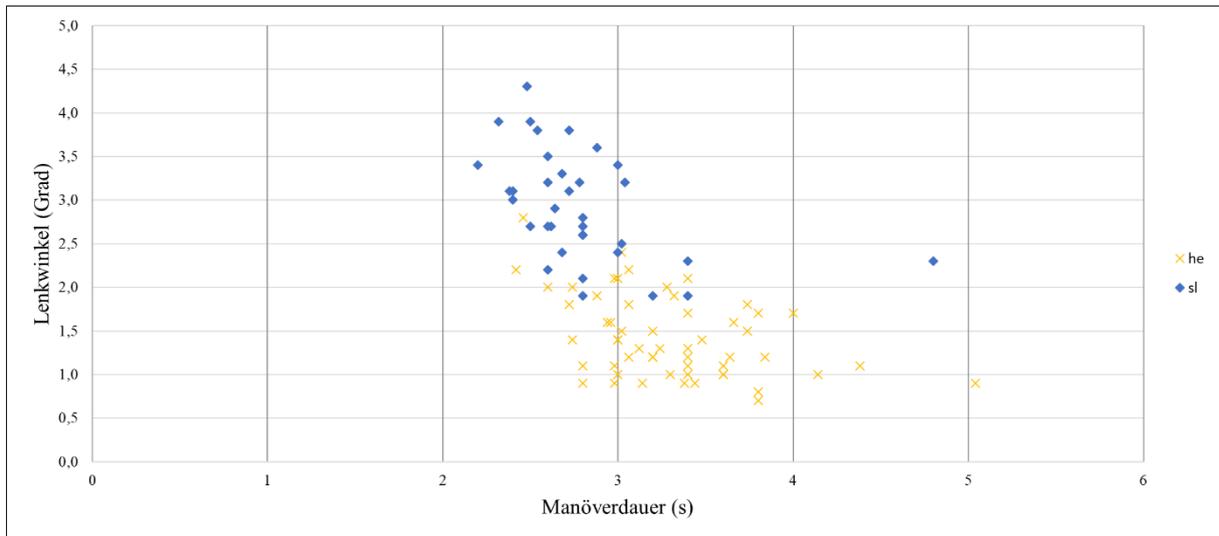


Abbildung 76: Abhängigkeit des Lenkwinkels von der Manöverdauer

Abbildung 77 zeigt die Beziehung von Lenkwinkel zu Fahrgeschwindigkeit. Es gibt eine erkennbare Tendenz, dass bei steigender Geschwindigkeit niedrigere Lenkwinkel benutzt werden. Allerdings entsteht diese Tendenz dadurch, dass Fahrer SL die Fahrstreifenwechsel generell bei etwas langsamerer Geschwindigkeit durchgeführt hat als Fahrer HE. Dabei hat Fahrer SL immer höhere Lenkwinkel als HE erreicht, wodurch nun in diesem Diagramm der zuvor genannte Eindruck entsteht. Dies wird zusätzlich verschärft dadurch, dass keine Messwerte für die Fahrten bei höheren Geschwindigkeiten vorhanden sind.

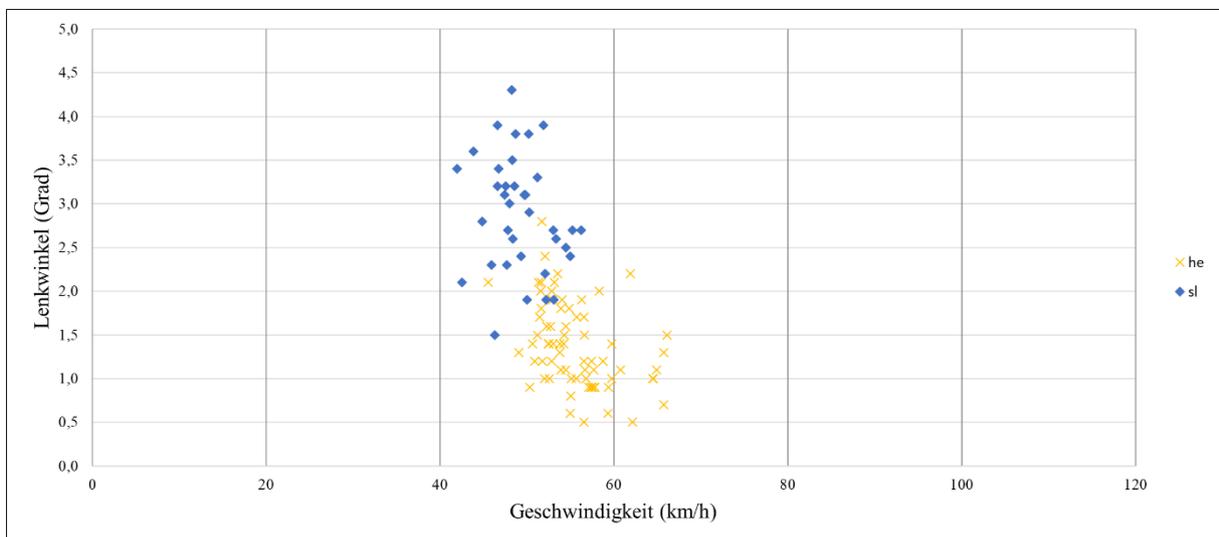


Abbildung 77: Abhängigkeit des Lenkwinkels von der Geschwindigkeit

Für den Lenkwinkel über Versatzbreite gibt es keine Abbildung, da die halbe Spurversatzbreite nur auf der Schnellstraße getestet und dabei die Messwerte des Lenkwinkelsensors nicht aufgezeichnet wurden.

7.1.9. Die Ergebnisse der Gierratenauswertung

Abbildung 78 beschreibt die maximale Gierrate für die Versuche im Ortsgebiet. Der gewählte Wert ist der erste auftretende Extremwert des Verlaufs, welcher in Kapitel 6.5.8 genauer beschrieben ist. Die blauen Säulen visualisieren die maximale Gierrate von Fahrer HE und die roten Säulen die maximale Gierrate der Versuche, welche von Fahrer SL gefahren wurden. In der Abbildung zeigt sich, dass der Fahrer HE die größte Häufigkeit bei einer maximalen Gierrate von 10 Grad/s hat, bei einer Spanne von 0 bis 20 Grad/s. Der Fahrer SL erreicht bei den meisten Manövern eine maximale Gierrate von 22 Grad/s, bei einer Spanne von 9 bis 33 Grad/s. Das Diagramm verdeutlicht, dass der Fahrer HE die Drehung um die Hochachse langsamer durchführt als Fahrer SL, welcher durchschnittlich deutlich höhere Werte erreicht.

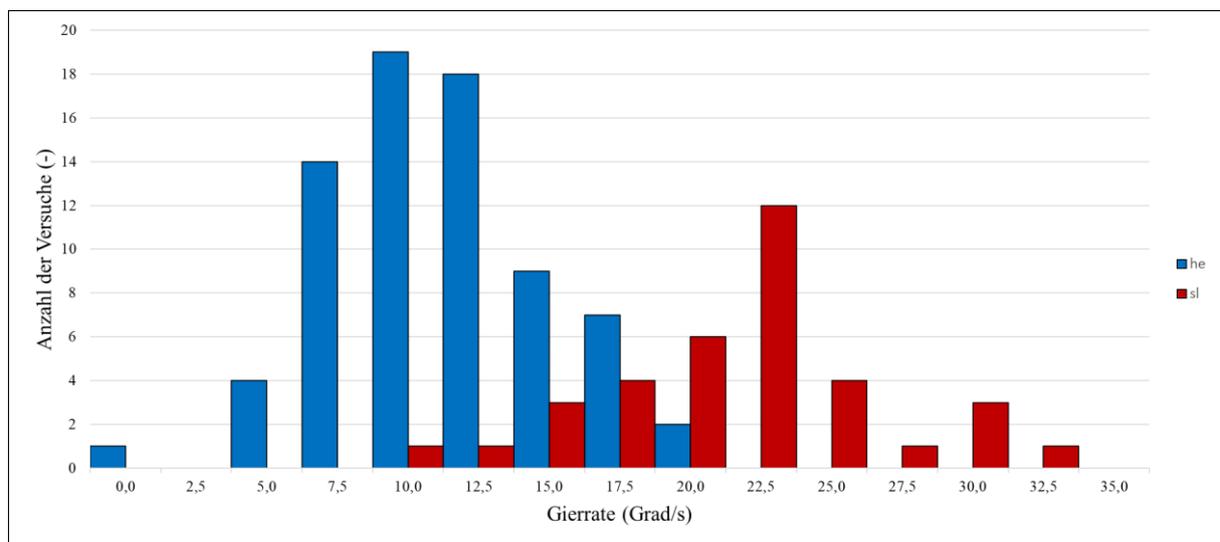


Abbildung 78: Histogramm der Gierrate der Fahrer

In Abbildung 79 werden die unterschiedlichen Gierraten der gefahrenen Versuche auf der Schnellstraße von Fahrer HE mit denen der von beiden Fahrern im Ortsgebiet gefahrenen Versuchen aus Abbildung 78, verglichen. Die grünen Säulen zeigen die maximale Gierrate der Versuche, welche auf der S5 durchgeführt wurden. Die orangen Säulen beschreiben die gemeinsamen Gierraten der beiden Fahrer aus Abbildung 78. Im Diagramm ist zu erkennen, dass bei den Versuchen, welche im höheren Geschwindigkeitsbereich durchgeführt wurden, die maximale Gierrate zwischen 0 und 10 Grad/s liegt. Bei den meisten Versuchen wurden jedoch nur 2 Grad/s erreicht. Im Ortsgebiet wird eine Spanne von 0 bis 32,5 Grad/s erreicht, wobei der Maximalwert bei 10 Grad/s liegt.

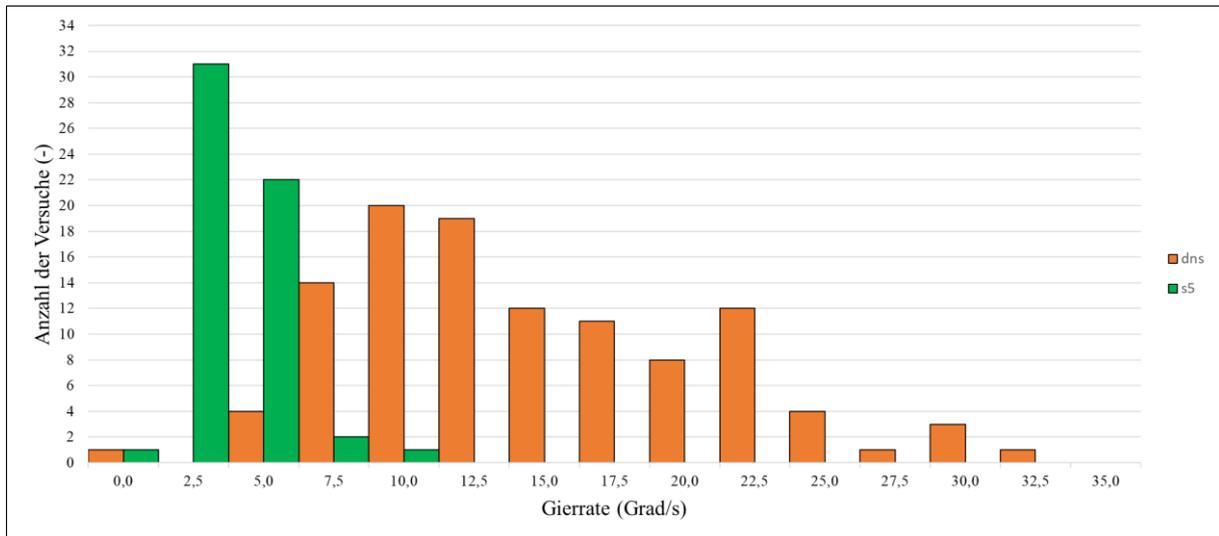


Abbildung 79: Histogramm der Gierrate der Geschwindigkeitsbereiche

In Abbildung 80 ist die Verteilung der maximalen Gierrate getrennt nach der Richtung des Fahrstreifenwechsels dargestellt. Die violetten Säulen stellen die Versuche nach links, die grauen die Versuche nach rechts dar. Man erkennt, dass die Verteilung ähnlich ist. Die größte Häufigkeit tritt bei 2,5 Grad/s bei den Manövern nach links und bei 5 Grad/s bei jenen nach rechts auf. Die Spanne beginnt bei beiden Richtungen bei 0 Grad/s und endet bei 25 Grad/s (rechts) bzw. 32,5 Grad/s (links).

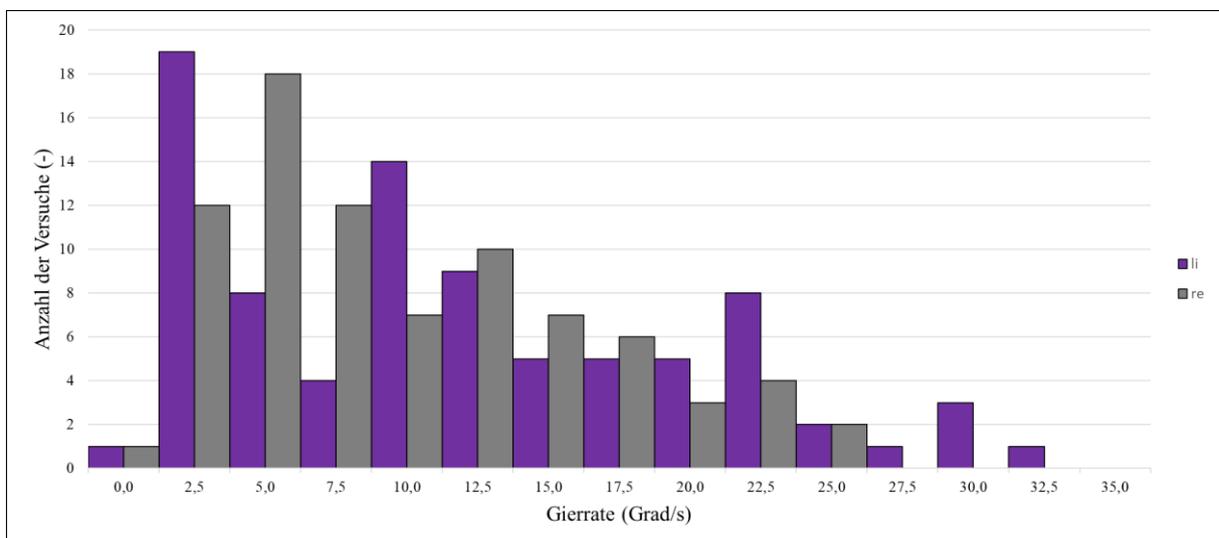


Abbildung 80: Histogramm der Gierrate der Manöverrichtung

Abbildung 81 zeigt die Abhängigkeit der maximalen Gierrate vom maximalen Rollwinkel. Für das Ortsgebiet ist zu erkennen, dass sich eine annähernd lineare Beziehung zeigt. Bei den Versuchen auf der Schnellstraße zeigt sich jedoch, dass diese Messpunkte nicht im selben Bereich liegen. Anhand der Beziehung zwischen Gierrate und Lenkwinkel (siehe Abbildung 87) lässt sich vermuten, dass dies daran liegt, dass bei höheren Geschwindigkeiten weniger Lenkwinkel für die gleiche Rollrate benötigt wird und weniger Lenkwinkel bedeutet auch weniger Gierrate.

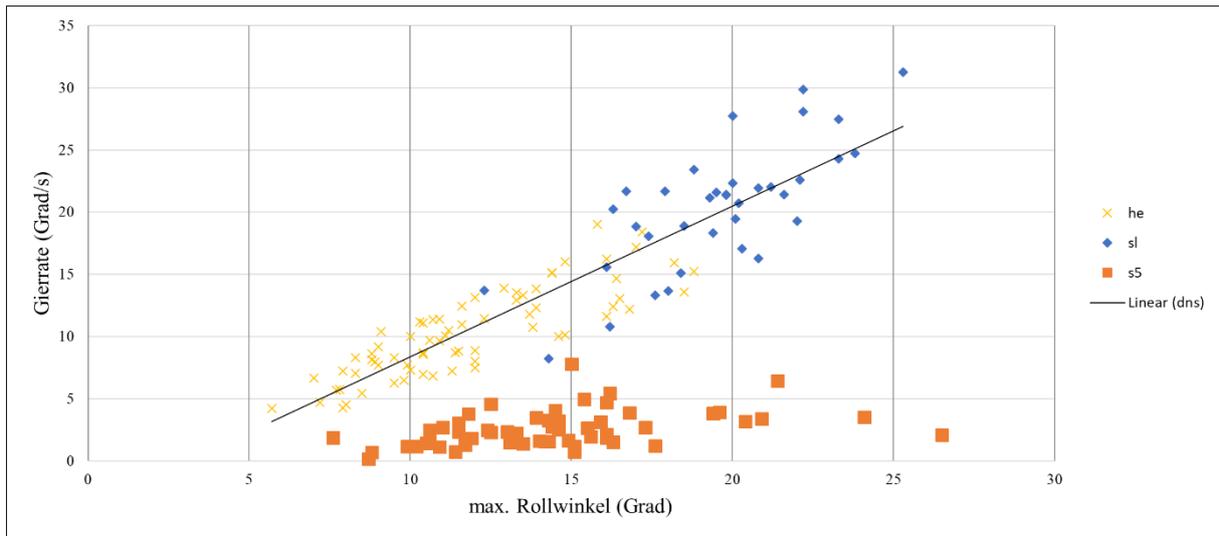


Abbildung 81: Abhängigkeit der Gierrate vom Rollwinkel

Abbildung 82 zeigt die Beziehung von Gierrate und Rollrate und stellt eine ähnliche Verteilung wie zuvor beim Rollwinkel dar.

