



Fahrversuche und Analyse des Fahrstreifenwechsels mit Motorrädern

Stefan Litschauer, Horst Ecker

Technische Universität Wien

Getreidemarkt 9 / E325, A-1060 Wien, Österreich

Kontakt: horst.ecker@tuwien.ac.at

Kurzfassung

Ein grundlegendes Verständnis des Fahrmanövers „Fahrstreifenwechsel“ ist aus mehreren Gründen wesentlich und wichtig, nicht zuletzt, wenn andere Verkehrsteilnehmer, insbesondere autonom gelenkte Fahrzeuge, ihr Fahrverhalten auf das des einspurigen Fahrzeuges abstimmen müssen. Mit dieser Arbeit soll hierzu ein Beitrag geleistet werden.

Dazu wurden mit einem instrumentierten Motorrad mehr als 100 Fahrstreifenwechselmanöver im öffentlichen Verkehr durchgeführt und fahrgedynamische Parameter gemessen und aufgezeichnet. Der Geschwindigkeitsbereich lag zwischen 40km/h und 100km/h, der seitliche Versatz bei den Fahrstreifenwechsel betrug zwischen einer halben und einer Fahrstreifenbreite.

Die Auswertung der Daten der Messfahrten erfolgte primär anhand der Zeitsignale von Rollwinkel und Rollwinkelgeschwindigkeit. Mittels statistischer Datenanalyse konnten Abhängigkeiten der Maximalwerte der genannten Messgrößen erkannt werden. Dadurch war es möglich, zu jedem Manöver einen Parameter „Intensität“ anzugeben, der als skaliertes Wert die Vehemenz/Agilität/Ambitioniertheit angibt, mit der der Fahrer das Manöver gefahren ist.

Ein wesentliches Ergebnis der Studie ist, dass die Messkurven durch synthetische Signalverläufe angenähert werden können. Wegen der vergleichsweise hohen Anzahl von Versuchen gelingt mittels Regressionsverfahren die Optimierung der Parameter dieser analytischen Funktionen. Dadurch kann ein mathematisches Modell des Fahrstreifenwechsels angegeben werden, welches in verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden kann.

Quasi als Nebenprodukt wurde auch die Zeitdauer bis zum Einsetzen einer Lenkreaktion der Fahrer auf ein visuelles Signal erfasst. Damit kann nunmehr auch die anzunehmende Reaktionszeit für ein Ausweichmanöver eines einspurigen Kraftfahrzeuges genauer angegeben werden als bisher.

Abstract

A basic understanding of the driving maneuver “lane change” is important for several reasons. One of them concerns other road users, especially autonomously driven vehicles, which need to be able to anticipate the next actions of a single-lane vehicle in order to avoid traffic conflicts.

To contribute to the ongoing research, more than 100 lane change maneuvers were carried out in public traffic with an instrumented motorcycle. The dynamic parameters of the motorcycle were measured and recorded. The speed range covered was between 40km/h and 100km/h, the lateral offset when changing lanes was either a half or a full lane width.

The evaluation of the measured data from the test runs was primarily based on the time signals of the roll angle and the roll rate. By statistical data analysis, it was possible to identify relations between the peak values of the measured signals and other parameters. This made it possible to specify a parameter, termed “intensity”, to describe and quantify the vehemence / agility / ambition that the driver used when performing the maneuver.

A key result of the study is that the measured signals can be approximated by using synthetic functions. Because of the comparatively high number of tests, the parameters of these analytical representations can be optimized using regression methods. In this way, a mathematical model of the lane change maneuver can be specified, which can be used in various applications.

The time until the driver started to react to a visual signal was also recorded as a “by-product”. The reaction time for an evasive maneuver that can be assumed was analyzed and better data than before are now available.

1. Einführung

Den Fahrstreifen zu wechseln ist an und für sich ein alltägliches Fahrmanöver, für Lenker von einspurigen wie auch von mehrspurigen Fahrzeugen. Je nach Fahrzeug und Verkehrssituation kann das Manöver von eher langsam bis hoch-dynamisch gefahren werden. Für Fahrer von Motorrädern ist ein zügiger bis schneller Fahrstreifenwechsel auch ein Ausdruck des Fahrvergnügens. Gelegentlich ist aber ein seitliches Ausweichmanöver, welches sehr viele Gemeinsamkeiten mit einem regulären Fahrstreifenwechsel hat, notwendig, um einen Unfall zu vermeiden. Dann geht es natürlich nicht um die Freude am Beherrschen des eigenen Motorrads, sondern primär darum, die schwerwiegenden Konsequenzen einer Kollision mit einem Unfallgegner (auch) für die eigene Person zu vermeiden.

Im Gegensatz zu mehrspurigen Kraftfahrzeugen besteht bei einspurigen Krafrädern nämlich die zumindest theoretische Möglichkeit, durch ein beherztes Auslenken und Umfahren eines Hindernisses eine Kollision zu vermeiden. Diese Option ist mehrspurigen Fahrzeugen meist verwehrt, weil diese wesentlich breiter sind und beim Ausweichen auf die Fahrbahn des gegenläufigen Fahrstreifens ein erhöhtes Unfallrisiko besteht.

Das schnelle Ausweichen zur Unfallvermeidung stellt daher quasi den Extremfall eines Fahrstreifenwechsels dar und ist nur die alternative Möglichkeit der Unfallvermeidung für Motorradfahrer. Die andere und mit allen Fahrzeugen zur Verfügung stehende Möglichkeit ist natürlich die einer entsprechend starken Bremsung. Wegen dieser beiden, grundlegend verschiedenen, Möglichkeiten als Motorradfahrer in einer Gefahrensituation zu reagieren, wurde insbesondere das fahrdynamisch schwieriger auszuführende und auch theoretisch komplexere Ausweichmanöver schon vor etlichen Jahren Gegenstand von Forschungsarbeiten.