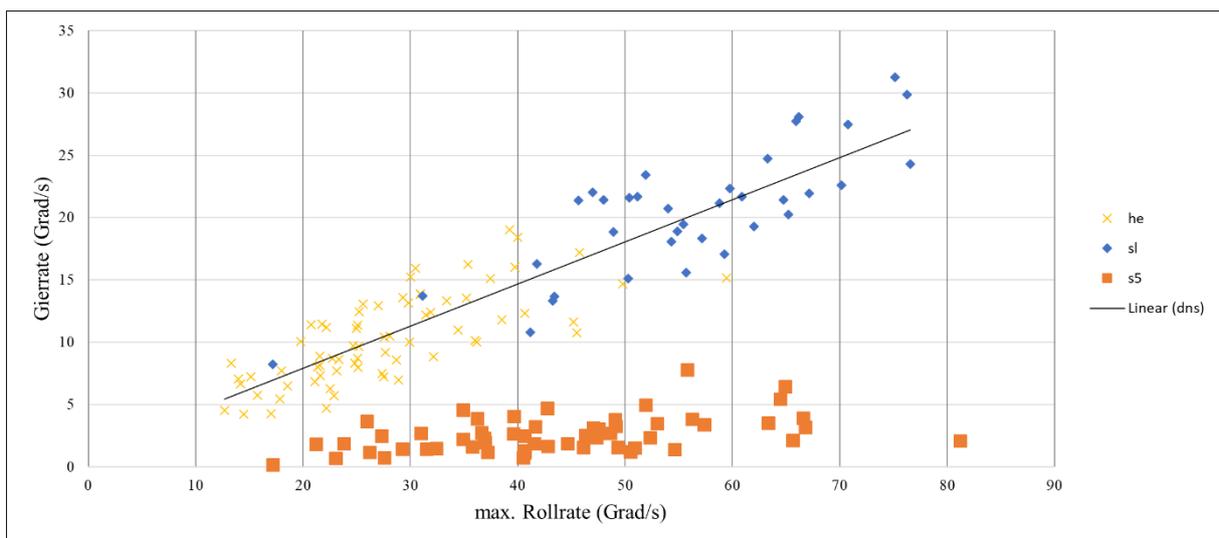


Abbildung 82: Abhängigkeit der Gierrate von der Rollrate

Abbildung 83 zeigt die Abhängigkeit von Intensität und Gierrate. Auch hier zeigt sich eine ähnliche Beziehung wie beim Rollwinkel.

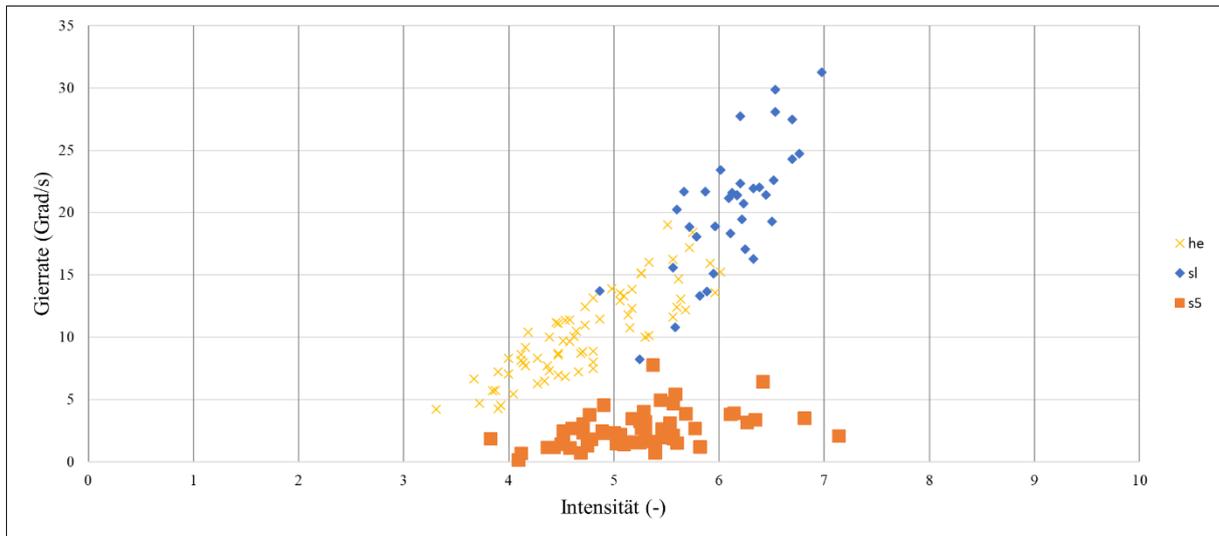


Abbildung 83: Abhängigkeit der Gierrate von der Intensität

Abbildung 84 zeigt die Beziehung von Gierrate und Manöverzeit. Man erkennt, dass im Ortsgebiet ein ähnlicher Zusammenhang besteht, wie zwischen Lenkwinkel und Manöverzeit. Es zeigt sich aber erneut, dass höhere Geschwindigkeiten bei der Gierrate dazu führen, dass die Messpunkte sehr deutlich von denen im Ortsgebiet abweichen.

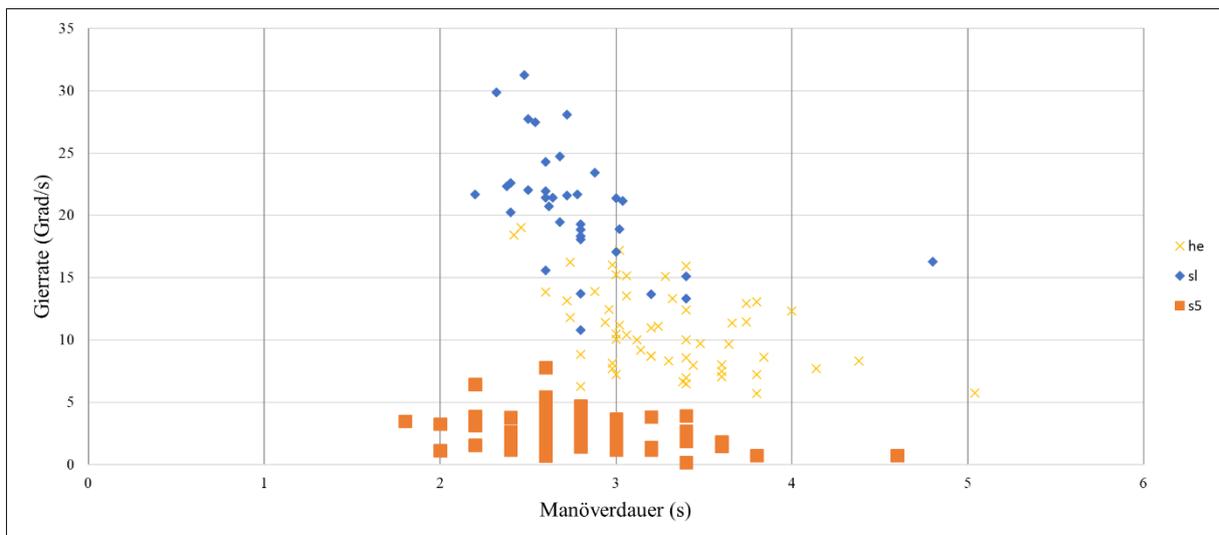


Abbildung 84: Abhängigkeit der Gierrate von der Manöverzeit

Abbildung 85 zeigt die Abhängigkeit der maximalen Gierrate von der Fahrgeschwindigkeit. Man erkennt, dass im Ortsgebiet die maximale Gierrate kaum von der Geschwindigkeit abhängt. Allerdings zeigt sich anhand der Daten der Messungen auf der Schnellstraße sehr deutlich, dass mit steigender Geschwindigkeit die maximale Gierrate stark abnimmt und weniger Einfluss auf das Manöver hat.

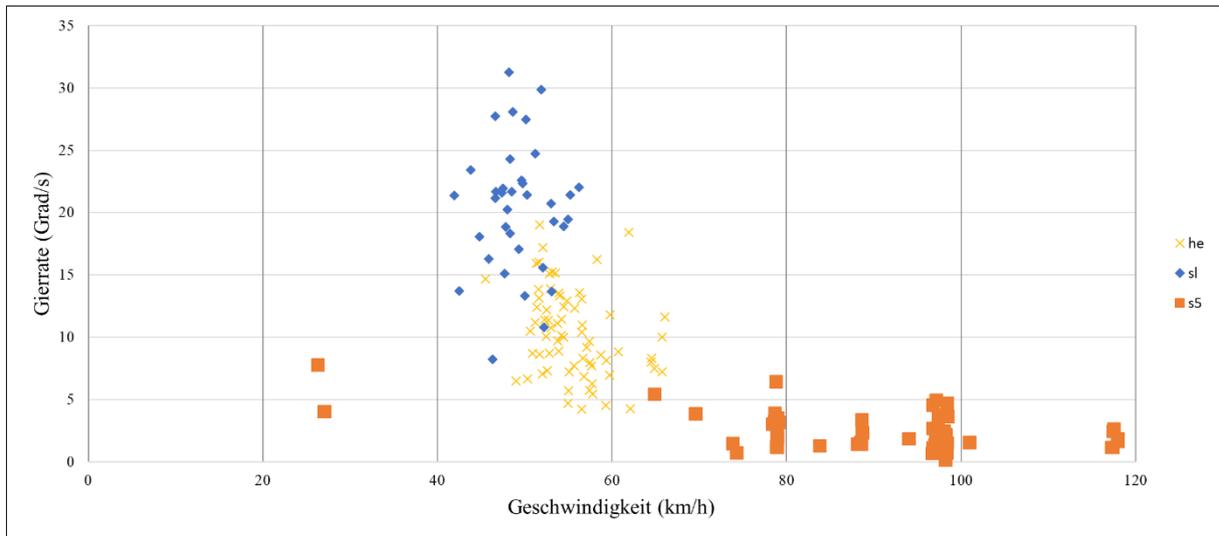


Abbildung 85: Abhängigkeit der Gierrate von der Geschwindigkeit

Abbildung 86 zeigt die Verteilung der Gierrate bei den beiden Versatzbreiten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Gierrate bei den Versuchen über eine volle Fahrstreifenbreite einen viel größeren Bereich abdeckt, was jedoch nur an den Manövern im Ortsgebiet liegt. Man sieht in Abbildung 85, dass bei allen Versuchen auf der Schnellstraße keine größeren Gierraten erreicht werden als beim halben Versatz.

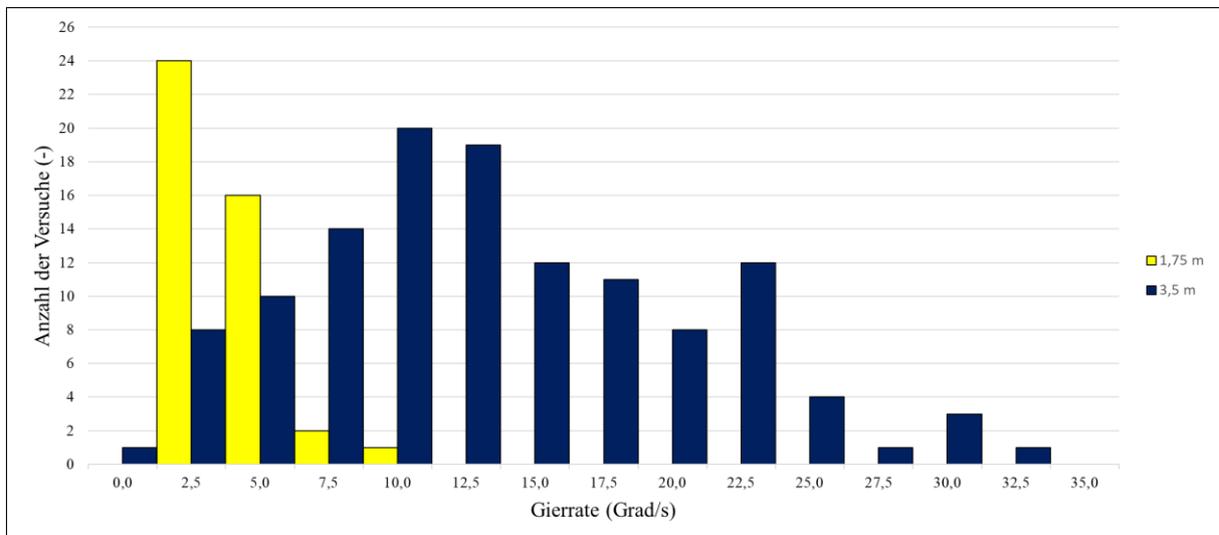


Abbildung 86: Abhängigkeit der Gierrate von der Versatzbreite

Abbildung 87 zeigt eindrucksvoll den linearen Zusammenhang von Gierrate und Lenkwinkel. Leider gibt es keine Messungen im höheren Geschwindigkeitsbereich, welche die Änderung der Abhängigkeit der Gierrate vom Lenkwinkel bei verschiedenen Geschwindigkeiten beschreiben würde.

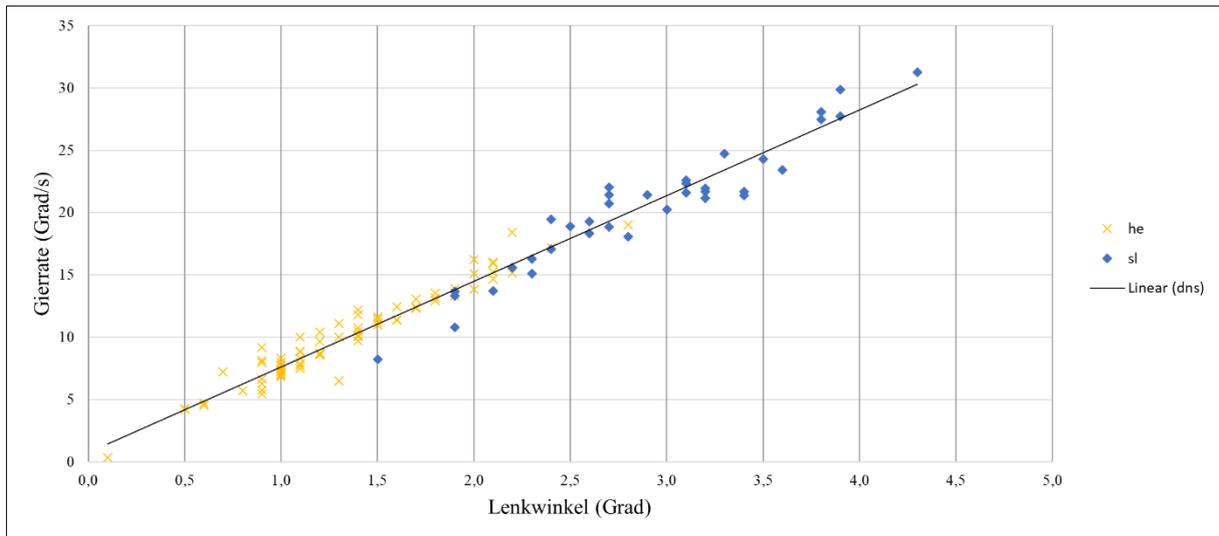


Abbildung 87: Abhängigkeit der Gierrate vom Lenkwinkel

7.1.10. Die Ergebnisse der Querbeschleunigungsauswertung

Abbildung 88 beschreibt die maximale Querbeschleunigung, welche bei den Versuchen im Stadtgebiet gemessen wurde. Der gewählte Wert ist der erste auftretende Extremwert des Verlaufs, welcher in Kapitel 6.5.11 genauer beschrieben ist. Die blauen Säulen visualisieren die erreichten maximalen Querbeschleunigungen von Fahrer HE und die rot gefärbten jene der Manöver, welche von Fahrer SL gefahren wurden. In der Abbildung zeigt sich, dass der Fahrer HE die größte Häufigkeit bei einer Querbeschleunigung von 0,75 m/s² hat, bei einer Spanne von 0 bis 1,75 m/s². Der Fahrer SL erreicht bei den meisten Manövern eine Querbeschleunigung von 1,25 m/s², bei einer Spanne von 0,5 bis 2,5 m/s². Das Diagramm zeigt, dass HE geringere Querbeschleunigungen erzeugt als SL. Dies unterstreicht die Annahme, dass SL Fahrstreifenwechsel forscher durchführt als HE.

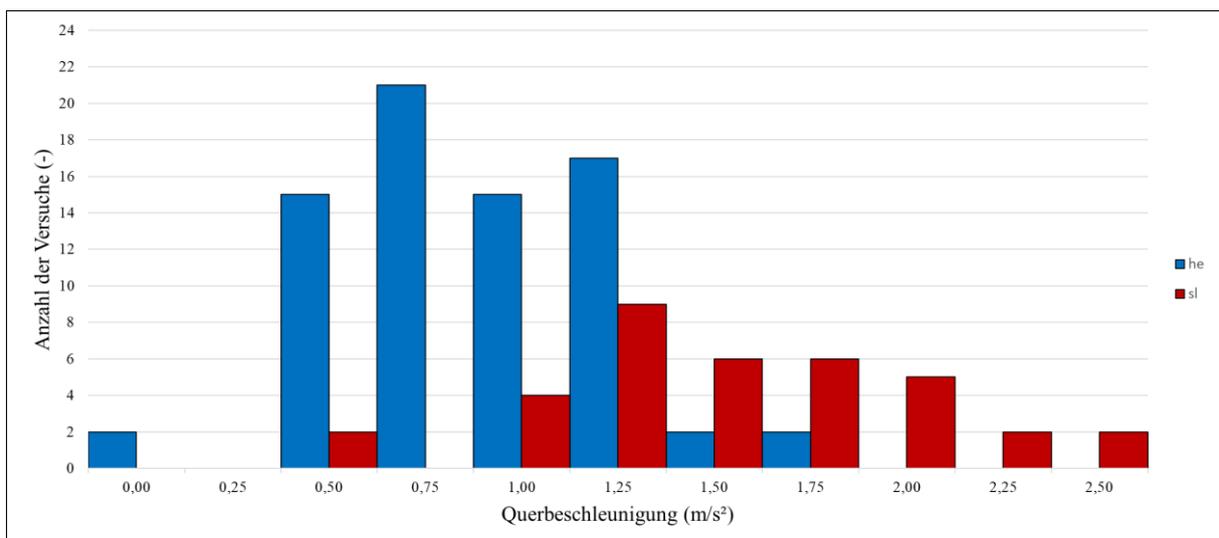


Abbildung 88: Histogramm der Querbeschleunigung der Fahrer

Abbildung 89 zeigt die unterschiedlichen Verteilungen der Quereschleunigung aufgeteilt in die beiden Geschwindigkeitsbereiche. Man erkennt sofort, dass die Quereschleunigung bei höherem Tempo deutlich zurückgeht und nur maximal 0,5 m/s² erreicht werden. Während im niedrigeren Geschwindigkeitsbereich die Quereschleunigung eine Spanne von 0 bis 2,5 m/s² aufweist.

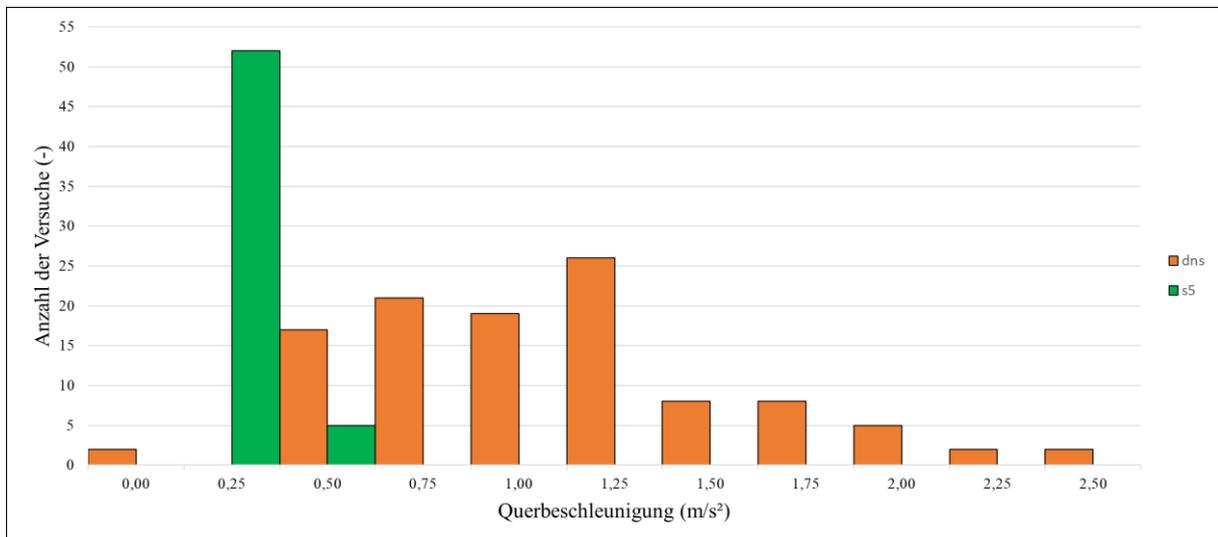


Abbildung 89: Histogramm der Quereschleunigung der Geschwindigkeitsbereiche

In Abbildung 90 sind die Unterschiede dargestellt, welche die Richtung des Fahrstreifenwechsels verursachen. Man erkennt, dass die meisten Manöver in beide Richtungen eine Quereschleunigung von 0,25 m/s² aufweisen. Außerdem zeigt die Darstellung, dass sich die anderen Versuche hauptsächlich im Bereich zwischen 0,5 m/s² und 2 m/s² befinden.

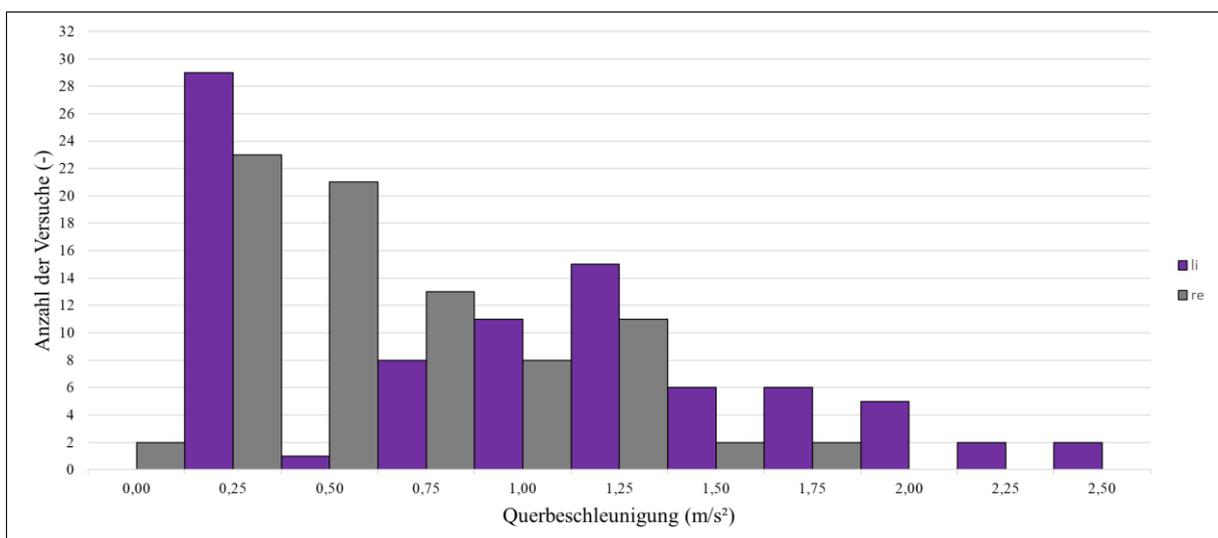


Abbildung 90: Histogramm der Quereschleunigung der Manöverrichtung

Abbildung 91 zeigt die Abhängigkeit der Quereschleunigung vom maximalen Rollwinkel. Man erkennt, dass sie bei den Versuchen im Ortsgebiet annähernd linear mit dem maximalen

Rollwinkel zusammenhängt. Bei den Versuchen auf der Schnellstraße ist keine Abhängigkeit der Querbeschleunigung vom maximalen Rollwinkel zu erkennen.

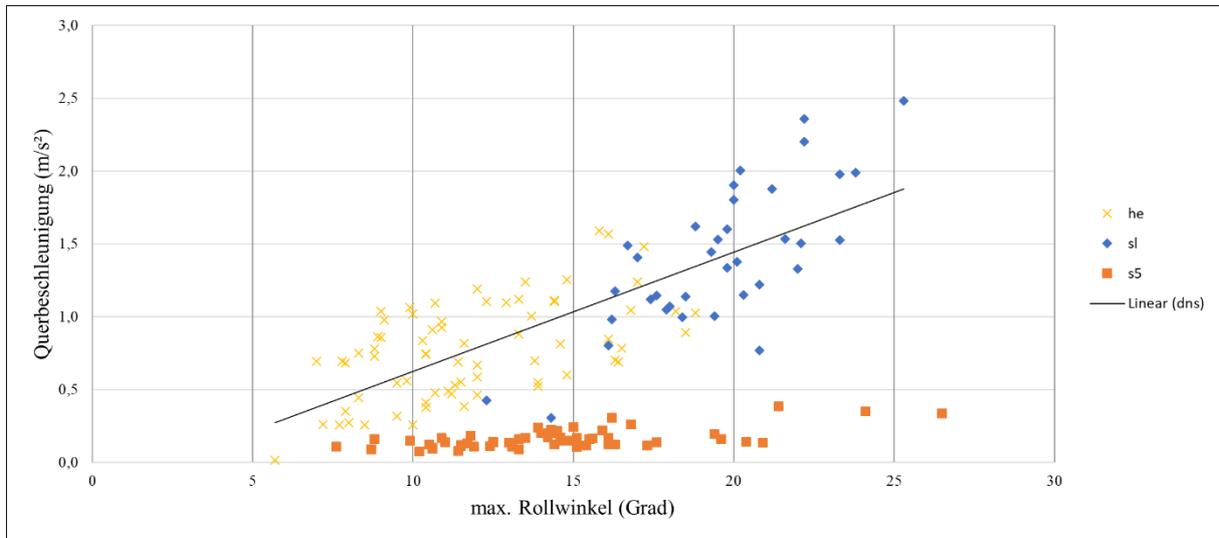


Abbildung 91: Abhängigkeit der Querbeschleunigung vom Rollwinkel

Abbildung 92 zeigt die Beziehung von Querbeschleunigung und maximaler Rollrate. Auch hier stellt sich eine ähnliche Beziehung wie zuvor beim Rollwinkel dar.

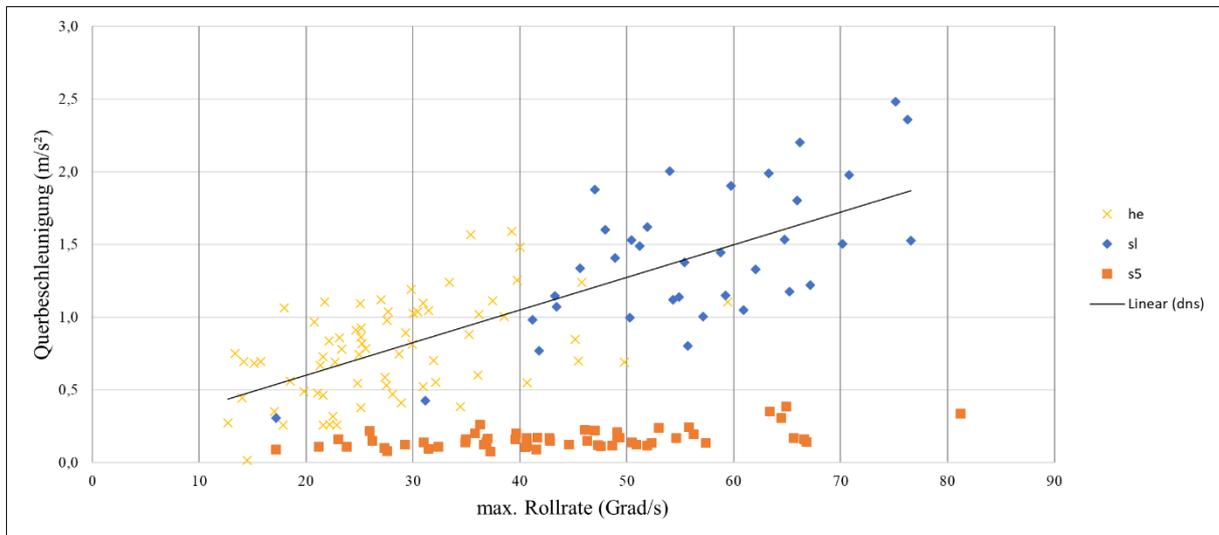


Abbildung 92: Abhängigkeit der Querbeschleunigung von der Rollrate

Abbildung 93 zeigt die Beziehung zwischen Querbeschleunigung und Intensität. Wie schon früher erwähnt, liefert dieses Diagramm definitionsbedingt ein ähnliches Resultat wie Abbildung 91.

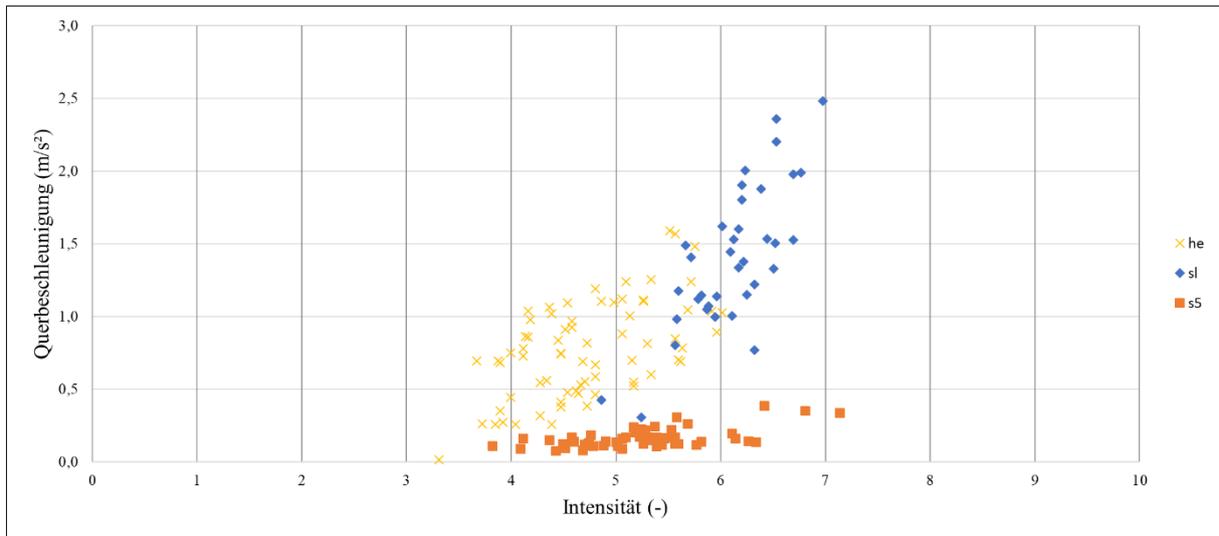


Abbildung 93: Abhängigkeit der Querbeschleunigung von der Intensität

Abbildung 94 zeigt die Beziehung von Querbeschleunigung und Manöverdauer. Man erkennt auch hier, dass sich für niedrige Geschwindigkeiten eine annähernd lineare Abhängigkeit der Manöverdauer von der Querbeschleunigung zeigt, wenn auch bei einer signifikanten Streuung. Für höhere Geschwindigkeiten ist, wenn überhaupt, eine minimale Tendenz zu erkennen, dass bei höheren Werten der Manöverdauer, geringere Querbeschleunigungen auftraten.

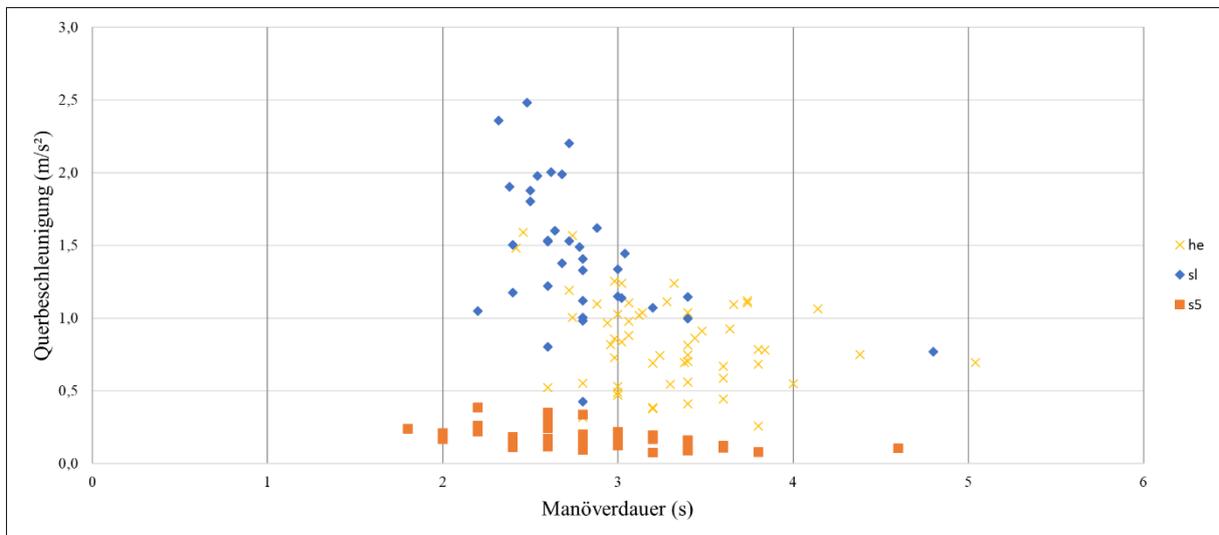


Abbildung 94: Abhängigkeit der Querbeschleunigung von der Manöverdauer

Abbildung 95 zeigt die Abhängigkeit der Querbeschleunigung von der Geschwindigkeit. Bei den Versuchen im Ortsgebiet ist eine Beziehung zwischen Querbeschleunigung und Geschwindigkeit kaum zu erkennen. Eine Abhängigkeit bei höheren Geschwindigkeiten kann ebenfalls nicht festgestellt werden, auch weil die Versuche nur von einem Fahrer absolviert wurden.

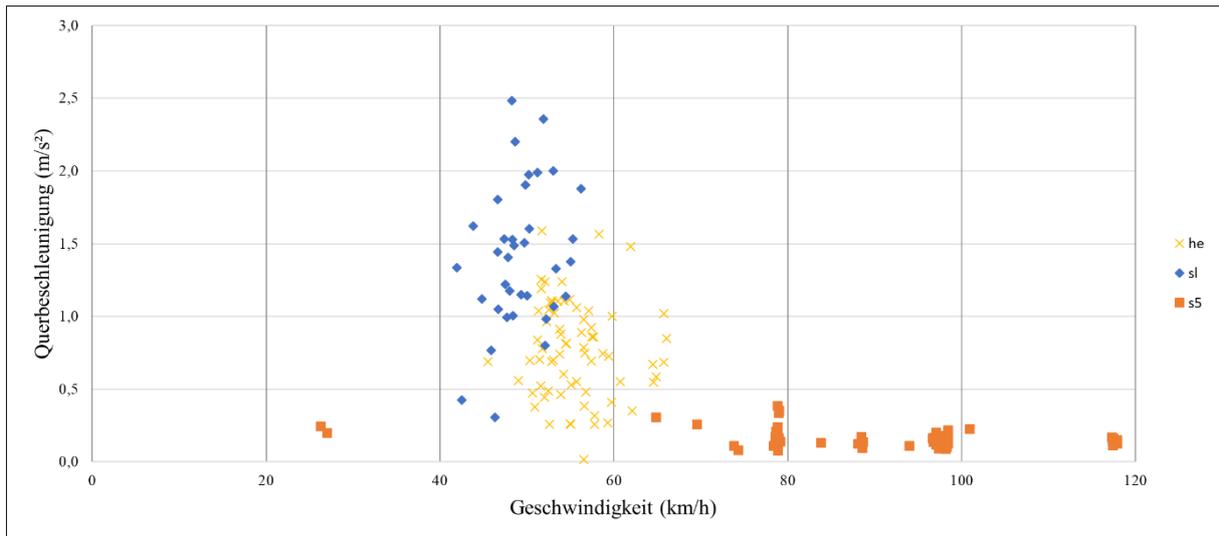


Abbildung 95: Abhängigkeit der Querbeschleunigung von der Geschwindigkeit

Abbildung 96 zeigt die Verteilung der maximalen Querbeschleunigung aufgeteilt in die beiden Versatzbreiten. Es ist zu erkennen, dass bei Manövern mit einer halben Fahrstreifenbreite Versatz maximal eine Querbeschleunigung von 0,5 m/s² auftrat. Das liegt daran, dass diese nur im höheren Geschwindigkeitsbereich durchgeführt wurden. Daher ist es nicht möglich, eine Abhängigkeit der Querbeschleunigung von der Versatzbreite zu eruieren.

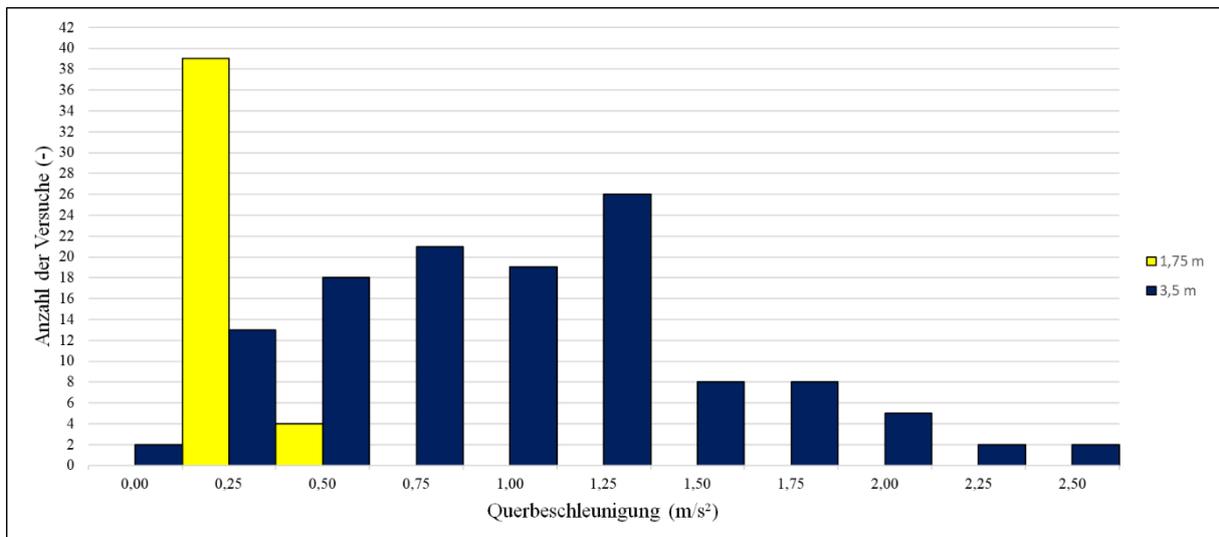


Abbildung 96: Abhängigkeit der Querbeschleunigung von der Versatzbreite

Abbildung 97 zeigt die Abhängigkeit von Querbeschleunigung und Lenkwinkel. Man erkennt die lineare Abhängigkeit der Querbeschleunigung.