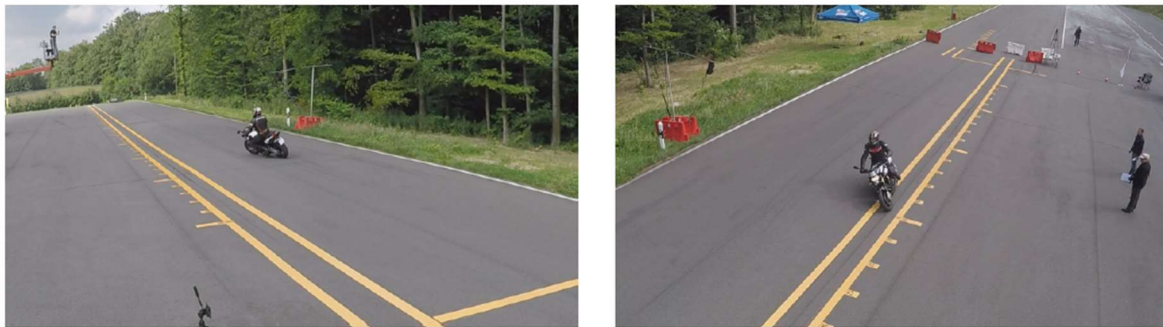


Bild 1: Versuchsanordnung zum Fahrstreifenwechsel (3,5m Spurversatz) auf einem Versuchsgelände wie von Kuschefski et al in [4] verwendet.

Bekannt sind aus dieser Zeit insbesondere die Arbeiten von Watanabe et al. So war zum Beispiel [1] eine der ersten Publikationen, in der Ausweichmanöver zur Kollisionsvermeidung mit einem unbeweglichen Hindernis experimentell untersucht wurden. Dabei stand jedoch der Gewinn an seitlichem Versatz in Relation zur zurückgelegten Fahrstrecke im Vordergrund, und die Fahrlinie nach dem Passieren des Hindernisses wurde nicht berücksichtigt. Wegen dieser fehlenden Ausrichtung der Fahrlinie an den Fahrbahnverlauf nach dem Hindernis sind diese Studien nur bedingt mit einem Fahrstreifenwechsel zu vergleichen. Frühe experimentelle Studien zu einem vollständigen Fahrstreifenwechsel sind in [2] und [3] beschrieben. In jüngerer Zeit führte Kuschefski et al in [4] eine sehr umfassende experimentelle Studie durch, in der

auch die bereits in [1] gestellte Frage aufgegriffen wurde, ob Bremsen oder Ausweichen bei der Unfallvermeidung wirksamer ist.

Mittlerweile ist aber auch das wissenschaftliche Interesse an einem „normalen“ Fahrstreifenwechsel ohne Unfallvermeidungsabsicht gestiegen. Dafür gibt es mehrere Gründe. Für die Überprüfung und Validierung von fahrdynamischen Modellen für Fahrer&Motorrad eignet sich dieses hoch-dynamische Fahrmanöver besonders gut. Weiters besteht eine zunehmende Nachfrage nach Modellen für humangelenkte Motorräder zur Anwendung in Simulationsumgebungen. Da im Straßenverkehr der Zukunft ein erheblicher Wandel stattfinden wird, insbesondere durch das Aufkommen des autonomen Fahrens von Personenkraftwagen, müssen wichtige Fragen zu heterogenen Verkehrssystemen beantwortet werden. Für die Regelung eines autonom gelenkten Fahrzeugs muss das Verhalten eines nicht-autonom geführten Fahrzeugs wie es das Motorrad stets sein wird, vorausberechenbar sein. Daher werden validierte Motorrad-Fahrermodelle benötigt, um die Modellierung des gesamten Systems voranzutreiben.

Schließlich ist dieses Fahrmanöver auch für die Unfallforschung bedeutend, wie schon am Beginn dieser Einleitung ausgeführt wurde. Da die Unfallzahlen in der Kategorie „Unfälle mit Motorrädern“ in den letzten Jahren (zumindest in Österreich) auf relativ hohem Niveau liegen, bedarf es weiterer Anstrengungen, einen Abwärtstrend zu initiieren. Nun ist zwar der Fahrstreifenwechsel per se nicht jenes Manöver bei dem Motorradfahrer häufig verunglücken, aber für andere Verkehrsteilnehmer stellen die raschen Positionsänderungen zu welchen ein Motorradfahrer, auch unter Einhaltung der Verkehrsvorschriften, in der Lage ist, eine Herausforderung dar. Insbesondere in Verkehrssituationen, bei denen sich ein Motorrad von hinten einem anderen, langsameren Verkehrsteilnehmer nähert, und dieser die Annäherung nur indirekt über Spiegelsysteme bemerken kann.

Der Umstand, dass in jüngster Zeit keine entsprechenden Forschungsarbeiten durchgeführt wurden, obwohl es dafür einen aktuellen Bedarf gibt, hat die Autoren dieser Studie motiviert, eine Reihe von Fahrstreifenwechselmanöver mit einem Messmotorrad durchzuführen, messtechnisch zu erfassen und auszuwerten.

2. Das Mess-Motorrad

Für diese Studie stand ein in den letzten Jahren aufgebautes Messmotorrad zur Verfügung, welches schon in anderen Forschungsprojekten zum Einsatz kam [10]. Es handelt sich um eine KTM 1290 Super Adventure mit regulärer Straßenzulassung, sodass Fahrten im öffentlichen Verkehr möglich sind. Das Modell ist schon werksseitig mit zahlreichen Sensoren ausgestattet, die von den Fahrerassistenzsystemen (kombiniertes ABS, Traktionskontrolle, Stabilitätskontrolle, Tempomat) benötigt und verwendet werden. Die für diese Funktionen benötigten On-Board-Sensoren umfassen Raddrehzahlsensoren, eine 5-Achsen-Trägheitsmesseinheit (IMU), einen Drosselklappenstellungssensor und vieles mehr. Alle Sensoren kommunizieren über einen CAN-Bus.

Trotz der umfangreichen On-board-Sensorik des serienmäßigen Modells, wurden zusätzliche Messaufnehmer hinzugefügt. Wichtige Ergänzungen waren die Positionsmessung mittels GPS-Antennen und –Empfängers, sowie ein Lenkwinkelsensor der am Vorderradsystem angebracht

war. Außerdem wurden zwei Auslöseschalter an den beiden Griffen am Lenker installiert, um den zeitlichen Beginn einer Lenkaktion durch den Fahrer genau zu erfassen. Zusätzliche vollständige 6-Achsen-IMUs wurden aus Qualitätsgründen und aus Gründen der Redundanz eingebaut. Eine CAN-Bus-Schnittstelle ermöglichte den Zugriff auf die Fahrzeugsensoren. Mittels zweier unabhängiger und leistungsstarker Datenlogger wurden die zahlreichen Messsignale aufgezeichnet.