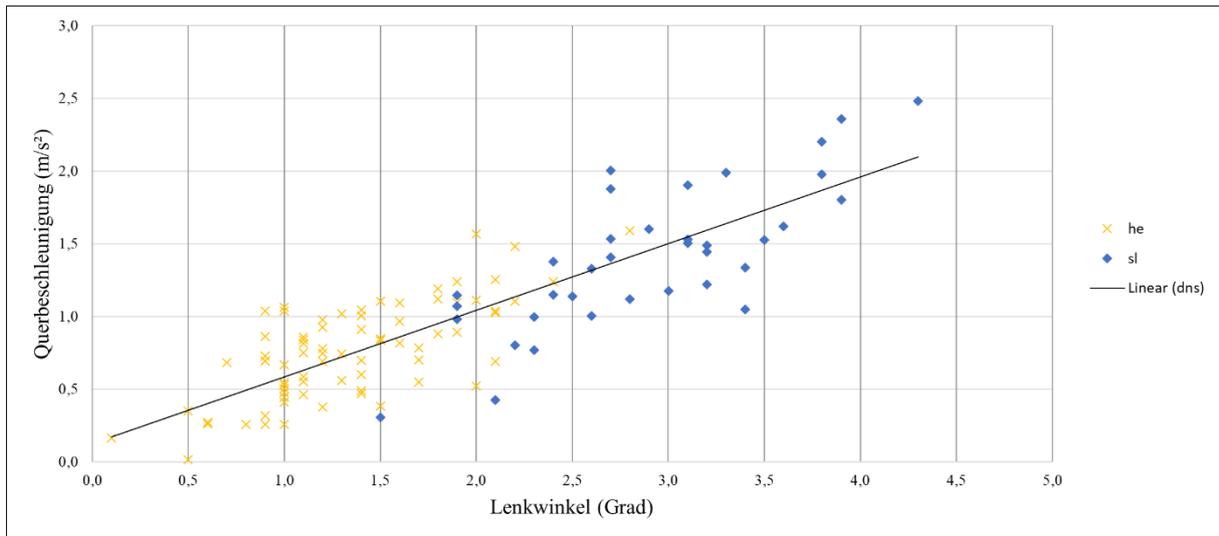


Abbildung 97: Abhängigkeit der Querbeschleunigung vom Lenkwinkel

Abbildung 98 zeigt die lineare Beziehung von Querbeschleunigung und Gierrate. Es lässt sich gut erkennen, dass diese Beziehung auch für die Versuche im höheren Geschwindigkeitsbereich gilt. Dies legt nahe, dass auch der Lenkwinkel bei höherem Tempo eine ähnliche Beziehung hat.

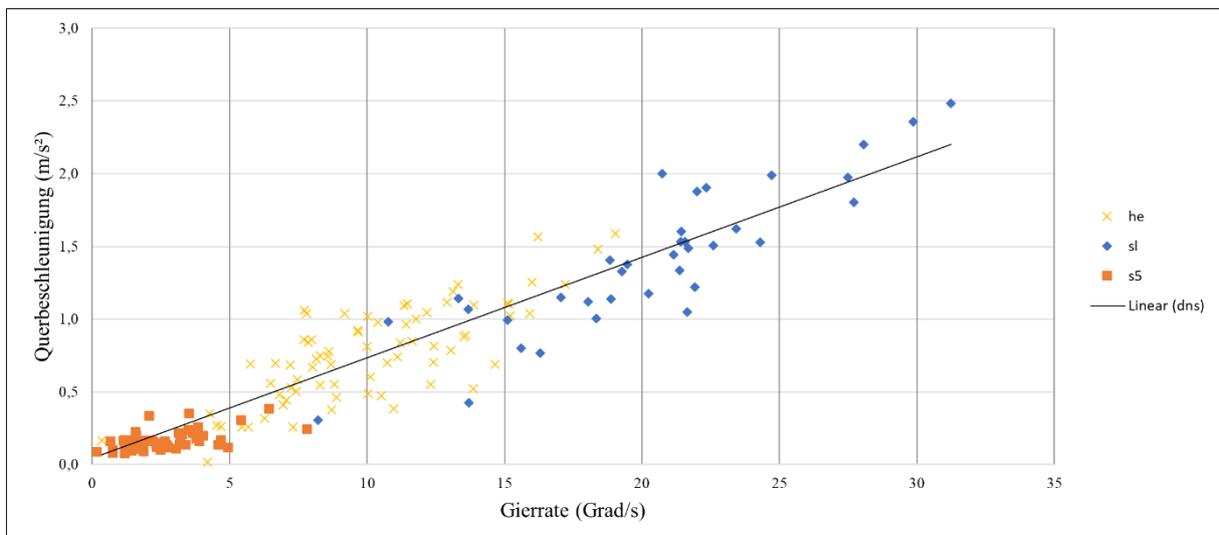


Abbildung 98: Abhängigkeit der Querbeschleunigung von der Gierrate

7.1.11. Sonstige aufgezeichnete Daten

Wie schon am Beginn von Kapitel 7.1 erwähnt, besteht für die Parameter Nickrate, Längs- und Vertikalbeschleunigung keine relevante Auswertbarkeit. Die Gründe dafür sind in Kapitel 6.5 anhand der Zeitverläufe der Parameter beispielhaft dargestellt und beschrieben.

7.2. Die Ergebnisse der Reaktionszeitversuche

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Reaktionszeitmessungen angeführt und diskutiert. Die Messungen wurden zu einem Teil im Zuge der Versuchsfahrten zum Thema Fahrstreifenwechsel und zum anderen Teil in separaten Versuchsfahrten mit dem einzigen Ziel der Reaktionszeitmessung durchgeführt. Insgesamt wurden fünf Versuchsfahrten aufgezeichnet. Die Fahrten HE1, HE2 und SL1 erfolgten im Rahmen der Fahrstreifenwechsel, während die Fahrten SL2 und HE3 eigenständige Versuchsfahrten darstellten. Die Bezeichnungen bestehen aus dem Kürzel des Fahrers sowie einer aufsteigenden Nummer. Die Ergebnisse der Messfahrten sind in der folgenden Tabelle 7 zusammengefasst. Es wird die Probengröße n , der Mittelwert \bar{x} , der Median \tilde{x} , die Standardabweichung σ , der minimale und maximale Wert, sowie die Anzahl der fehlerhaften Messungen angegeben. Betrachtet werden die zwei in Kapitel 6.3 beschriebenen Auswertemethoden der Zeitdifferenz von der Reaktionsaufforderung in der Videoaufzeichnung bis zur Auslösung eines der Taster an den Lenkergriffen bzw. bis zum Anstieg der Rollrate. Die Ergebnisse sind als Gesamtergebnis und aufgeteilt in die einzelnen Versuchsfahrten bzw. den jeweiligen Lenker angeführt.

Tabelle 7: Statistische Ergebnisse der Reaktionszeitversuche (Zeitangaben in s)

Umfang	n	Auswertung Taster						Auswertung Rollrate				
		\bar{x}	\tilde{x}	σ	MIN	MAX	Fehlerhaft	\bar{x}	\tilde{x}	σ	MIN	MAX
HE1	17	0,83	0,77	0,35	0,27	1,58	1	0,74	0,60	0,34	0,30	1,50
HE2	20	0,74	0,58	0,32	0,46	1,47	0	0,75	0,60	0,35	0,40	1,50
SL1	18	0,53	0,50	0,16	0,34	0,85	2	0,54	0,50	0,16	0,40	0,90
SL2	31	0,67	0,61	0,23	0,44	1,26	2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
HE3	89	0,61	0,58	0,16	0,40	1,33	7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
HE	126	0,66	0,61	0,24	0,27	1,58	8	0,75	0,60	0,34	0,30	1,50
SL	49	0,62	0,55	0,22	0,34	1,26	4	0,54	0,50	0,16	0,40	0,90
Gesamt	175	0,65	0,59	0,23	0,27	1,58	12	0,68	0,60	0,31	0,30	1,50

Der Mittelwert liegt bei 0,65 s beziehungsweise 0,68 s, je nach Auswerteverfahren. Der Vergleich der Fahrer liefert hier etwas größere Unterschiede. Die Reaktionszeit von SL ist bei der Auswertung des Taster-Signals nur um 0,04 s schneller, während sie bei der Auswertung der Rollrate um 0,21 s schneller ist. Ein Blick auf die Mittelwerte der einzelnen Messfahrten offenbart, dass die Messungen ohne Fahrstreifenwechsel bei beiden Fahrern sehr ähnlich sind, während die Reaktionszeit im Zuge des Fahrstreifenwechsels bei Fahrer HE länger und bei Fahrer SL kürzer ist. Die Versuchsfahrten SL2 und HE3 sind ohne Spurwechselmanöver auf einer ausgedehnteren Strecke durchgeführt worden, daher gibt es zu diesen Fahrten keine relevanten Messdaten der Rollrate.

Ein Vergleich des Mittelwerts der Reaktionszeit mit dem in Kapitel 2 erwähnten Wert von 0,21 s von Kuschefski et al. in [6] zeigt einen großen Unterschied auf. Kuschefski et al. erklären in [6], dass dies eine bewusst eher kurz angenommene Reaktionszeit ist, welche dazu führt, dass die von ihnen eigentlich untersuchte durchschnittliche Bremsverzögerung niedrigere Werte

ergibt und damit eher den „worst case“ abbildet. Allerdings ist dieser Wert damit nicht mit einer gemessenen Reaktionszeit gleichzusetzen, wie sie in dieser Arbeit untersucht worden ist.

Abschließend ist festzuhalten, dass der Umfang der Reaktionszeitmessungen mit einer Gesamtzahl von 175 Messungen eine durchaus repräsentative Menge darstellt, wobei die Aussagekraft durch die geringe Anzahl von nur zwei Probanden deutlich eingeschränkt ist.

8. Ein mathematisches Modell des Fahrstreifenwechsels

In diesem Kapitel wird aus den gewonnenen Messungen ein mathematisches Modell des Fahrstreifenwechselmanövers entwickelt. Das primäre Ziel ist dabei, den Rollwinkel des Motorrades als Funktion einiger weniger fahrdynamischer Parameter zu beschreiben.

8.1. Der Fahrstreifenwechsel in Abhängigkeit von Versatzbreite, Geschwindigkeit und Intensität

Für eine allgemein verwendbare mathematische Beschreibung eines Fahrstreifenwechsels ist es erforderlich, zuerst die Eingangsparameter für die Berechnungsfunktion auszuwählen und zu definieren. Ausgehend von den Erkenntnissen, welche aus den zahlreichen Messungen gewonnen wurden, ergibt sich, dass ein Fahrstreifenwechsel durch drei Kenngrößen beschreibbar sein sollte: Die Spurversatzbreite, die gefahrene Geschwindigkeit und die „Intensität“ mit der das Manöver ausgeführt wird.

Die ersten beiden Parameter (Spurversatzbreite und Fahrgeschwindigkeit) sind objektive Größen und werden eindeutig durch Zahlenwerte beschrieben. Jedoch reichen diese beiden Parameter nicht aus, denn zweifellos spielt es eine große Rolle, wie energisch (oder entspannt) ein Fahrer das Manöver ausführt, welche Seitenneigung (Rollwinkel) er bereit ist zu erreichen, welches Lenkmoment er zum Einleiten des Manövers aufbringt. Um nun die subjektiven und verbalen Einschätzungen („gemütlich“, „aggressiv“, „sportlich“, „langsam“, etc.) der Fahrer auf einer numerischen Skala abzubilden, wurde in Kapitel 6.5.3 der Begriff der „Intensität“ eingeführt und ein Berechnungsmodell vorgestellt. Danach ergibt sich die Intensität I eines ausgeführten Manövers aus einer nichtlinearen Funktion des maximal aufgetretenen Rollwinkels ϕ_{max} . Die Berechnungsformel ist derart gewichtet, dass im Eingangsbereich $[0 \dots 52 \text{ Grad}]$ für den Rollwinkel die Intensität I einen Wert im Bereich $[0 \dots 10]$ annimmt.

Um nun eine Funktion für einen synthetischen Rollwinkelverlauf $\phi(t)$ zu ermitteln, müssen zuerst zwei Kenngrößen des zu beschreibenden Verlaufes errechnet werden. Es sind dies die Dauer des Manövers t_{sw} und die maximal erreichte Rollwinkelgeschwindigkeit $\dot{\phi}_{max}$. Mit diesen beiden Parametern soll dann eine noch zu bestimmende Funktion $\dot{\phi}(t)$ parametrisiert und daraus der Rollwinkel $\phi(t)$ als Funktion der Zeit abgeleitet werden.

Im Weiteren wird für die Bestimmung der beiden Kenngrößen t_{sw} und $\dot{\phi}_{max}$ folgendermaßen vorgegangen. Es wird davon ausgegangen, dass sich eine Kenngröße k als Linearkombination von unabhängigen Eingangsgrößen z_i darstellen lässt

$$k = a z_1 + b z_2 + c z_3 + \dots \quad \text{Glg. (8.1)}$$

wobei a, b, c, \dots zu bestimmende Faktoren der Eingangsgrößen z_i sind.

Die unterstellte lineare Abhängigkeit der Kenngrößen von den Eingangsgrößen basiert auf vorangegangenen ausführlichen Datenanalysen in Kapitel 7, ist aber letztlich eine Annahme, welche noch anhand der Ergebnisse überprüft werden muss. Auch die Auswahl und Anzahl der Eingangsgrößen z ist eine Frage, welche erst im Rahmen der Ergebnisse beurteilt werden kann. Wobei sich aus den voran gestellten Ausführungen ergibt, dass maximal drei Eingangsgrößen verwendet werden sollen, nämlich die Spurversatzbreite, die Fahrgeschwindigkeit und die Intensität der Ausführung des Manövers.

Die prinzipielle Vorgehensweise zur Berechnung der Koeffizienten der linearen Funktionen Glg. (8.1) ist nun wie folgt. Um die Koeffizienten $a, b, c \dots$ für einen n -gliedrigen Ansatz zu bestimmen, muss das lineare Gleichungssystem

$$A x = b$$

gelöst werden. Die Matrix A ist eine $(n \times n)$ -Matrix, bestehend aus n Zeilen von n Messungen für n Eingangsgrößen. Eine Zeile enthält daher in der Spalte j die Eingangsgrößen $z_{i,j}$ der Messung i

$$A = \begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \dots & z_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{n,1} & \dots & \dots & z_{n,n} \end{bmatrix}$$

Die $(n \times 1)$ -Matrix b der Kenngröße k enthält die Werte b_i der Kenngröße für die Messung i . Die $(n \times 1)$ -Matrix x ist die Lösung des linearen Gleichungssystems mit den gesuchten Faktoren $a, b, c \dots$.

Für die Anzahl n von gesuchten Faktoren $a, b, c \dots$ werden daher n Messungen von Spurwechselmanövern benötigt. Da aber die Anzahl der Faktoren maximal 3 beträgt, also $n_{max} = 3$ gilt, die Anzahl der auswertbaren Fahrmanöver aber $m = 147$ ist, sind nur maximal drei Faktoren $x = [a, b, c]^T$ zu bestimmen und ist A eine $(m \times 3)$ -Matrix und b von der Dimension $(m \times 1)$. Es liegt daher ein hochgradig überbestimmtes Gleichungssystem vor.

Die Lösung der im weiteren generierten Gleichungssysteme erfolgte unter Anwendung der Mathematik-Software MATLAB ©. Bei überbestimmten linearen Gleichungssystemen mit rechteckiger Koeffizientenmatrix errechnet MATLAB eine Lösung nach dem Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate. Dies entspricht im Wesentlichen einer Ausgleichsrechnung, sodass die gefundenen (maximal) drei Faktoren im Durchschnitt die Glg. (8.1) erfüllen. Für eine einzelne Messung wird aber der berechnete Wert vom gemessenen Wert abweichen. Daher

kann man ein Gütekriterium auf die gefundene mittlere Lösung anwenden und daran erkennen, ob die Qualität des Ansatzes dem Kriterium genügt oder nicht.

Im Weiteren wird nun diese Vorgangsweise für die mathematische Berechnung der Kenngrößen t_{sw} (Spurwechseldauer) und $\dot{\phi}_{max}$ (Amplitude der Rollrate/-winkelgeschwindigkeit) benützt. Dabei werden auch mehrere Ansätze mit den Eingangsparametern y (Spurversatzbreite), v (Fahrgeschwindigkeit) und I (Intensität) untersucht.

8.1.1. Die Berechnung der Spurwechseldauer

Ausgehend von den generellen Überlegungen werden nun mehrere Ansatzfunktionen untersucht und die erzielbare Genauigkeit überprüft.

Als erstes wird ein Ansatz mit zwei Eingangsgrößen und zwar der (dimensionslosen) Größe Intensität I und der Versatzbreite y (in Meter) untersucht. Die Ansatzfunktion lautet daher

$$t_{sw} = a I + b y \quad \text{Glg. (8.2)}$$

mit den gesuchten (dimensionsbehafteten) Faktoren a und b der linearen Beziehung.

Die Auswertung auf der Basis aller verwertbaren Messungen ergibt

$$\begin{aligned} a &= 0,2312 \text{ (s)} \\ b &= 0,5794 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \end{aligned}$$

für die gesuchten Größen.