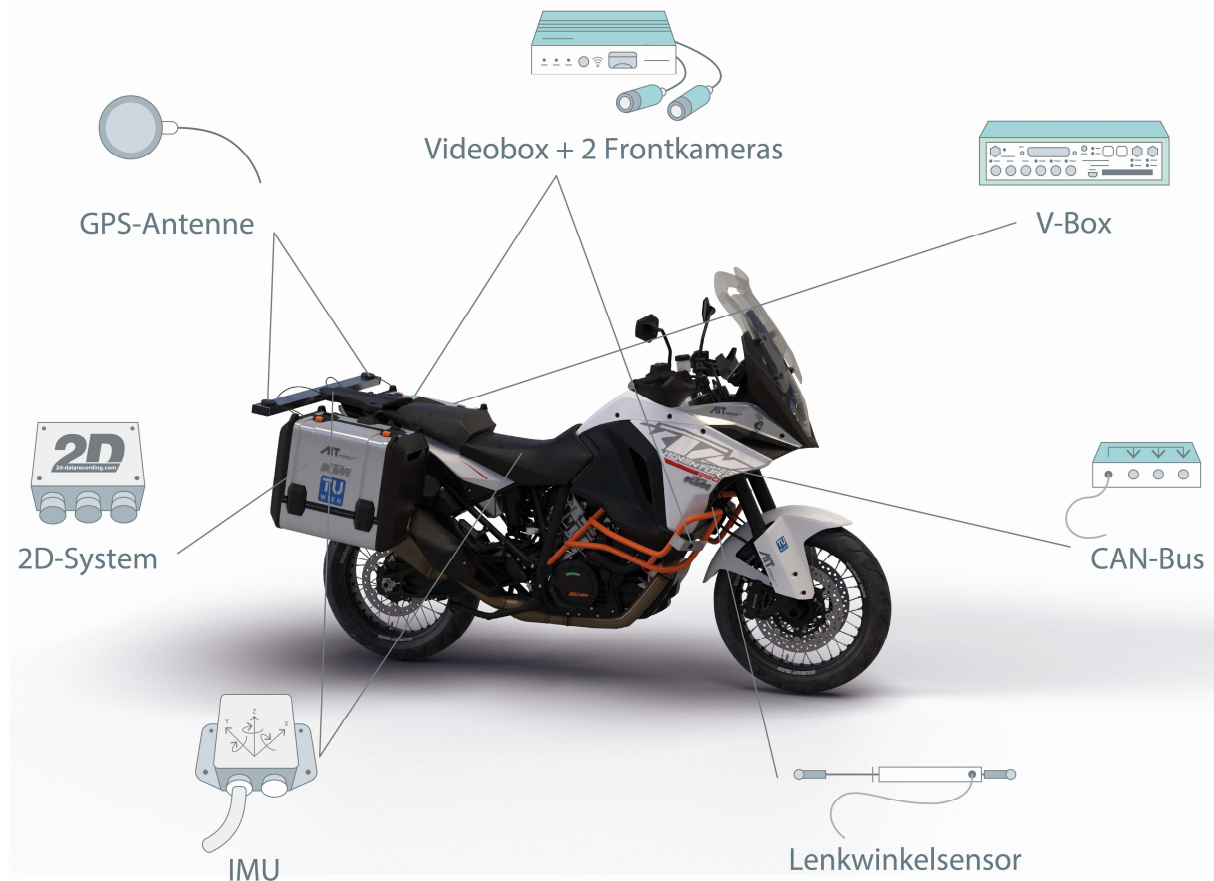


Bild 2: Messfahrzeug KTM 1290 Super Adventure mit zusätzlich eingebauten Messsystemen, siehe [10].

Um auch Video-Aufzeichnungen der Fahrmanöver zu ermöglichen, wurde zwei Video-Cams relativ niedrig links und rechts an den Schutzbügeln montiert. Diese beiden Kameras waren in Fahrtrichtung ausgerichtet und zeigten die Fahrbahn links bzw. rechts des ebenfalls gefilmten Vorderrades, siehe Bild 3. Diese Video-Aufzeichnungen waren sehr wichtig für die Beurteilung des erreichten Fahrspurversatzes, da eine genaue Messung der Seitenposition nicht möglich war. Die GPS-Signale lieferten zwar recht gute Ergebnisse, jedoch war die Positionsgenauigkeit nicht gleichbleibend hoch. Die Verwendung von D-GPS war nicht möglich, da die Messfahrten im öffentlichen Verkehr, insbesondere auch auf Autobahnen erfolgte und daher die Entfernung zu der dabei erforderlichen Basisstation viel zu groß geworden wäre. Das Problem der Messung des Spurwechselversatzes wurde jedoch durch die Beschränkung auf nur zwei verschiedene Versatzabstände überwunden und wird im nächsten Abschnitt erläutert.



Bild 3: Screenshot des Video-Auswerteprogramms mit gleichzeitiger Darstellung der beiden Kamera-Aufnahmen. Weitere Funktionen des Tools erlauben auch die gleichzeitige Ausgabe von Messgrößen.

3. Das Versuchs-Setup

Ein Ziel dieser Studie war es, Fahrstreifenwechsel bei konstanter Geschwindigkeit in einem großen Geschwindigkeitsbereich zu erfassen. Für Geschwindigkeiten bis zu 50 km/h wäre eine geeignete nicht-öffentliche Teststrecke verfügbar gewesen, jedoch nicht für Geschwindigkeiten von 100 km/h oder mehr. Daher wurden anders als in [4] alle Versuche im regulären Verkehr durchgeführt. Für Tests mit niedriger Geschwindigkeit wurden Tage mit schwachem Verkehr und Straßenabschnitte am Stadtrand von Wien ausgewählt. Die Hochgeschwindigkeitstests wurden auf einer Autobahn mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 130 km/h durchgeführt, siehe die Luftaufnahme eines Abschnitts dieser Autobahn in Bild 4. Bisher lag die maximale Testgeschwindigkeit im Bereich von 120 km/h. Das Testen auf einer Autobahn war etwas schwierig, da der andere Verkehr natürlich nicht gestört werden durfte und der Fahrer auf Situationen warten musste, in denen sich keine anderen Fahrzeuge dem Motorrad von hinten näherten.

Ein generelles Problem bei solchen Versuchsfahrten ist die Messung des Spurversatzes. Dieses Problem wurde umgangen, indem die regulär aufgebrachten Fahrbahnmarkierungen (Leitlinien) auf den Straßen verwendet werden, und die z.B. auf Autobahnen 3,5 m voneinander entfernt waren. Die Testfahrer mussten genau auf einer markierten Linie fahren und dann auf die nächste Linie links oder rechts wechseln. Da der Abstand der Leitlinien direkt gemessen werden konnte, lieferte dieses Verfahren in Verbindung mit der Kontrollmöglichkeit durch die Video-Aufzeichnung einen exakt bekannten seitlichen Versatz der Fahrlinien bei den Versuchen. Auch halbe Spurwechsel wurden durchgeführt. In diesem Fall musste der Fahrer zwar von der nicht markierten Mittellinie eines Fahrstreifens zur nächsten markierten Linie wechseln, was aber für die Versuchsfahrer kein Problem war.

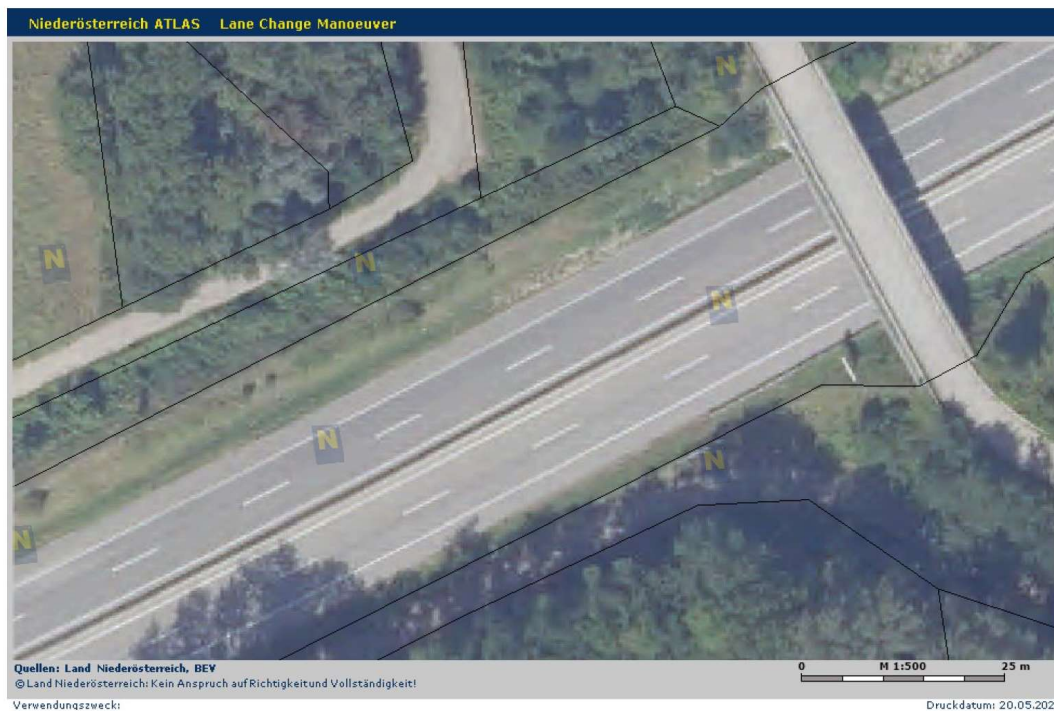


Bild 4: Streckenabschnitt auf einer Schnellstraße in Niederösterreich/Austria, welche bei den Fahrversuchen benutzt wurde.

Bei einem Teil der Versuchsfahrten wurden auch Reaktionstests durchgeführt. Dazu fuhr ein PKW in einem Sicherheitsabstand vor dem Motorrad und signalisierte dem nachfolgenden Motorradfahrer durch das Einschalten einer Signallampe (Warnblinkanlage) die Aufforderung zu einem Fahrstreifenwechsel. Die aufleuchtende Lampe war auf den zeitsynchron mitlaufenden Aufzeichnungen der On-Board-Videokameras zu sehen. Der Beginn der Fahrerreaktion wurde durch die Betätigung der Minischalter an den beiden Lenkergriffen aufgezeichnet. Dadurch konnte der zeitliche Ablauf der Fahrstreifenwechsel ab dem Zeitpunkt einer Reaktionsaufforderung präzise erfasst und aufgezeichnet werden.

Die Spurwechsel- sowie die Reaktionszeitversuche in dieser Studie wurden von nur zwei Fahrern durchgeführt. Diese werden in weiterer Folge mit „HE“ bzw. „SL“ bezeichnet werden. Fahrer HE ist ein 63 Jahre alter Motorradfahrer mit Erfahrung und Fahrpraxis mit Motorrädern bis über 1000 cm³ Hubraum. Sein Fahrverhalten ist als sehr aufmerksam und mit großen Sicherheitsreserven zu beschreiben. Fahrer SL ist 27 Jahre alt. Seine Erfahrung reicht 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.

4. Das Datenmaterial

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über das Messprogramm und den Umfang der Messdaten gegeben. Insgesamt wurden 167 Fahrstreifenwechsel durchgeführt und aufgezeichnet. Die Anzahl der innerstädtischen Tests bei niedrigen Geschwindigkeiten (<60 km/h) betrug 110, die anderen 57 Tests wurden auf Autobahnen bei höheren Geschwindigkeiten

durchgeführt. Die Anzahl der Fahrstreifenwechsel mit voller Breite betrug 120 und die der halbbreiten Spurwechsel betrug 43. Einige Manöver sind misslungen und wurden daher von der Studie ausgeschlossen.