Vergleicht man nun für alle gefahrenen Fahrstreifenwechsel die errechnete jeweilige Spurwechseldauer mit der gemessenen Dauer des Manövers, dann liefert diese Formel folgenden Mittelwert der Differenz von

$$= -0,0749 \text{ (s)}$$

und eine mittlere Abweichung von

$$= 0,5375 \text{ (s)}.$$

Aufgrund der in Kapitel 7 dargestellten linearen Abhängigkeit der Manöverdauer von der Intensität (siehe Abbildung 60) verwundert es, dass der Koeffizient der Intensität positiv ist. Daher wird die Ansatzfunktion im nächsten Schritt um den konstanten Term d erweitert. Mit der Ansatzfunktion

$$t_{sw} = a I + b y + d \quad \text{Glg. (8.3)}$$

ergeben sich nach der Auswertung folgende Werte für die gesuchten Größen

$$a = -0,2346 \text{ (s)}$$

$$b = 0,3379 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

$$d = 3,1715 \text{ (s)}$$

Für den Mittelwert der Differenz ergibt sich ein Wert von

$$= 1,3423 \cdot 10^{-5} \text{ (s)}$$

und eine mittlere Abweichung von

$$= 0,3336 \text{ (s)}$$

Dieses Ergebnis deckt sich gut mit den Erkenntnissen, welche aufgrund der Messdatenanalysen angenommen werden. Der Koeffizient der Intensität ist negativ, der Koeffizient der Versatzbreite ist positiv und die Dauer eines Fahrstreifenwechsels liegt aufgrund des konstanten Terms d bei etwa 3 Sekunden. Zuletzt wird untersucht, ob die Berechnung durch Hinzufügen der Geschwindigkeit v als dritten Parameter weiter verbessert werden kann. Mit der Ansatzfunktion

$$t_{sw} = a I + b y + c v + d \quad \text{Glg. (8.4)}$$

ergeben sich folgende Werte für die Koeffizienten

$$a = -0,2219 \text{ (s)}$$

$$b = 0,3986 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

$$c = 0,0035 \left(\frac{\text{s} \cdot \text{h}}{\text{km}} \right)$$

$$d = 2,6896 \text{ (s)}$$

Für den Mittelwert der Differenz ergibt sich ein Wert von

$$= -0,2246 \text{ (s)}$$

und der Wert für die mittlere Abweichung liegt bei

$$= 0,3624 \text{ (s)}$$

Dieser Ansatz liefert ein ähnliches Ergebnis wie der Ansatz zuvor. Der Koeffizient der Intensität ist erneut negativ und der Koeffizient der Versatzbreite ist positiv. Allerdings ist der konstante Term deutlich weiter vom Wert 3 entfernt als zuvor und der Einfluss der Geschwindigkeit mit einem Koeffizienten von 0,0035 sehr gering. Der Mittelwert der Differenz ist bedeutend größer als bei den anderen Ansätzen und auch die mittlere Abweichung der gemessenen Werte ist größer als bei Glg. (8.3). Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden diese in der folgenden Tabelle 8 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 8: Ergebnis der Ansätze zur Berechnung der Spurwechselfdauer

	Glg. (8.2)	Glg. (8.3)	Glg. (8.4)
Mittelwert Differenz (s)	-0,0749	$1,3423 \cdot 10^{-5}$	-0,2246
Abweichung Differenz (s)	0,5375	0,3336	0,3624

Die Tabelle zeigt, dass Glg. (8.3) der beste Ansatz ist. Obwohl vier Parameter in der Theorie ein besseres Ergebnis erzeugen sollten, scheinen die Schwankungen der gefahrenen Fahrstreifenwechsel größer zu sein, als der Einfluss der Geschwindigkeit. Man erkennt dies schon am Betrag von c , da der Einfluss der Geschwindigkeit nur etwa 1 % der anderen Faktoren ausmacht.

Die Formel für die Berechnung der Dauer des Fahrstreifenwechsels lautet daher:

$$t_{sw} := -0,2346 I + 0,3379 y + 3,1715 \quad \text{Glg. (8.5)}$$

Es ist ersichtlich, dass diese Formel nicht allgemein gültig ist. Würde man hypothetisch einen Fahrstreifenwechsel mit einer Intensität von 0 und einer Versatzbreite von 0 m durchführen, wäre das Ergebnis trotzdem eine Manöverdauer von 3,1715 Sekunden. Die genauen Grenzen der Gültigkeit wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Die durch die Glg. (8.5) aufgespannte Ebene ist in Abbildung 99, im dreidimensionalen Raum (Intensität, Versatzbreite, Manöverdauer), dargestellt. Die schwarz eingezeichneten Messpunkte liegen dabei jeweils in einer vertikalen Ebene. Das liegt daran, dass die Versatzbreiten der durchgeführten Versuche nur bei 1,75 m und 3,5 m liegen. Die farbige Ebene zeigt das zuvor erwähnte Verhältnis der Manöverdauer zu den Eingangsparametern Intensität und Versatzbreite. Dabei ist auch zu erkennen, dass die Beziehung in diesem Zustand nicht im gesamten dargestellten Bereich plausibel ist.

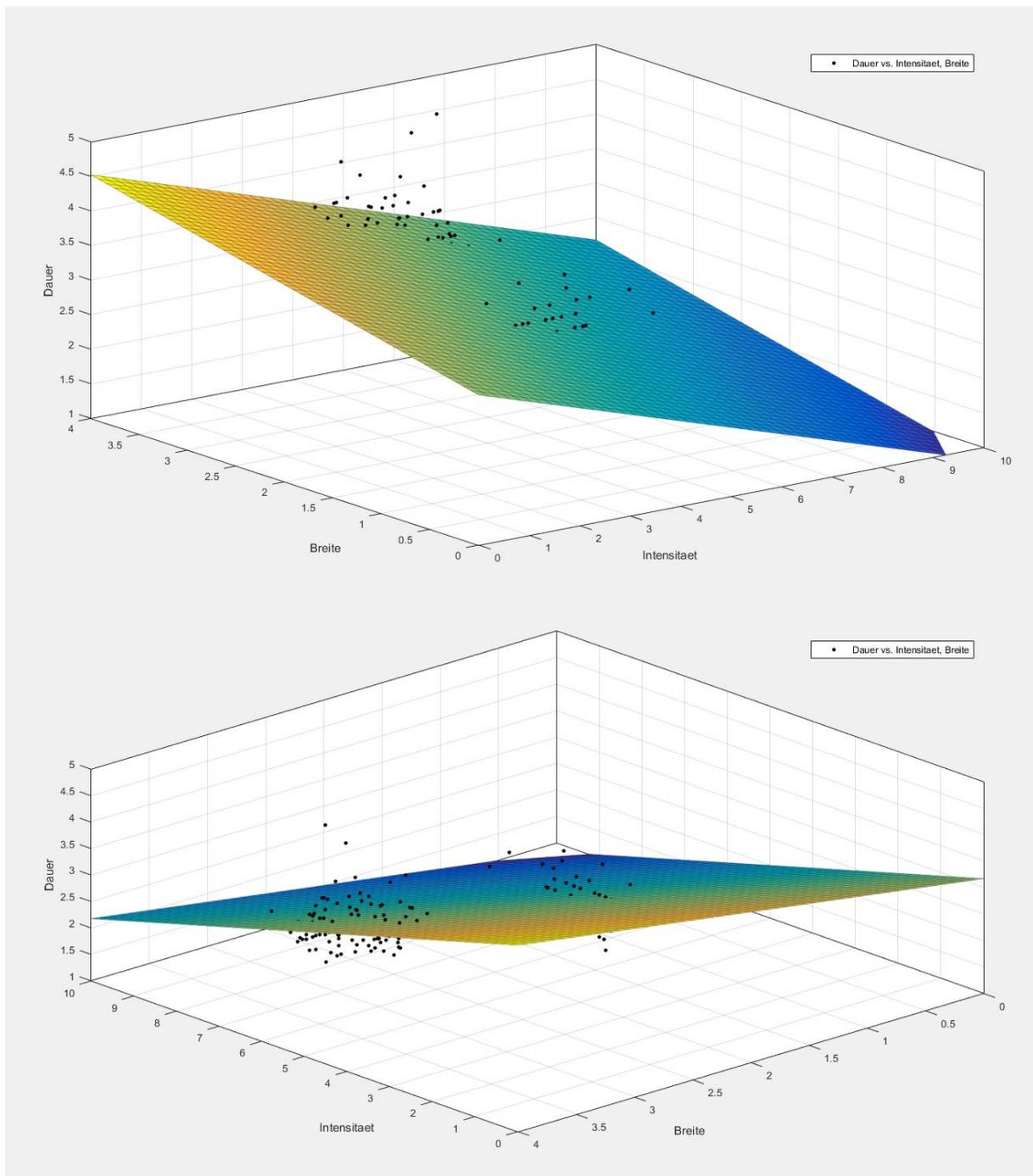


Abbildung 99: 3D-Darstellung der berechneten Manöverdauer

8.1.2. Die Berechnung der Amplitude der Rollrate

Als nächstes wird die Entwicklung einer Formel zur Berechnung der Amplitude der Rollrate beschrieben. Auch hier werden unterschiedliche Ansätze untersucht.

Zuerst wird ein Ansatz mit dem Parameter Intensität und einem konstanten Term berechnet. Der Ansatz lautet

$$\dot{\phi}_{max} = a I + c \quad \text{Glg. (8.6)}$$

Durch Lösung des Gleichungssystems ergeben sich folgende Werte für die gesuchten Größen

$$a = 13,4404 \left(\frac{\text{Grad}}{s} \right)$$
$$c = -28,1818 \left(\frac{\text{Grad}}{s} \right).$$

Gleich wie in Kapitel 8.1.1 werden der Mittelwert der Differenz und die mittlere Abweichung von berechneter und gemessener maximaler Rollrate berechnet. Das Ergebnis für den Mittelwert der Differenz liegt bei

$$= 0,2047 \left(\frac{\text{Grad}}{s} \right)$$

und für die mittlere Abweichung liefert der Ansatz einen Wert von

$$= 8,6950 \left(\frac{\text{Grad}}{s} \right).$$

Der positive Koeffizient der Intensität entspricht der Annahme. Allerdings bedeutet der große negative konstante Term, dass erst ab einer Intensität von etwa 2,1 eine positive Amplitude für die Rollrate berechnet wird. Daher wird als nächstes dieser Ansatz mit dem zusätzlichen Parameter der Manöverdauer t_{sw} untersucht. Die Ansatzformel lautet

$$\dot{\phi}_{max} = a I + b t_{sw} + c \quad \text{Glg. (8.7)}$$

Die Auswertung liefert folgende Werte für die gesuchten Koeffizienten

$$a = 11,5724 \left(\frac{\text{Grad}}{s} \right)$$
$$b = -10,5877 \left(\frac{\text{Grad}}{s^2} \right)$$
$$c = 13,4428 \left(\frac{\text{Grad}}{s} \right).$$

Für die Spurwechselversuche ergibt sich ein Mittelwert der Differenz von berechneter zu gemessener maximaler Rollrate von

$$= -2,1587 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{Grad}}{s} \right)$$

und eine mittlere Abweichung von

$$= 7,5681 \left(\frac{\text{Grad}}{s} \right)$$

Dieser Ansatz liefert erneut einen positiven Koeffizienten für die Intensität. Der Koeffizient der Dauer eines Fahrstreifenwechsels ist negativ, was sich mit der Überlegung deckt, dass eine größere Manöverdauer eine kleinere Amplitude der Rollrate ermöglicht. Für den konstanten Term ergibt sich ein positiver Wert. Dies ermöglicht, zumindest theoretisch, die Formel auch

bei niedrigen Intensitäten anzuwenden. In der nachstehenden Tabelle 9 sind die Ergebnisse für den Mittelwert der Differenz und die mittlere Abweichung angeführt.

Tabelle 9: Ergebnis der Ansätze zur Berechnung der Amplitude der Rollrate

	Glg. (8.6)	Glg. (8.7)
Mittelwert Differenz (Grad/s)	0,2047	$-2,1587 \cdot 10^{-4}$
Abweichung Differenz (Grad/s)	8,6950	7,5681

Es ist ersichtlich, dass der Ansatz mit den Parametern Intensität und Manöverdauer bessere Ergebnisse liefert. Daher wird in den weiteren Untersuchungen die Formel

$$\dot{\phi}_{max} := 11,5724 I - 10,5877 t_{sw} + 13,4428 \quad \text{Glg. (8.8)}$$

zur Berechnung der maximalen Rollrate verwendet. Auch diese Formel ist nicht allgemein gültig. Die genauen Grenzen der Gültigkeit wurden nicht untersucht.

Auch ein Ansatz mit der Fahrgeschwindigkeit als zusätzlichem Parameter wäre möglich. Jedoch wird aufgrund der in Kapitel 7.1.6 beschriebenen Unabhängigkeit der Rollrate vom Tempo kein damit verbundener Ansatz untersucht.

8.1.3. Die Entwicklung des Rollratenverlaufs über die Zeit

Als letzter Schritt vor der Berechnung des Rollwinkelverlaufs ist die Berechnung des Verlaufs der Rollrate notwendig. Die Ansatzfunktion muss die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Cosinusform
- Dämpfung der Auslenkung über die Zeit
- Änderung der Frequenz über die Zeit
- möglichst exakte Annäherung an die gemessenen Rollratenverläufe

Um die Cosinusform darstellen zu können ist folgender naheliegender Ansatz notwendig

$$\dot{\phi}(t) = \dot{\phi}_{max} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$$

mit $\dot{\phi}(t)$ → Rollrate als Funktion der Zeit t in (Grad/s)

$\dot{\phi}_{max}$ → Amplitude der Rollrate in (Grad/s)

T → Periodendauer des Cosinusters in (s)

t → Zeit in (s); $t = 0$ bei $\phi = 0$ und $\frac{d\phi}{dt} = 0$

Da ein vollständiger Fahrstreifenwechsel drei Rollratenhalbwellen durchläuft, ist die Periodendauer T nicht gleich der Spurwechseldauer sondern

$$T = \frac{2}{3} t_{sw}$$

Damit ergibt sich die Formel für die Rollrate zu

$$\dot{\phi}(t) = \dot{\phi}_{max} \cos\left(\frac{3\pi}{t_{sw}} t\right)$$

Als nächstes soll die Dämpfung λ der Auslenkung bestimmt werden. Dazu wird ein Term in der Form

$$e^{\frac{-\lambda t}{t_{sw}}}$$

zur Formel hinzugefügt, welcher die Amplitude mit der Zeit exponentiell abklingen lässt

$$\dot{\phi}(t) = \dot{\phi}_{max} e^{\frac{-\lambda t}{t_{sw}}} \cos\left(\frac{3\pi}{t_{sw}} t\right).$$

Diese wird anschließend an der Stelle

$$t = \frac{t_{sw}}{3}$$

ausgewertet. An dieser Stelle ergibt sich der Cosinusterm zu

$$\cos\left(\frac{3\pi}{t_{sw}} t\right) = \cos\left(\frac{3\pi}{t_{sw}} \frac{t_{sw}}{3}\right) = \cos(\pi) = -1.$$

Daher wird die Amplitude des zweiten Maximums (negativ) berechnet. Welches in Abbildung 100 ca. bei Sekunde 1 zu sehen ist.

In den Messdaten lässt sich erkennen, dass die Werte der lokalen Minima in einem Versuch annähernd gleich groß sind. Um die relative Höhe berechnen zu können, wird aus den Daten der Versuchsfahrten das Verhältnis vom ersten Maximum zum ersten Minimum der Rollrate berechnet. Es zeigt sich, dass der Mittelwert der negativen Peaks etwa

$$\dot{\phi}\left(\frac{t_{sw}}{3}\right) \approx -0,70389 \dot{\phi}_{max}$$

entspricht.

Die zu lösende Gleichung lautet nun

$$\dot{\phi}\left(\frac{t_{sw}}{3}\right) = \dot{\phi}_{max} e^{\frac{-\lambda t}{t_{sw}}} \cos(\pi)$$

$$-0,70389 \dot{\phi}_{max} = -\dot{\phi}_{max} e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = -3 \ln(0,70389) = 1,0534$$

und liefert damit folgenden vorläufigen Wert für die Dämpfung

$$\lambda := 1,05$$

Als Nächstes muss die Beeinflussung der Frequenz in die Formel integriert werden. Dazu muss das Verhältnis der Zeit t zur Manöverdauer t_{sw} manipuliert werden. Um die Beeinflussung über die Zeit zu verstärken wurde ein Exponent k gewählt. Dieser bewirkt, dass der Verlauf zwischen $t = 0$ und $t = 1$ gestreckt und ab $t > 1$ gestaucht wird.

Die Formel

$$\dot{\phi}(t) := \dot{\phi}_{max} e^{\frac{-1,05t}{t_{sw}}} \cos\left(\frac{3\pi}{t_{sw}} |t|^k\right) \quad \text{Glg. (8.9)}$$

verfügt nun über alle zu Anfang geforderten Eigenschaften.

Diese müssen in weiterer Folge noch optimal an die Messdaten angenähert werden. Da der ideale Fahrstreifenwechsel auf einer Geraden bei Null Grad Rollwinkel startet und endet, muss dies auch für den berechneten Rollwinkel gelten. Für den Rollwinkel ist das erfüllt, wenn das Integral über die Rollrate Null ergibt, also die positive und die negative Fläche zwischen der Rollrate und der Nulllinie gleich groß sind.

Abbildung 100 zeigt den Verlauf der Rollrate (dunkelblau) und des Rollwinkels (dunkelrot) für folgende Formel

$$\dot{\phi}(t) := \dot{\phi}_{max} e^{\frac{-1,05|t|}{t_{sw}}} \cos\left(\frac{3\pi}{t_{sw}} t\right) \quad \text{Glg. (8.10)}$$

sowie den gemessenen Verlauf von Rollrate (hellblau) und Rollwinkel (orange) eines Versuchs.

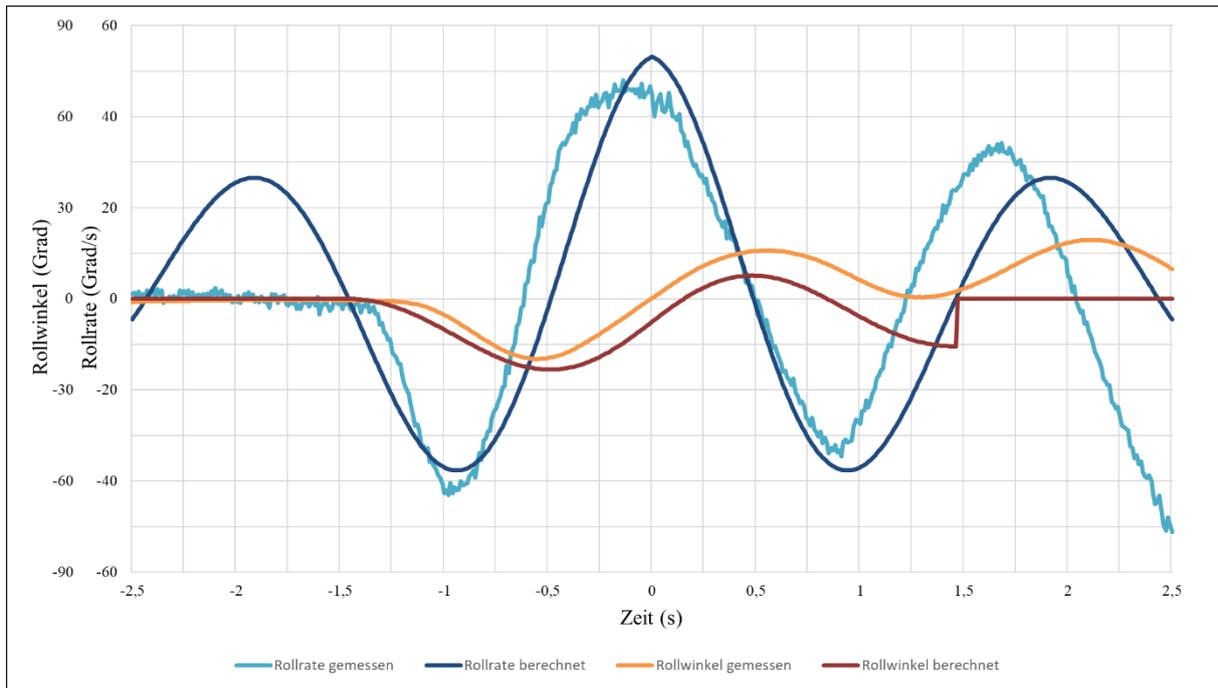


Abbildung 100: Verlauf von Rollwinkel und Rollrate; gemessen und berechnet (Glg. 8.10)

Folgende Abweichungen fallen auf; es ist zu erkennen,

- 1) dass die berechnete Rollrate eine Unstetigkeit an der Stelle des Maximums hat,
- 2) dass der Verlauf der berechneten Rollrate mehr als drei Halbwellen enthält,
- 3) dass am Ende des Verlaufs des berechneten Rollwinkels ein Sprung vorhanden ist,
- 4) dass in den gemessenen Verläufen ein weiterer Fahrstreifenwechsel folgt.