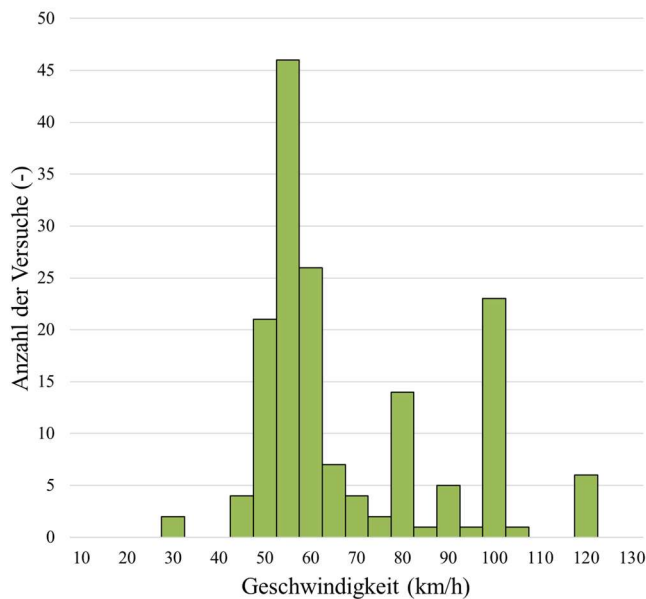


Bild 5: Häufigkeitsverteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten

Das Bild 5 zeigt eine Häufigkeitsverteilung der bei den Manövern gefahrenen Geschwindigkeiten. Die meisten Manöver wurden zwischen 45 und 55 km/h durchgeführt. Die Höchstgeschwindigkeit betrug 118 km/h, die Mindestgeschwindigkeit 26 km/h mit einem Durchschnitt von 67 km/h. Es können mehrere Maxima in der Häufigkeitsverteilung erkannt werden und diese können den verschiedenen Testorten zugeordnet werden. Aufgrund der Geschwindigkeitsbegrenzung innerhalb der Stadtgrenzen von 50 km/h gibt es ein Maximum im Bereich dieser Geschwindigkeit. Außerhalb der Stadtgrenzen konnten die Fahrversuche bei höheren Geschwindigkeiten

durchgeführt werden, was einen weiteren Spitzenwert bei 80 km/h erklärt.

Auf der Autobahn wurden überwiegend 100 km/h als Testgeschwindigkeit und bei einigen Versuchen auch 120 km/h verwendet. Insbesondere bei den Hochgeschwindigkeitstests stellte sich heraus, dass die Tempomat-Funktion des Motorrads extrem nützlich war. Der Fahrer konnte die Fahrgeschwindigkeit einstellen und musste sich nicht mehr auf das Gas konzentrieren, sondern konnte den Verkehr dahinter beobachten und auf die Ausführung des Spurwechselmanövers achten. Daher war es möglich, etliche Tests mit nahezu exakt der gleichen Geschwindigkeit zu absolvieren.

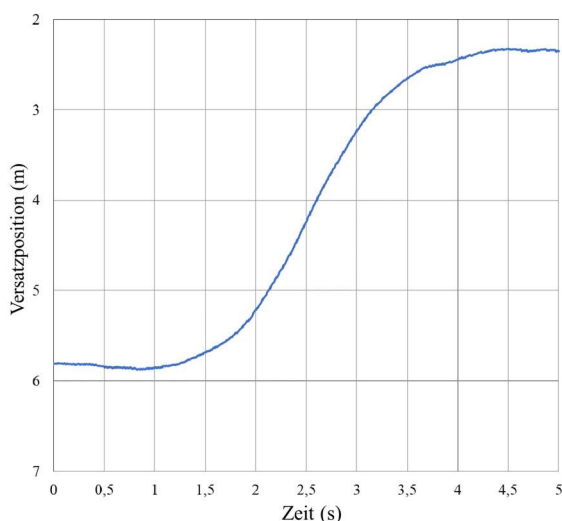


Bild 6: Seitlicher Versatz bei einem Fahrstreifenwechsel (ca. 3,5m nach links) mit ca. 52 km/h gefahren.

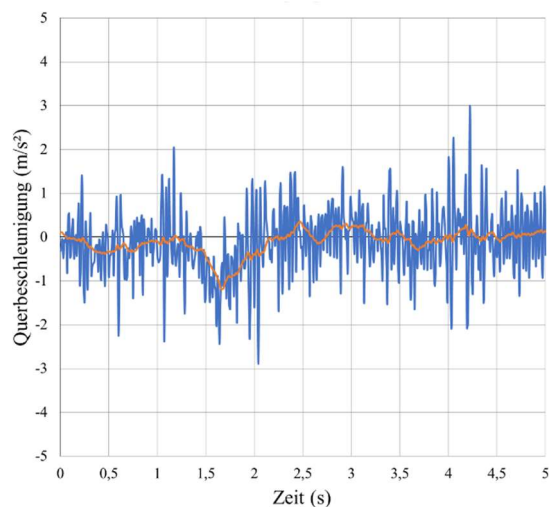


Bild 7: Gemessene Querbeschleunigung (positiv nach links) zu dem Manöver wie in Bild 6 gezeigt.

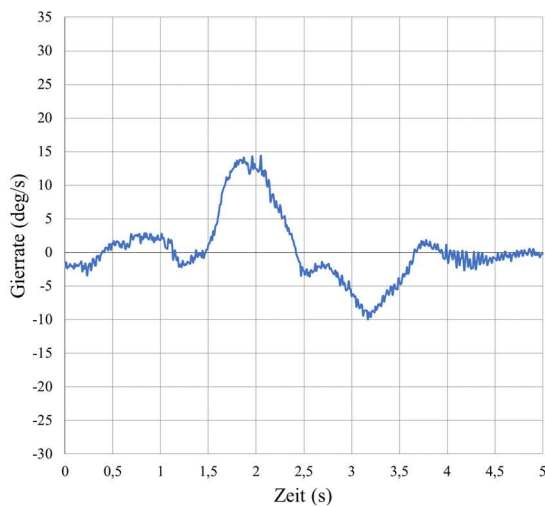


Bild 8: Gierwinkelgeschwindigkeit um die z-Achse (zeigt nach oben) zu dem Manöver in Bild 6..