Die beschriebene Unstetigkeit ist in den Messdaten nicht vorhanden, daher muss die Dämpfung der Amplitude weiter optimiert werden. Die Unstetigkeit entsteht dadurch, dass der Dämpfungsterm bereits um die Nulllage stark ansteigt und der Rollratenverlauf um das Maximum gespiegelt wird. Die notwendige Optimierung des Dämpfungsterms muss die Dämpfung um die Nulllage möglichst gegen Null gehen lassen, ohne dabei die Dämpfung des restlichen Verlaufs erheblich einzuschränken. Die folgende Formel zeigt eine Möglichkeit das gewünschte Verhalten zu erreichen.

$$\dot{\phi}(t) := \dot{\phi}_{max} e^{\frac{-3,14t^2}{t_{sw}^2}} \cos\left(\frac{3\pi}{t_{sw}} t\right) \quad \text{Glg. (8.11)}$$

Durch die Quadrierung der Zeit im Dämpfungsterm bleibt die Dämpfung bis $t = 1$ gering, während die Division durch das Quadrat der Manöverdauer die Dämpfung weniger abhängig von der Dauer des Fahrstreifenwechsels macht. Abbildung 101 zeigt genau das eben beschriebene Verhalten. Die Unstetigkeit im Verlauf der Rollrate ist verschwunden, ohne die Amplitude im übrigen Verlauf übermäßig zu beeinflussen.

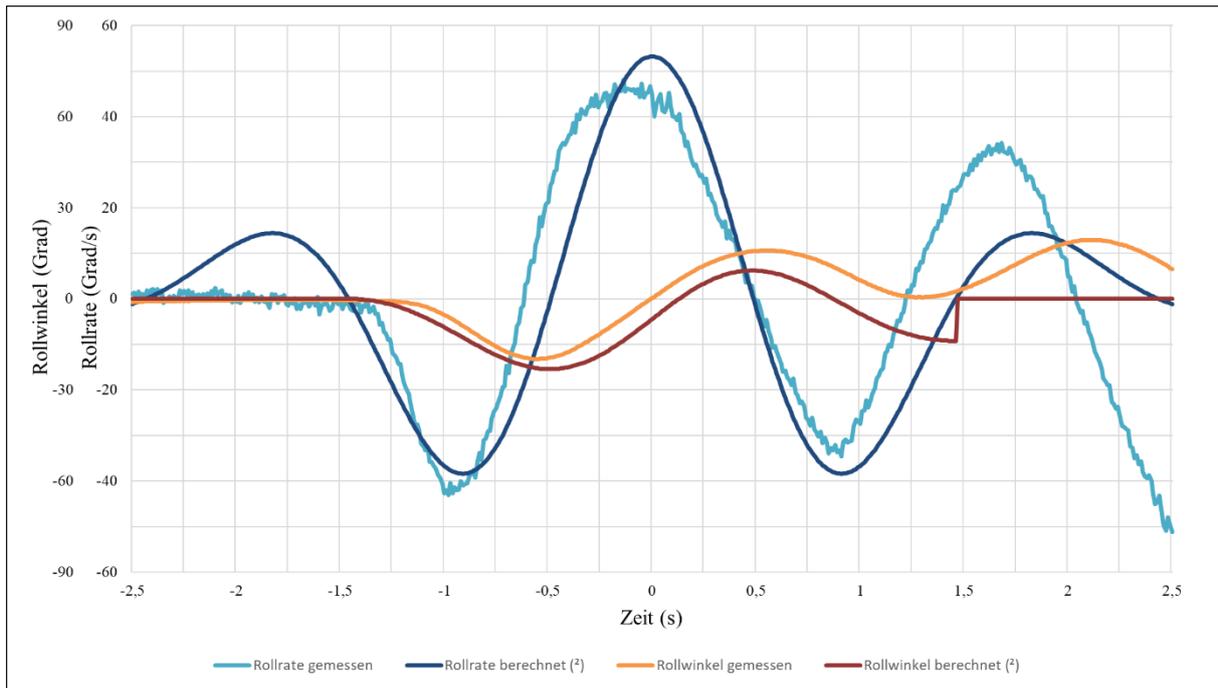


Abbildung 101: Verlauf von Rollwinkel und Rollrate; gemessen und berechnet (Glg. 8.11)

Der Rollwinkel am Ende des Manövers ist allerdings noch nicht wieder bei Null. Das bedeutet, dass die positiven und negativen Flächen nicht gleich groß sind. Da der Rollwinkel im Negativen endet bedeutet das, dass die negativen Flächen größer sind. Daher müssen diese durch Erhöhung der Frequenz bzw. durch Erhöhung der Dämpfung der Amplitude reduziert werden. Da die Werte der negativen Peaks sich aber schon dem realen Wert annähern, kann diese „Stellschraube“ nicht benutzt werden. Es bleibt die Erhöhung der Frequenz, welche in folgender Formel im Cosinusterm dargestellt ist.

$$\dot{\phi}(t) := \dot{\phi}_{max} e^{\frac{-3,14t^2}{t_{sw}^2}} \cos\left(\frac{3\pi}{t_{sw}} |t|^{1,21}\right) \quad \text{Glg. (8.12)}$$

Der Exponent im Cosinusterm führt dazu, dass die Schwingung im Bereich $0 \leq t \leq 1$ gedehnt (Verringerung der Frequenz), beziehungsweise ab $t > 1$ gestaucht (Erhöhung der Frequenz) wird. Abbildung 102 zeigt den Verlauf der Rollrate mit den eingebrachten Änderungen im Vergleich zu dem bekannten gemessenen Verlauf der Rollrate, sowie den gemessenen Rollwinkelverlauf und den berechneten Rollwinkel. Außerdem wird der Verlauf der Rollrate auf die drei Halbwellen begrenzt.

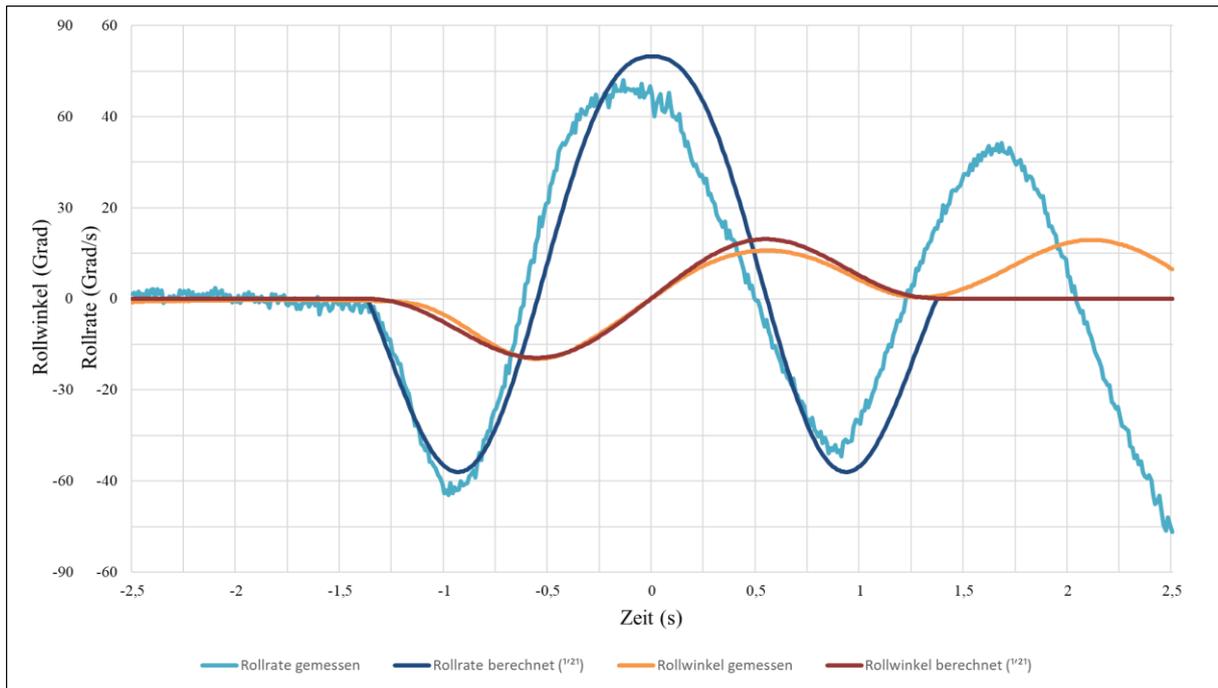


Abbildung 102: Verlauf von Rollwinkel und Rollrate; gemessen und berechnet (Glg. 8.12)

Es ist zu sehen, dass der berechnete Rollraten- bzw. Rollwinkelverlauf sich den gemessenen Verläufen annehmbar nähert. Im folgenden Teil des Kapitels werden noch weitere Spurwechselversuche mit den jeweils berechneten Daten verglichen. Mit Glg. (8.12) ist die vorläufig finale Formel für die Berechnung des Rollraten- und Rollwinkelverlaufs definiert. Der Definitionsbereich für Glg. (8.12) ergibt sich zu

$$0 \leq \left(\frac{3\pi}{t_{sw}} |t|^{1,21} \right) \leq \frac{3\pi}{2}$$

Das Integral bzw. die (Riemann-)Summe der Rollrate liefert dann den Verlauf des Rollwinkels zu

$$\phi(t) := \int \dot{\phi}(t) dt \text{ bzw. } \phi(t) := \sum \dot{\phi}(t) \quad \text{Glg. (8.13)}$$

8.1.4. Vergleich der gemessenen und berechneten Zeitverläufe

Mit Hilfe der erzeugten Formeln ist es möglich, synthetische Verläufe für Rollwinkel und -rate zu berechnen. Die Fahrstreifenwechsel können dabei mit beliebigen Parameterwerten für Fahrgeschwindigkeit, Versatzbreite und Intensität definiert werden. Die Qualität kann dabei am besten überprüft werden, wenn die berechneten Zeitverläufe mit den jeweiligen gemessenen Verläufen verglichen werden. Abbildung 103 und Abbildung 104 zeigen solche Vergleiche am Beispiel von hoher und niedriger Intensität und sind im Wesentlichen die Diagramme aus Abbildung 28 und Abbildung 29, ergänzt durch die berechneten Verläufe von Rollwinkel und Rollrate.

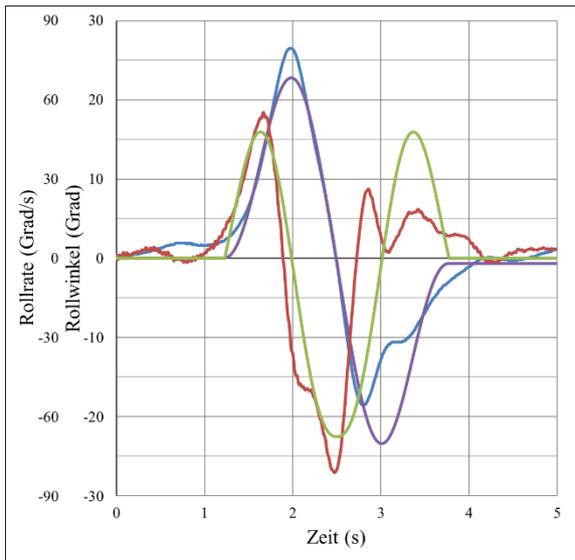


Abbildung 103: Abbildung 28 ergänzt um die berechneten Verläufe von Rollwinkel (violett) und Rollrate (grün) eines Fahrstreifenwechsels nach rechts mit hoher Intensität ($I=7,1$) bei 79 km/h

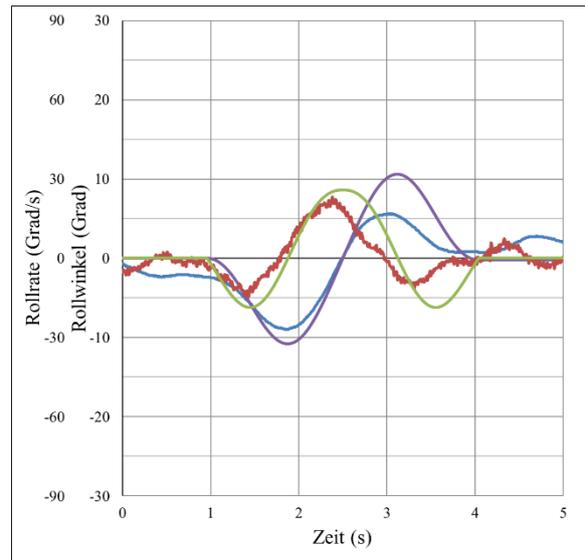


Abbildung 104: Abbildung 29 ergänzt um die berechneten Verläufe von Rollwinkel (violett) und Rollrate (grün) eines Fahrstreifenwechsels nach links mit niedriger Intensität ($I=4,4$) bei 58 km/h

Abbildung 105 und Abbildung 106 zeigen ebenso Vergleiche von gemessenen und synthetischen Verläufen von Rollwinkel und Rollrate, jedoch am Beispiel von hoher und niedriger gefahrener Geschwindigkeit.

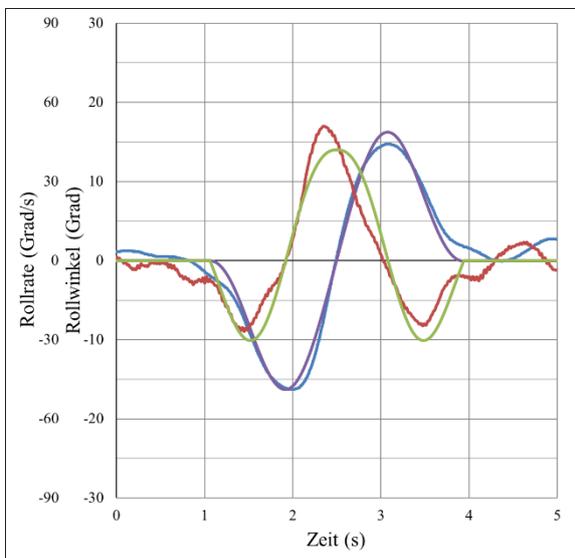


Abbildung 105: Gemessener Verlauf von Rollwinkel (blau) und Rollrate (rot) sowie berechneter Verlauf von Rollwinkel (violett) und Rollrate (grün) eines Fahrstreifenwechsels nach links mit 97 km/h

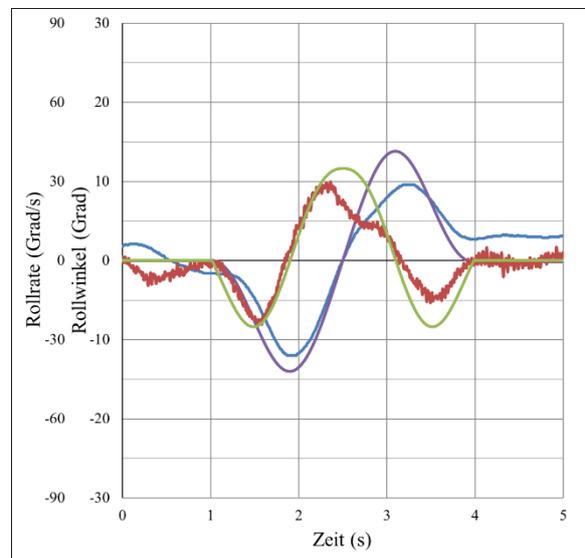


Abbildung 106: Gemessener Verlauf von Rollwinkel (blau) und Rollrate (rot) sowie berechneter Verlauf von Rollwinkel (violett) und Rollrate (grün) eines Fahrstreifenwechsels nach links mit 52 km/h

Es ist zu erkennen, dass die berechneten Verläufe sehr gut mit den gemessenen übereinstimmen. Auffällig ist, dass die synthetischen Funktionen natürlich keine Störungen enthalten. Messrauschen sowie der Einfluss des Fahrers durch die nicht-ideale Steuerung und auch Fahrbahneinflüsse sind in den berechneten Verläufen nicht enthalten. Insgesamt ist das

Ergebnis als sehr zufriedenstellend einzuordnen. Der Beginn des Spurwechselmanövers wird auffallend gut berechnet. Das zweite Maximum des Rollwinkels wird hingegen bei einigen Versuchen überschätzt. Die Hauptursache dafür ist, dass die gemessenen Verläufe vom Ideal abweichen und sich häufig untypisch an Null annähern. Dies ist vermutlich auf die Aufgabe des Fahrers zurückzuführen, möglichst genau die neue Fahrlinie zu treffen. Selbst für geübte Fahrer ist das nicht ohne weiteres mit dem ersten Einlenken – ohne Korrekturen – erreichbar. Daher entzieht sich das Ende des Manövers einem aussagekräftigen Vergleich.

9. Zusammenfassung

Die vielen Fahrstreifenwechselmanöver, welche im öffentlichen Straßenverkehr mit einem Messmotorrad durchgeführt wurden, lieferten die im Folgenden beschriebenen Erkenntnisse. Abbildung 107 zeigt die Rollwinkelverläufe aller aufgezeichneten Fahrstreifenwechsel so synchronisiert, dass der Nulldurchgang zum selben Zeitpunkt (2,5 s) stattfindet. In dieser Darstellung sind viele der im Anschluss aufgeführten Erkenntnisse zu sehen.

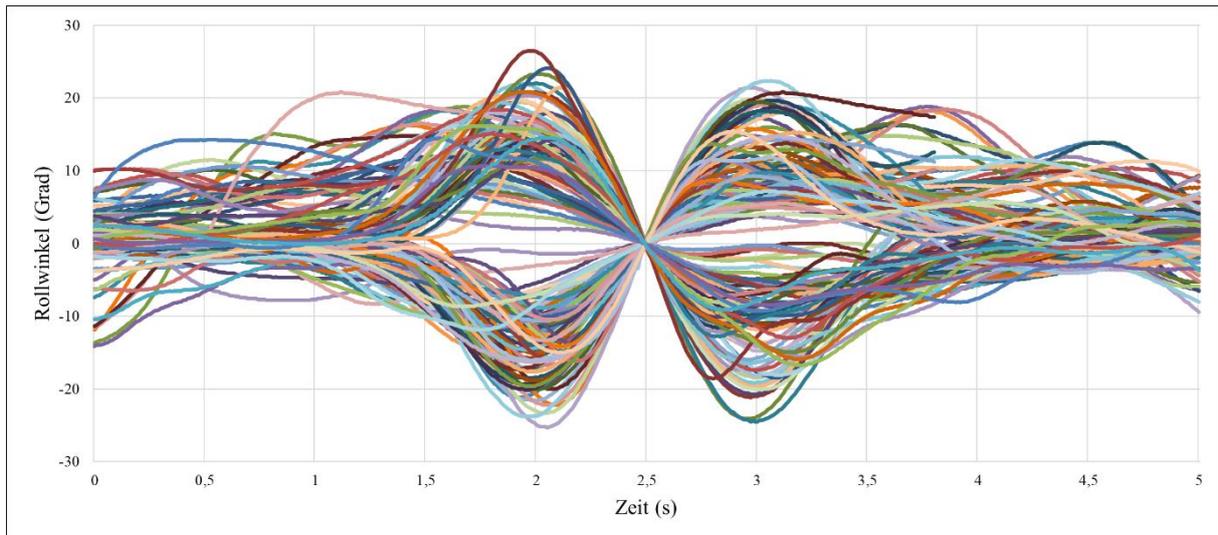


Abbildung 107: Zeitverlauf der Rollwinkel aller Versuche

Es konnte festgestellt werden, dass die erste Hälfte des Fahrstreifenwechsels beim Großteil der Versuche sehr nahe am idealen Verlauf liegt. Beim Positionieren des Motorrades in die neue Fahrspur traten jedoch häufig Abweichungen auf. Das Treffen einer Linie der Bodenmarkierung ist meist nicht mit dem ersten Einlenken erreichbar und erfordert daher wiederholt Korrekturen des Fahrers. Bei Fahrstreifenwechseln im Alltag treten diese Korrekturen nicht auf, da die genaue Position der neuen Fahrlinie nicht relevant für das Manöver ist. Daher wurde bei der mathematischen Beschreibung eines Spurwechsels bisher keine Rücksicht auf diese Lenkkorrekturen genommen.

Einen der wichtigsten Einflüsse auf den Verlauf eines Fahrstreifenwechsels stellt das Verhalten des Fahrers dar. Im Gegensatz zu fahrdynamischen Messwerten ist dafür jedoch keine messbare Größe bekannt. Es wird vermutet, dass das vom Fahrer ausgeübte Lenkmoment einen guten Parameter zur Quantifizierung der Entschlossenheit des Fahrers darstellt. Da kein Sensor für die Messung dieses Parameters vorhanden war, wurde der maximal auftretende Rollwinkel als Ersatz ausgewählt. Der Parameter „Intensität“ wurde mit einer nichtlinearen Abhängigkeit vom maximalen Rollwinkel definiert und erwies sich als zufriedenstellend. Es wird vermutet, dass der Parameter um andere Einflussgrößen erweitert werden sollte, um in den nicht von den Versuchsfahrten abgedeckten Parameterbereichen ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse liefern zu können. Daher sind Untersuchungen mit

mehreren Testfahrern und variablen Versatzbreiten in einem Geschwindigkeitsbereich von etwa 30 km/h bis 130 km/h die nächsten Ziele im Rahmen dieser Studien.

Die Dauer eines Fahrstreifenwechsels ist bei allen Manövern sehr ähnlich. Ausgedrückt in der theoretischen Manöverdauer lagen fast alle Versuche innerhalb von 3 ± 1 s, abhängig von Intensität und Versatzbreite. Interessant ist jedoch, dass die Manöverdauer weitestgehend unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit ist. Dies wird zusätzlich dadurch bestätigt, dass die analytische Formulierung der Dauer eines Fahrstreifenwechsels ohne einen Term auskommt, welcher die Fahrgeschwindigkeit berücksichtigen würde. Weiters wurden analytische Formulierungen entwickelt, welche die Berechnung eines Fahrstreifenwechsels aus den Eingangsparametern Fahrgeschwindigkeit, Versatzbreite sowie Intensität ermöglichen. Die damit erhaltenen Ergebnisse zeigen bereits große Übereinstimmung mit den gemessenen Daten und sind damit eine vielversprechende Basis für weitere Studien. Weitere Messungen mit einer größeren Teilnehmeranzahl ermöglichen zusätzlich die Optimierung der Formulierung.

Die Untersuchung der GPS Aufzeichnungen zeigte, dass die Genauigkeit der GPS-Position dafür ausreicht, die Versatzposition des Motorrads während des Fahrstreifenwechsels festzustellen. Diese Methode kann in weiteren Studien eingesetzt werden, um die Versatzbreite nicht auf definierte Abstände der Bodenmarkierungen zu beschränken.

Im Zuge der Fahrstreifenwechselversuche wurden Reaktionszeitmessungen quasi als Nebenprodukt durchgeführt. Gemessen wurde die Zeit vom Auftreten eines visuellen Signals bis zur Betätigung eines Tasters am Lenker. Zusätzlich wurde erkannt, dass die Reaktion des Fahrers auch über den Anstieg der Rollrate bewertet werden kann. Das Ergebnis der weit über 100 Reaktionszeitmessungen liegt in Tabellenform vor. Der Einsatz von nur zwei Fahrern schränkt die Allgemeinheit der Aussagen leider deutlich ein, allerdings sind weitere Untersuchungen mit einer größeren Anzahl an Probanden geplant. Abschließend kann festgehalten werden, dass in Hinsicht auf die generische und analytische Beschreibung von Fahrstreifenwechselmanövern Fortschritte erreicht werden konnten.

10. Literaturverzeichnis

- [1] S. Austria, „Statistik Austria,“ Statistik Austria, 29. 4. 2020. [Online]. Available: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/unfaelle_mit_personenschaden/index.html. [Zugriff am 15. 12. 2020].
- [2] Y. Watanabe und K. Yoshida, „Motorcycle and Recreational Vehicle Safety,“ Second International Congress On Automotive Safety, San Francisco, California, USA, 1973.
- [3] R. S. Rice, J. A. Davis und D. T. Kunkel, „Accident-Avoidance Capabilities of Motorcycles - Technical Report,“ NHTSA, Springfield, Virginia, USA, 1976.
- [4] R. S. Rice, J. A. Davis und D. T. Kunkel, „Accident-Avoidance Capabilities of Motorcycles - Appendices,“ NHTSA, Springfield, Virginia, USA, 1976.
- [5] R. S. Rice und D. T. Kunkel, „Accident-Avoidance Capabilities of Motorcycles - Lane Change Maneuver Simulation and Full-Scale Tests,“ NHTSA, Springfield, Virginia, USA, 1976.
- [6] A. Kuschefski, M. Haasper und A. Vallese, „Brake or Swerve? Or both?,“ Institute for Motorcycle Safety (ifz), Essen, Germany, 2016.
- [7] R. S. Sharp, „Motorcycle Steering Control by Road Preview,“ ASME, London, UK, 2007.
- [8] H. Ecker, „Fahr- und Unfalltechnische Versuche - Ergebnisse und Erkenntnisse vom EVU-Crashtag 2017 Neutal/Bgld,“ in *19. Abendseminar der EVU-Österreich*, Wien, 2018.
- [9] Racelogic, „Racelogic,“ o.J.. [Online]. Available: <https://www.racelogic.co.uk/>. [Zugriff am 12. 1. 2021].
- [10] 2D Meßsysteme, „2D Debus & Diebold Meßsysteme,“ o.J.. [Online]. Available: <http://2d-datarecording.com/>. [Zugriff am 11. 1. 2021].
- [11] M. Pfeiffer, „Motorradonline,“ 02. 08. 2020. [Online]. Available: <https://www.motorradonline.de/marken-modelle/ktm/1290-super-adventure-s-3/technische-daten/>. [Zugriff am 02. 08. 2020].
- [12] S. Perebner, „Analyse des Spurversatzes auf Basis von GNSS- und IMU-Messdaten,“ Projektarbeit, TU-Wien, Inst. für Mechanik und Mechatronik, Wien, Österreich, 2020.

Anhang

Ergebnisse der Fahrstreifenwechselversuche

Tabelle 10: Vollständige Ergebnistabelle der Fahrstreifenwechselversuche

Umfang	HE	SL	DNS	S5	Gesamt
n	74	36	110	57	167
Fehlerhaft	18	1	19	1	20

Fahrstreifenwechsel nach links							Fahrstreifenwechsel nach rechts						
	HE	SL	DNS	S5	Gesamt		HE	SL	DNS	S5	Gesamt		
Rollwinkel li SW li	\bar{x}	-11,44	-20,53	-14,53	-13,34	-14,10	Rollwinkel re SW re	Mittelwert	12,18	18,50	14,33	15,83	14,84
	\bar{x}	-10,70	-20,05	-13,50	-13,95	-13,70		Median	11,50	18,20	14,30	14,60	14,55
	σ	2,76	2,26	5,05	2,85	4,40		Stabw.	3,47	2,86	4,44	3,90	4,30
	MAX	-17,20	-25,30	-25,30	-19,60	-25,30		max	18,80	23,30	23,30	26,50	26,50
	MIN	-7,00	-16,70	-7,00	-7,60	-7,00		min	5,70	12,30	5,70	10,60	5,70
	Fehlerhaft	2	0	2	0	2		Fehlerhaft	2	0	2	0	2
Rollwinkel re SW li	Mittelwert	9,21	17,96	12,12	9,76	11,28	Rollwinkel li SW re	Mittelwert	-6,72	-17,58	-10,41	-11,96	-10,93
	Median	9,40	18,80	10,80	8,90	10,20		Median	-6,70	-18,25	-8,20	-11,60	-9,75
	Stabw.	3,47	3,05	5,31	2,86	4,71		Stabw.	2,67	4,44	6,17	3,16	5,38
	max	16,50	22,40	22,40	15,40	22,40		max	-11,60	-24,50	-24,50	-18,60	-24,50
	min	1,00	10,20	1,00	5,00	1,00		min	-1,90	-8,20	-1,90	-7,10	-1,90
	Fehlerhaft	1	0	1	0	1		Fehlerhaft	2	0	2	0	2
Rollrate li SW li	Mittelwert	-19,22	-45,04	-27,99	-26,66	-27,51	Rollrate re SW re	Mittelwert	11,61	37,42	20,38	32,76	24,56
	Median	-17,80	-44,17	-24,12	-26,88	-25,50		Median	9,42	40,22	16,84	28,96	24,82
	Stabw.	9,29	7,41	15,06	7,56	12,82		Stabw.	6,91	9,76	14,65	10,74	14,63
	max	-40,24	-57,80	-57,80	-41,32	-57,80		max	28,00	59,06	59,06	59,59	59,59
	min	-3,69	-33,34	-3,69	-11,84	-3,69		min	3,32	20,28	3,32	19,21	3,32
	Fehlerhaft	2	0	2	0	2		Fehlerhaft	2	0	2	0	2
Rollrate re SW li	Mittelwert	28,46	59,03	38,85	41,24	39,71	Rollrate li SW re	Mittelwert	-27,16	-52,36	-35,72	-46,32	-39,30
	Median	25,22	57,10	35,38	41,14	37,44		Median	-27,36	-55,01	-30,94	-42,74	-38,28
	Stabw.	9,73	9,25	17,42	13,23	15,99		Stabw.	8,89	14,70	16,35	12,78	15,98
	max	59,44	76,28	76,28	66,57	76,28		max	-49,76	-76,58	-76,58	-81,21	-81,21
	min	13,34	47,00	13,34	17,20	13,34		min	-12,70	-17,18	-12,70	-25,94	-12,70
	Fehlerhaft	2	0	2	0	2		Fehlerhaft	2	0	2	0	2
Theoretische Dauer SW li	Mittelwert	3,29	2,66	3,08	2,81	2,98	Theoretische Dauer SW re	Mittelwert	3,30	2,92	3,13	2,83	3,01
	Median	3,14	2,66	2,98	2,80	2,88		Median	3,40	2,80	3,00	2,80	3,00
	Stabw.	0,53	0,20	0,54	0,50	0,54		Stabw.	0,37	0,59	0,51	0,51	0,52
	max	5,04	3,04	5,04	3,80	5,04		max	4,00	4,80	4,80	4,60	4,80
	min	2,42	2,32	2,32	1,80	1,80		min	2,60	2,20	2,20	2,20	2,20
	Fehlerhaft	2	0	2	0	2		Fehlerhaft	16	1	17	1	18
mittlere Geschwindigkeit SW li	Mittelwert	56	50	54	89	67	mittlere Geschwindigkeit SW re	Mittelwert	55	48	53	90	65
	Median	54	50	54	95	57		Median	55	48	53	97	56
	Stabw.	4	3	5	18	20		Stabw.	5	3	5	18	21
	max	66	56	66	118	118		max	66	53	66	118	118
	min	50	44	44	26	26		min	46	42	42	27	27
	Fehlerhaft	2	0	2	0	2		Fehlerhaft	2	0	2	0	2
Lenkwinkel 1 SW li	Mittelwert	-0,38	-0,89	-0,55	N/A	N/A	Lenkwinkel 1 SW re	Mittelwert	-0,06	0,53	0,13	N/A	N/A
	Median	-0,40	-0,85	-0,50	N/A	N/A		Median	-0,10	0,75	-0,10	N/A	N/A
	Stabw.	0,28	0,29	0,37	N/A	N/A		Stabw.	0,31	0,56	0,50	N/A	N/A
	max	-1,10	-1,50	-1,50	N/A	N/A		max	1,00	1,20	1,20	N/A	N/A
	min	0,40	-0,40	0,40	N/A	N/A		min	-0,50	-0,50	-0,50	N/A	N/A
	Fehlerhaft	0	0	0	N/A	N/A		Fehlerhaft	0	0	0	N/A	N/A
Lenkwinkel 2 SW li	Mittelwert	1,47	3,21	2,04	N/A	N/A	Lenkwinkel 2 SW re	Mittelwert	-1,22	-2,56	-1,66	N/A	N/A
	Median	1,40	3,15	1,80	N/A	N/A		Median	-1,10	-2,50	-1,50	N/A	N/A
	Stabw.	0,49	0,54	0,96	N/A	N/A		Stabw.	0,47	0,59	0,81	N/A	N/A
	max	2,80	4,30	4,30	N/A	N/A		max	-2,10	-3,50	-3,50	N/A	N/A
	min	0,70	2,40	0,70	N/A	N/A		min	-0,10	-1,50	-0,10	N/A	N/A
	Fehlerhaft	0	0	0	N/A	N/A		Fehlerhaft	0	0	0	N/A	N/A
Lenkwinkel 3 SW li	Mittelwert	-0,99	-2,27	-1,41	N/A	N/A	Lenkwinkel 3 SW re	Mittelwert	0,76	2,71	1,40	N/A	N/A
	Median	-1,00	-2,20	-1,20	N/A	N/A		Median	0,80	2,80	1,00	N/A	N/A
	Stabw.	0,35	0,46	0,71	N/A	N/A		Stabw.	0,30	0,66	1,02	N/A	N/A
	max	-1,90	-3,40	-3,40	N/A	N/A		max	1,30	3,80	3,80	N/A	N/A
	min	-0,40	-1,60	-0,40	N/A	N/A		min	0,10	1,20	0,10	N/A	N/A
	Fehlerhaft	0	0	0	N/A	N/A		Fehlerhaft	0	0	0	N/A	N/A
Querbeschleunigung li SW li	Mittelwert	-0,99	-1,76	-1,24	-0,15	-0,86	Querbeschleunigung re SW re	Mittelwert	0,53	1,05	0,70	0,17	0,53
	Median	-0,98	-1,71	-1,10	-0,15	-0,86		Median	0,52	1,09	0,67	0,15	0,43
	Stabw.	0,24	0,35	0,46	0,05	0,64		Stabw.	0,26	0,31	0,37	0,08	0,39
	max	-1,59	-2,48	-2,48	-0,30	-2,48		max	1,05	1,53	1,53	0,09	-0,16
	min	-0,55	-1,14	-0,55	-0,07	-0,07		min	-0,16	0,30	-0,16	0,38	1,53
	Fehlerhaft	0	0	0	0	0		Fehlerhaft	0	0	0	0	0
Querbeschleunigung re SW li	Mittelwert	0,53	1,01	0,69	0,14	0,49	Querbeschleunigung li SW re	Mittelwert	-0,62	-1,34	-0,85	-0,16	-0,63
	Median	0,49	1,02	0,68	0,12	0,36		Median	-0,61	-1,38	-0,73	-0,16	-0,58
	Stabw.	0,27	0,17	0,33	0,07	0,38		Stabw.	0,17	0,42	0,44	0,07	0,49
	max	1,44	1,39	1,44	0,37	1,44		max	-1,10	-2,14	-2,14	-0,06	-0,06
	min	0,17	0,66	0,17	0,04	0,04		min	-0,29	-0,60	-0,29	-0,43	-2,14
	Fehlerhaft	0	0	0	0	0		Fehlerhaft	0	0	0	0	0
Gierrate li SW li	Mittelwert	11,19	23,44	15,20	2,25	10,63	Gierrate re SW re	Mittelwert	-8,96	-17,30	-11,69	-2,94	-8,81
	Median	11,11	21,85	13,30	1,83	8,60		Median	-8,71	-17,54	-10,77	-2,65	-7,36
	Stabw.	3,40	3,71	6,73	1,51	8,27		Stabw.	3,54	4,24	5,44	1,30	6,11
	max	19,03	31,23	31,23	7,81	31,23		max	-15,92	-24,30	-24,30	-0,73	0,34
	min	5,75	18,83	5,75	-0,17	-0,17		min	0,34	-8,21	0,34	-6,43	-24,30
	Fehlerhaft	0	0	0	0	0		Fehlerhaft	0	0	0	0	0
Gierrate re SW li	Mittelwert	-7,98	-16,31	-10,70	-1,96	-7,62	Gierrate li SW re	Mittelwert	6,59	19,71	10,89	1,31	7,73
	Median	-7,42	-16,59	-9,17	-1,55	-6,51		Median	6,36	20,12	8,01	1,67	6,13
	Stabw.	3,13	3,03	4,99	2,19	5,94		Stabw.	2,26	4,83	7,00	1,54	7,34
	max	-15,92	-22,43	-22,43	-8,67	-22,43		max	10,99	28,20	28,20	-1,72	-1,72
	min	-3,00	-11,05	-3,00	0,56	0,56		min	0,48	8,05	0,48	4,19	28,20
	Fehlerhaft	0	0	0	0	0		Fehlerhaft	0	0	0	0	0