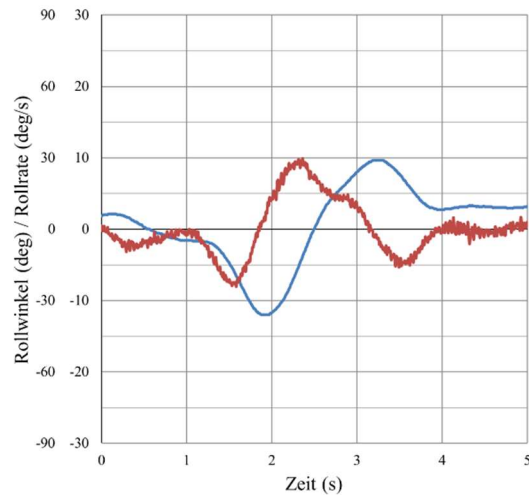


Bild 9: Rollwinkel (blau) und Rollwinkelgeschwindigkeit um die x-Achse (zeigt nach vorne) zu dem Manöver in Bild 6.

Die Diagramme in den Bildern 6-9 zeigen typische zeitliche Verläufe von verschiedenen Messgrößen, welche im Zusammenhang mit dem Fahrstreifenwechsel von Interesse sind. Mit Ausnahme von Bild 6 sind hier die Rohdaten dargestellt, gemessen im Fahrzeugbezugsystem ohne Signalbearbeitung und ohne Koordinatentransformation in das Inertialsystem. Das Bild 6 zeigt den seitlichen Versatz als Zeitfunktion eines Fahrstreifenwechsels nach links mit einer Breite von ca. 3,5m. Die dabei gefahrene Geschwindigkeit ist 52 km/h. Dieser Verlauf konnte direkt aus den GPS-Positionen errechnet werden. In der Regel war die relative Genauigkeit der gewöhnlichen GPS-Daten ausreichend, um die Bahntrajektorie lokal ausreichend genau zu bestimmen. Das Querschleunigungssignal (siehe Bild 7) alleine eignet sich nur in Verbindung mit einer rechnerischen Verarbeitung der anderen Beschleunigungs- und Drehratensignale der IMUs zur Bestimmung des Spurversatzes. Dies deshalb, weil alle Bewegungsgrößen im fahrzeugfesten System gemessen werden und nicht im Inertialsystem. Außerdem ist die Querschleunigung, wie Bild 7 zeigt, nicht unmittelbar anschaulich mit dem Manöver zu korrelieren und ist auch von geringerer Aussagekraft als die Drehbewegungen um die Gier- und die Rollachse des fahrzeugfesten Koordinatensystems.

Das Diagramm in Bild 8 zeigt die Gierwinkelgeschwindigkeit (Gierrate) im körperfesten Koordinatensystem, wobei die positive z-Achse nach oben zeigt. Im Bild 9 sind die Rollwinkelgeschwindigkeit (Rollrate) und der Rollwinkel dargestellt, bezogen auf die positive x-Achse, welche in die Fahrtrichtung zeigt. Alle zeitlichen Verläufe der Bilder 6-9 zeigen einen Fahrstreifenwechsel von ca. 3,5 Meter Breite bei einer Geschwindigkeit von 52 km/h. Wie die „idealen“ Zeitfunktionen dieser fahrdynamischen Größen aussehen würden, wird als bekannt vorausgesetzt, bzw. ist in der Fachliteratur (z.B. [11] oder [Sharp]) ausführlich dokumentiert. An dieser Stelle sollen mehr die Abweichungen und Imperfektionen kurz diskutiert werden, da sie für die spätere Datenanalyse von Bedeutung sind.

Der Zeitverlauf des Seitenversatzes (Bild 6) ist entspricht weitestgehend dem zu erwartenden sinusförmigen Verlauf. Auch das aus der Theorie bekannte kurze Ausweichen in die Gegenrichtung zu Beginn konnte messtechnisch immer wieder bestätigt werden. Das Ausleiten des Fahrstreifenwechsels ist mit kleinen seitlichen Schwankungen verbunden, welche auf Lenkkorrekturen des Fahrers beim Einfahren in die neue Fahrlinie zurückzuführen sind. Das

Lenk- und Regelverhalten des Fahrers wird sich in anderen Signalen noch wesentlich deutlicher zeigen.

Das Zeitsignal der Querb beschleunigung (Bild 9) ist deutlich verrauschter (blaue Linie) und muss daher geglättet werden (rote Linie). Das Betrags-Maximum dieses Signals tritt als negative Größe etwa zum Zeitpunkt 1,6s auf. Das bedeutet eine kurze Phase einer Querb beschleunigung in Richtung gegen den Fahrstreifenwechsel nach links und lässt sich daher mit der Bewegung „im Großen“ nicht vereinbaren. Die Erklärung findet sich darin, dass bei realen Fahrversuchen laufend Störungen auf Fahrzeug und Fahrer einwirken und daher kleinere und größere Lenkkorrekturen laufend stattfinden, die sich insbesondere in den Beschleunigungssignalen bemerkbar machen.

Das Diagramm in Bild 8 zeigt die Gierrate des Manövers und lässt auch die etwas unruhige Phase am Beginn des Spurwechsels erkennen, weil zwischen Sekunde 1,2 -1,5 eine Richtungsänderung nach rechts stattfindet, bevor dann die Gierrate positive Werte bis knapp 15 Grad/s erreicht, entsprechend dem Schwenk nach links. Die markantesten Signale sind jedoch die Rollwinkelgeschwindigkeit und der Rollwinkel. Beide Zeitverläufe sind gemeinsam im Bild 9 dargestellt. Die rot gezeichnete Rollrate erreicht nach anfänglichen negativen Werten bei Sekunde 1 wieder beinahe einen Nullwert und demgemäß verflacht auch der blau dargestellte Rollwinkelverlauf. Im weiteren zeitlichen Verlauf nehmen aber die negativen Werte für beide Signale zu, wie es auch einer Schräglage nach links entspricht. Der Rollwinkel erreicht einen Maximalwert von -32 Grad, beim anschließenden Aufrichten und nach rechts Neigen wird ein Maximalwert von 30 Grad Schräglage erreicht. Anhand des Signals der zeitlichen Änderung der Neigung, also der Rollrate, welche dem Winkelsignal vorausseilt, sind die kleinen Fahrerkorrekturen und Störungen des Ablaufes wie üblich deutlicher zu erkennen.