Ergebnistabellen der Reaktionszeitmessungen

Tabelle 11: Reaktionszeitversuche 0809_HE_1

Versuchsfahrt 0809_HE_1					
Versuchsbezeichnung	Zeitpunkt Signal	Zeitpunkt Taster	Reaktionszeit Taster	Zeitpunkt Rollrate	Reaktionszeit Rollrate
0809_HE_1_01	08:06:41,200	08:06:41,830	0,63	08:06:41,700	0,50
0809_HE_1_02	08:06:58,200	08:06:59,560	1,36	08:06:59,500	1,30
0809_HE_1_03	08:07:14,200	08:07:14,970	0,77	08:07:15,100	0,90
0809_HE_1_04	08:09:18,600	08:09:19,470	0,87	08:09:19,200	0,60
0809_HE_1_05	08:09:52,900	08:09:53,410	0,51	08:09:53,400	0,50
0809_HE_1_06	08:11:13,300	08:11:13,960	0,66	08:11:13,800	0,50
0809_HE_1_07	08:11:30,000	08:11:30,660	0,66	08:11:30,600	0,60
0809_HE_1_08	08:11:49,900	08:11:50,770	0,87	08:11:50,600	0,70
0809_HE_1_09	08:13:47,200	08:13:47,470	0,27	08:13:47,500	0,30
0809_HE_1_10	08:14:05,800	08:14:06,520	0,72	08:14:06,400	0,60
0809_HE_1_11	08:14:22,900	08:14:24,480	1,58	08:14:24,400	1,50
0809_HE_1_12	08:16:07,600	08:16:18,630	N/A	08:16:08,000	0,40
0809_HE_1_13	08:16:17,200	08:16:18,630	1,43	08:16:18,500	1,30
0809_HE_1_14	08:16:32,900	08:16:33,730	0,83	08:16:33,600	0,70
0809_HE_1_15	08:18:19,500	08:18:20,360	0,86	08:18:20,400	0,90
0809_HE_1_16	08:18:33,200	08:18:33,970	0,77	08:18:34,000	0,80
0809_HE_1_17	08:18:51,000	08:18:51,470	0,47	08:18:51,500	0,50

Tabelle 12: Reaktionszeitversuche 0809_HE_2

Versuchsfahrt 0809_HE_2					
Versuchs- bezeichnung	Zeitpunkt Signal	Zeitpunkt Taster	Reaktionszeit Taster	Zeitpunkt Rollrate	Reaktionszeit Rollrate
0809_HE_2_01	09:35:56,500	09:35:57,140	0,64	09:35:57,100	0,60
0809_HE_2_02	09:36:11,300	09:36:11,780	0,48	09:36:12,300	1,00
0809_HE_2_03	09:36:46,500	09:36:47,800	1,30	09:36:47,500	1,00
0809_HE_2_04	09:38:46,200	09:38:47,670	1,47	09:38:47,500	1,30
0809_HE_2_05	09:39:04,200	09:39:04,980	0,78	09:39:04,900	0,70
0809_HE_2_06	09:40:26,600	09:40:27,060	0,46	09:40:27,000	0,40
0809_HE_2_07	09:40:59,900	09:41:00,750	0,85	09:41:00,600	0,70
0809_HE_2_08	09:43:50,800	09:43:51,340	0,54	09:43:51,400	0,60
0809_HE_2_09	09:44:18,700	09:44:19,230	0,53	09:44:19,200	0,50
0809_HE_2_10	09:45:28,800	09:45:29,360	0,56	09:45:29,300	0,50
0809_HE_2_11	09:45:42,700	09:45:43,630	0,93	09:45:43,200	0,50
0809_HE_2_12	09:46:20,400	09:46:21,860	1,46	09:46:21,900	1,50
0809_HE_2_13	09:47:43,000	09:47:43,810	0,81	09:47:44,000	1,00
0809_HE_2_14	09:47:53,100	09:47:53,640	0,54	09:47:53,600	0,50
0809_HE_2_15	09:48:07,600	09:48:08,170	0,57	09:48:08,100	0,50
0809_HE_2_16	09:50:17,600	09:50:18,170	0,57	09:50:18,200	0,60
0809_HE_2_17	09:50:27,700	09:50:28,430	0,73	09:50:29,200	1,50
0809_HE_2_18	09:50:54,400	09:50:54,990	0,59	09:50:55,000	0,60
0809_HE_2_19	09:53:02,700	09:53:03,250	0,55	09:53:03,200	0,50
0809_HE_2_20	09:53:16,200	09:53:16,720	0,52	09:53:16,700	0,50

Tabelle 13: Reaktionszeitversuche 0809_SL_1

Versuchsfahrt 0809_SL_1					
Versuchs- bezeichnung	Zeitpunkt Signal	Zeitpunkt Taster	Reaktionszeit Taster	Zeitpunkt Rollrate	Reaktionszeit Rollrate
0809_SL_1_01	10:34:04,300	10:34:04,710	0,41	10:34:04,700	0,40
0809_SL_1_02	10:34:18,100	10:34:18,570	0,47	10:34:18,600	0,50
0809_SL_1_03	10:37:00,300	10:37:00,660	0,36	10:37:00,700	0,40
0809_SL_1_04	10:37:09,300	10:37:10,140	0,84	10:37:10,200	0,90
0809_SL_1_05	10:37:18,100	10:37:18,500	0,40	10:37:18,500	0,40
0809_SL_1_06	10:38:55,500	10:38:56,120	0,62	10:38:56,100	0,60
0809_SL_1_07	10:39:04,100	10:39:04,560	0,46	10:39:04,600	0,50
0809_SL_1_08	10:39:11,200	10:39:11,910	0,71	10:39:12,000	0,80
0809_SL_1_09	10:39:19,400	10:39:19,950	0,55	10:39:20,000	0,60
0809_SL_1_10	10:39:32,600	10:39:32,940	0,34	10:39:33,000	0,40
0809_SL_1_11	10:42:32,600	10:42:32,980	0,38	10:42:33,000	0,40
0809_SL_1_12	10:42:39,800	10:42:40,650	0,85	10:42:40,600	0,80
0809_SL_1_13	10:44:33,500	10:44:34,030	0,53	10:44:34,100	0,60
0809_SL_1_14	10:47:27,700	10:47:27,700	N/A	10:47:28,200	0,50
0809_SL_1_15	10:47:34,400	10:47:34,400	N/A	10:47:34,800	0,40
0809_SL_1_16	10:47:48,400	10:47:48,820	0,42	10:47:48,800	0,40
0809_SL_1_17	10:47:58,900	10:47:59,450	0,55	10:47:59,500	0,60
0809_SL_1_18	10:48:13,000	10:48:13,530	0,53	10:48:13,500	0,50

Tabelle 14: Reaktionszeitversuche 0809_SL_2

Versuchsfahrt 0809_SL_2					
Versuchsbezeichnung	Zeitpunkt Signal	Zeitpunkt Taster	Reaktionszeit Taster	Zeitpunkt Rollrate	Reaktionszeit Rollrate
0809_SL_2_01	12:39:31,800	12:39:32,880	1,08	N/A	N/A
0809_SL_2_02	12:39:47,600	12:39:48,120	0,52	N/A	N/A
0809_SL_2_03	12:40:15,600	12:40:16,210	0,61	N/A	N/A
0809_SL_2_04	12:40:48,700	12:40:49,370	0,67	N/A	N/A
0809_SL_2_05	12:41:01,600	12:41:02,070	0,47	N/A	N/A
0809_SL_2_06	12:42:04,600	12:42:13,320	N/A	N/A	N/A
0809_SL_2_07	12:42:16,200	12:42:16,790	0,59	N/A	N/A
0809_SL_2_08	12:42:31,700	12:42:32,740	1,04	N/A	N/A
0809_SL_2_09	12:43:12,900	12:43:13,400	0,50	N/A	N/A
0809_SL_2_10	12:44:11,900	12:44:12,560	0,66	N/A	N/A
0809_SL_2_11	12:44:39,800	12:44:40,400	0,60	N/A	N/A
0809_SL_2_12	12:44:50,000	12:44:50,670	0,67	N/A	N/A
0809_SL_2_13	12:48:18,100	12:48:18,540	0,44	N/A	N/A
0809_SL_2_14	12:48:29,500	12:48:30,260	0,76	N/A	N/A
0809_SL_2_15	12:48:48,500	12:48:49,220	0,72	N/A	N/A
0809_SL_2_16	12:49:11,000	12:49:11,470	0,47	N/A	N/A
0809_SL_2_17	12:49:28,900	12:49:29,610	0,71	N/A	N/A
0809_SL_2_18	12:50:14,100	12:50:14,100	N/A	N/A	N/A
0809_SL_2_19	12:51:21,600	12:51:22,130	0,53	N/A	N/A
0809_SL_2_20	12:51:36,800	12:51:37,320	0,52	N/A	N/A
0809_SL_2_21	12:51:46,400	12:51:47,660	1,26	N/A	N/A
0809_SL_2_22	12:51:55,900	12:51:57,010	1,11	N/A	N/A
0809_SL_2_23	12:52:13,600	12:52:14,680	1,08	N/A	N/A
0809_SL_2_24	12:52:21,900	12:52:22,710	0,81	N/A	N/A
0809_SL_2_25	12:53:17,600	12:53:18,190	0,59	N/A	N/A
0809_SL_2_26	12:53:38,800	12:53:39,280	0,48	N/A	N/A
0809_SL_2_27	12:53:59,500	12:53:59,990	0,49	N/A	N/A
0809_SL_2_28	12:54:58,200	12:54:58,810	0,61	N/A	N/A
0809_SL_2_29	12:55:36,800	12:55:37,430	0,63	N/A	N/A
0809_SL_2_30	12:55:55,800	12:55:56,290	0,49	N/A	N/A
0809_SL_2_31	12:56:24,600	12:56:25,050	0,45	N/A	N/A

Tabelle 15: Reaktionszeitversuche 0909_HE_3

Versuchsfahrt 0909_HE_3					
Versuchs- bezeichnung	Zeitpunkt Signal	Zeitpunkt Taster	Reaktionszeit Taster	Zeitpunkt Rollrate	Reaktionszeit Rollrate
0909_HE_3_01	16:13:05,300	N/A	N/A	N/A	N/A
0909_HE_3_02	16:13:19,400	16:13:19,970	0,57	N/A	N/A
0909_HE_3_03	16:13:32,900	16:13:33,530	0,63	N/A	N/A
0909_HE_3_04	16:13:59,500	16:14:00,080	0,58	N/A	N/A
0909_HE_3_05	16:14:14,600	16:14:15,220	0,62	N/A	N/A
0909_HE_3_06	16:15:24,800	16:15:25,440	N/A	N/A	N/A
0909_HE_3_07	16:15:47,500	16:15:48,080	0,58	N/A	N/A
0909_HE_3_08	16:15:55,700	16:15:56,400	0,70	N/A	N/A
0909_HE_3_09	16:16:19,000	N/A	N/A	N/A	N/A
0909_HE_3_10	16:16:36,800	16:16:37,590	0,79	N/A	N/A
0909_HE_3_11	16:17:01,400	16:17:02,010	0,61	N/A	N/A
0909_HE_3_12	16:17:08,800	16:17:09,310	0,51	N/A	N/A
0909_HE_3_13	16:17:21,500	16:17:22,000	0,50	N/A	N/A
0909_HE_3_14	16:17:44,800	N/A	N/A	N/A	N/A
0909_HE_3_15	16:18:19,400	16:18:20,050	0,65	N/A	N/A
0909_HE_3_16	16:18:49,800	16:18:50,500	0,70	N/A	N/A
0909_HE_3_17	16:19:05,900	16:19:06,510	0,61	N/A	N/A
0909_HE_3_18	16:19:30,000	16:19:30,580	N/A	N/A	N/A
0909_HE_3_19	16:20:19,600	16:20:20,120	0,52	N/A	N/A
0909_HE_3_20	16:21:09,100	N/A	N/A	N/A	N/A
0909_HE_3_21	16:21:36,800	16:21:37,410	0,61	N/A	N/A
0909_HE_3_22	16:22:26,700	16:22:27,380	0,68	N/A	N/A
0909_HE_3_23	16:22:49,300	16:22:49,870	0,57	N/A	N/A
0909_HE_3_24	16:24:48,300	16:24:48,920	0,62	N/A	N/A
0909_HE_3_25	16:25:34,100	16:25:34,880	0,78	N/A	N/A
0909_HE_3_26	16:28:10,500	16:28:11,050	0,55	N/A	N/A
0909_HE_3_27	16:29:49,700	N/A	N/A	N/A	N/A
0909_HE_3_28	16:30:51,400	N/A	N/A	N/A	N/A
0909_HE_3_29	16:31:10,400	16:31:10,860	0,46	N/A	N/A
0909_HE_3_30	16:31:20,500	16:31:21,130	0,63	N/A	N/A
0909_HE_3_31	16:32:04,200	16:32:04,880	0,68	N/A	N/A
0909_HE_3_32	16:32:31,300	16:32:31,980	0,68	N/A	N/A
0909_HE_3_33	16:32:39,800	16:32:40,350	0,55	N/A	N/A
0909_HE_3_34	16:32:46,600	16:32:47,200	0,60	N/A	N/A
0909_HE_3_35	16:32:55,700	16:32:56,200	0,50	N/A	N/A
0909_HE_3_36	16:33:03,900	16:33:04,590	0,69	N/A	N/A
0909_HE_3_37	16:33:13,800	16:33:14,470	0,67	N/A	N/A
0909_HE_3_38	16:33:31,400	16:33:31,970	0,57	N/A	N/A
0909_HE_3_39	16:34:32,000	16:34:32,560	0,56	N/A	N/A
0909_HE_3_40	16:45:38,600	16:45:39,700	1,10	N/A	N/A

Tabelle 15: Reaktionszeitversuche 0909_HE_3 (Fortsetzung)

0909_HE_3_41	16:45:50,300	16:45:50,970	0,67	N/A	N/A
0909_HE_3_42	16:45:58,700	16:45:59,210	0,51	N/A	N/A
0909_HE_3_43	16:46:11,600	16:46:12,130	0,53	N/A	N/A
0909_HE_3_44	16:46:20,900	16:46:21,470	0,57	N/A	N/A
0909_HE_3_45	16:46:52,200	16:46:52,670	0,47	N/A	N/A
0909_HE_3_46	16:47:01,800	16:47:02,440	0,64	N/A	N/A
0909_HE_3_47	16:47:36,200	16:47:37,030	0,83	N/A	N/A
0909_HE_3_48	16:47:57,400	16:47:57,960	0,56	N/A	N/A
0909_HE_3_49	16:48:09,700	16:48:10,290	0,59	N/A	N/A
0909_HE_3_50	16:48:32,500	16:48:32,960	0,46	N/A	N/A
0909_HE_3_51	16:48:45,100	16:48:45,500	0,40	N/A	N/A
0909_HE_3_52	16:49:24,800	16:49:25,510	0,71	N/A	N/A
0909_HE_3_53	16:49:37,300	16:49:37,860	0,56	N/A	N/A
0909_HE_3_54	16:49:46,200	16:49:46,870	0,67	N/A	N/A
0909_HE_3_55	16:50:55,000	16:50:55,500	0,50	N/A	N/A
0909_HE_3_56	16:51:40,300	16:51:40,800	0,50	N/A	N/A
0909_HE_3_57	16:52:12,600	16:52:13,180	0,58	N/A	N/A
0909_HE_3_58	16:52:52,800	16:52:53,330	0,53	N/A	N/A
0909_HE_3_59	16:53:10,800	16:53:11,940	1,14	N/A	N/A
0909_HE_3_60	16:56:14,100	16:56:14,730	0,63	N/A	N/A
0909_HE_3_61	16:56:27,500	16:56:27,960	0,46	N/A	N/A
0909_HE_3_62	16:56:35,200	16:56:35,740	0,54	N/A	N/A
0909_HE_3_63	16:57:03,300	16:57:03,930	0,63	N/A	N/A
0909_HE_3_64	16:57:12,400	16:57:13,010	0,61	N/A	N/A
0909_HE_3_65	16:57:31,500	16:57:31,980	0,48	N/A	N/A
0909_HE_3_66	16:58:03,900	16:58:04,530	0,63	N/A	N/A
0909_HE_3_67	16:59:37,000	16:59:37,450	0,45	N/A	N/A
0909_HE_3_68	16:59:54,900	16:59:56,100	1,20	N/A	N/A
0909_HE_3_69	17:01:10,900	17:01:11,390	0,49	N/A	N/A
0909_HE_3_70	17:06:19,900	17:06:19,900	N/A	N/A	N/A
0909_HE_3_71	17:06:49,100	17:06:49,540	0,44	N/A	N/A
0909_HE_3_72	17:08:39,900	17:08:40,440	0,54	N/A	N/A
0909_HE_3_73	17:08:48,500	17:08:49,140	0,64	N/A	N/A
0909_HE_3_74	17:09:12,200	17:09:12,710	0,51	N/A	N/A
0909_HE_3_75	17:09:31,800	17:09:32,410	0,61	N/A	N/A
0909_HE_3_76	17:09:48,400	17:09:48,930	0,53	N/A	N/A
0909_HE_3_77	17:12:14,400	17:12:14,910	0,51	N/A	N/A
0909_HE_3_78	17:12:26,800	17:12:28,130	1,33	N/A	N/A
0909_HE_3_79	17:13:13,300	17:13:14,110	0,81	N/A	N/A
0909_HE_3_80	17:13:23,700	17:13:24,170	0,47	N/A	N/A
0909_HE_3_81	17:13:38,500	17:13:39,110	0,61	N/A	N/A
0909_HE_3_82	17:14:08,000	17:14:08,480	0,48	N/A	N/A
0909_HE_3_83	17:14:18,800	17:14:19,290	0,49	N/A	N/A
0909_HE_3_84	17:14:35,500	17:14:36,230	0,73	N/A	N/A

Tabelle 15: Reaktionszeitversuche 0909_HE_3 (Fortsetzung)

0909_HE_3_85	17:14:41,100	17:14:41,760	0,66	N/A	N/A
0909_HE_3_86	17:14:51,400	17:14:51,910	0,51	N/A	N/A
0909_HE_3_87	17:15:00,900	17:15:01,320	0,42	N/A	N/A
0909_HE_3_88	17:16:04,100	17:16:04,690	0,59	N/A	N/A
0909_HE_3_89	17:16:19,400	17:16:19,960	0,56	N/A	N/A