Zur Auswertung und Beurteilung der Fahrmanövers wurden alle benötigten dynamischen Größen erfasst, jedoch mit einer Ausnahme, nämlich dem Lenkmoment. Über das Lenkmoment könnte die Fahreraktion, also die vom Fahrer eingeleiteten Kräfte und Momente gut erfasst werden, es kann jedoch nicht an dem Messfahrzeug gemessen werden. Da es jedoch von entscheidender Bedeutung ist, ob ein Fahrer das Manöver langsam, zügig oder aggressiv fährt, wurde der Intensitäts-Parameter eingeführt. Durch einen Zahlenwert zwischen 0 und 10 soll zum Ausdruck kommen wie „ambitioniert / sportlich / ehrgeizig“ ein Fahrer den Fahrstreifenwechsel ausführt. Die Definition dieses neuartigen Dynamik-Parameters wird im folgenden Abschnitt erklärt.

5. Die primäre Auswertung der Messsignale

Für die Datenanalyse der Spurwechselmanöver standen primär die sechs konsolidierten dynamischen Zustände der am Hauptrahmen installierten IMUs zur Verfügung: Längsb beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten in und um die drei Koordinatenachsen, sowie davon abgeleiteten Variablen Längsgeschwindigkeiten und Drehwinkel. Zusätzlich zu diesen Signalen konnten GPS-Koordinaten, Lenkwinkel und Radgeschwindigkeiten analysiert werden. In einem ersten Schritt der Datenanalyse wurden alle relevanten Signale qualitativ analysiert, um nach den aussagekräftigsten zu suchen. Wie schon im vorangegangenen Kapitel angedeutet, zeigte sich, dass das Spurwechselmanöver durch das Signal um die Rollachse, dh.

die Rollrate und davon abgeleitet den Rollwinkel ausreichend beschrieben wird. Andere Signale wie Gierrate und Gierwinkel können als Ergänzung verwendet werden. Da der seitliche Versatz der Manöver durch das Testdesign festgelegt wurde, war es in dieser Studie nicht erforderlich, die seitliche Position zu berechnen.

Zu Beginn der Auswertungen bestand noch die Vermutung, dass auch die Fahrgeschwindigkeit einen wesentlichen Einfluss auf die Ausführung des Manövers haben würde. Ein solcher Einfluss stellte sich jedoch als so gering heraus, dass er am Ende nicht berücksichtigt wurde.

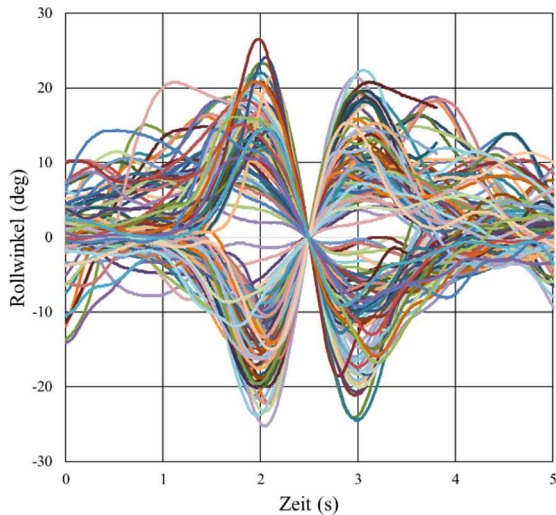


Bild 10: Zeitverlauf aller Rollwinkelverläufe, synchronisiert mit dem Vorzeichenwechsel.

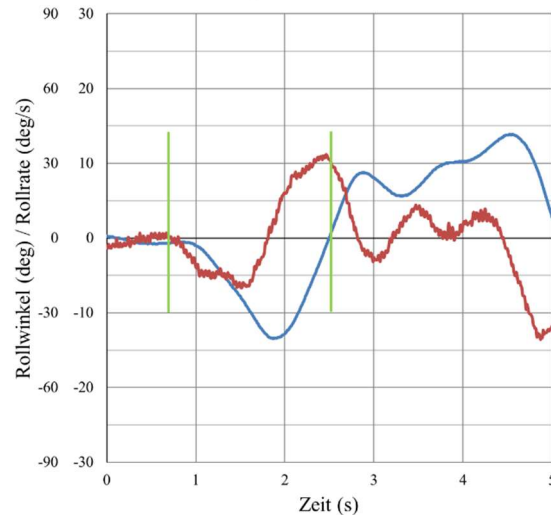


Bild 11: Definition der halben Manöverdauer über Nullstellen der Rollrate (Beginn) und des Rollwinkels (Ende).

Die Datenanalyse basiert daher primär auf den Zeitreihen des Rollwinkels und der Rollrate. Jeder Datensatz eines Tests wurde auf charakteristische Merkmale gescannt. Die wichtigsten Ereignisse waren der Nulldurchgang des Rollwinkels und die Maxima der Rollrate. Für die nicht skalierte (rohe) Zeitreihe wurde eine Zeitverschiebung durchgeführt, so dass der erste Nulldurchgang des Rollwinkels (im Verlauf des Manövers) auf den Zeitpunkt Null gesetzt wurde. Alle anderen Signale wurden ebenfalls entsprechend synchronisiert.

Dieses Verfahren wurde auf alle gültigen Zeitreihen angewendet. Dadurch konnten die Zeitreihen überlagert dargestellt werden. Das Bild 10 zeigt den synchronisierten Rollwinkelverlauf aller Messungen. In dieser Darstellung ist sehr gut zu sehen, dass alle Verläufe eine weitgehend ähnliche Form haben und dass sich die Dauer der Manöver nicht wesentlich unterscheidet, zumindest wenn man den ersten Peak des Verlaufes betrachtet.

Die für ein Spurwechselmanöver charakteristische Zeitdauer wurde nach folgendem Verfahren berechnet. Da der Beginn der Zunahme des Rollwinkels eher schwer zu erkennen ist, wurde stattdessen die Zunahme der Rollrate als Indikator für den Beginn des Manövers verwendet. Als nächstes wurde der Nulldurchgang des Rollwinkels gesucht und lokalisiert. Mit der Zeitspanne zwischen diesen beiden Ereignissen wurde die Dauer des halben Spurwechsels definiert, siehe Bild 11. Da der „Auslauf“ eines Spurwechselmanövers häufig untypisch ist und weniger charakteristisch, finden sich meist keine signifikanten Ereignisse, welche das Ende

definieren. Deshalb wurde die Dauer des halben Spurwechsels verdoppelt und als Spurwechselmanöverzeit definiert. Dies ist natürlich eine idealisierte Dauer und definiert die Untergrenze der Zeitspanne, die ein Spurwechselmanöver benötigen kann. Obwohl Bild 10 alle ausgewerteten Fälle zeigt (alle Geschwindigkeiten, alle Fahrer) und daher etwas überladen ist, kann man immer noch sehen, dass die Spurwechselzeit nicht stark variiert, besonders wenn man die „lehrbuchmäßig“ gefahrenen Versuche hernimmt. Im nächsten Kapitel wird darauf noch näher eingegangen.

Es ist daher die Dauer des Manövers auch nicht charakteristisch dafür, ob ein Spurwechsel „langsam / durchschnittlich / sportlich“ oder gar „aggressiv“ ausgeführt wurde. Für die weitere Analyse und die Entwicklung von Fahrermodellen wird jedoch ein Parameter benötigt, der diesen menschlichen Faktor beschreibt. Wie schon erwähnt, wäre vermutlich das vom Fahrer auf den Lenker ausgeübte Lenkmoment der beste mechanische Parameter, um diesen Parameter des Fahrmanövers zu quantifizieren, aber leider war kein Sensor installiert, um das Lenkmoment zu messen. Daher muss ein charakteristischer Parameter aus anderen Größen abgeleitet werden.

Wie bereits weiter oben erwähnt, wird ein neuer Parameter mit der Bezeichnung „Intensität (des Spurwechselmanövers)“ eingeführt. Die Definition basiert auf einem rein heuristischen Ansatz. Da ein sehr „intensives“ Manöver zu hohen Maximalwerten des Rollwinkels und der Rollrate führt, war es naheliegend, die Definition auf diese beiden Messgrößen zu stützen. Nach dem Ausprobieren mehrerer Ansätze wurde mittels Datenregression eine Definition für den Parameter „Intensität“ in Abhängigkeit des Rollwinkels ϕ (Grad) gefunden:

$$I = 5 \frac{\sqrt{\phi}}{\sqrt{13}} \quad (\text{dim. los})$$

Das Intensitätsniveau ist für Rollwinkel im Intervall $[0^\circ \dots 52^\circ]$ definiert und die dimensionslose Ausgabe in diesem Intervall ist $[0 \dots 10]$. Die Formel gibt für den Durchschnittswert des gemessenen maximalen Rollwinkels $\phi = 13^\circ$ einen Intensitätswert von 5 an. Es wird sich später zeigen, dass bei den Testfahrten der Rollwinkel meist im Bereich von 5° bis 26° lag. Die entsprechende Intensität variiert zwischen 3,1 und 7,1. Die degressiv ansteigende Funktion sollte eine angemessene Darstellung der „Ambition“ des Fahrers bei der Durchführung eines solchen Spurwechselmanövers sein. Darüber hinaus ist die Skala von 0 bis 10 sehr praktisch. Selbstverständlich handelt es sich hier um einen rein heuristischen Ansatz und man kann auch versuchen, andere Formeln zu finden, die z.B. auch die Rollrate oder andere Messgrößen einbezieht. Wollte man diesen Intensitätsparameter stärker mit dem Lenkmoment in Verbindung bringen, dann wäre es jedenfalls notwendig auch die Fahrgeschwindigkeit einfließen zu lassen, da ja die Kreiselmomente von der Winkelgeschwindigkeit der Räder abhängen.

Um einen besseren Eindruck vom Verlauf des Rollwinkels und der Rollrate zu vermitteln, werden typische Beispiele für Manöver mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und unterschiedlich ambitioniert ausgeführtem Spurwechsel gezeigt. Das Bild 12 zeigt die Zeitreihen der Rollrate und des Rollwinkels eines Spurwechselmanövers mit einer relativ hohen Intensität ($I=7,1$). Der maximale Rollwinkel erreicht $26,5$ Grad und die Rollrate beträgt 76 Grad/s. Die Dauer des Spurwechsels beträgt ca. 3 Sekunden. Die Form beider Funktionen ist charakteristisch für ein Spurwechselmanöver, wie es in dieser Versuchsreihe ausgeführt wurde.

Anfangs nehmen Rollwinkel und Rollrate schnell zu. Natürlich folgt der Winkelverlauf dem Verlauf der Winkelgeschwindigkeit mit einer Zeitverzögerung. Wenn das erste Einlenken des Manövers stattgefunden hat, werden beide Signale negativ und erreichen aufgrund der erforderlichen Gegenlenkung eine zweite Spitze. Der folgende letzte Abschnitt der Signale zeigt häufig einen schwingungsähnlichen Verlauf. In diesem Beispiel ist dieses Phänomen weniger ausgeprägt, der Fahrer erreicht ziemlich schnell den Endzustand des Manövers und fährt geradeaus und aufrecht weiter.

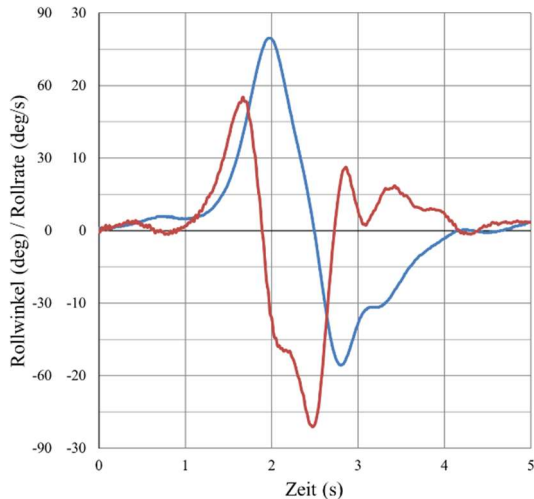


Bild 12: Rollwinkel (blau) und Rollrate (rot) eines Fahrstreifenwechsels nach rechts mit hoher Intensität ($I=7,1$) bei 79 km/h

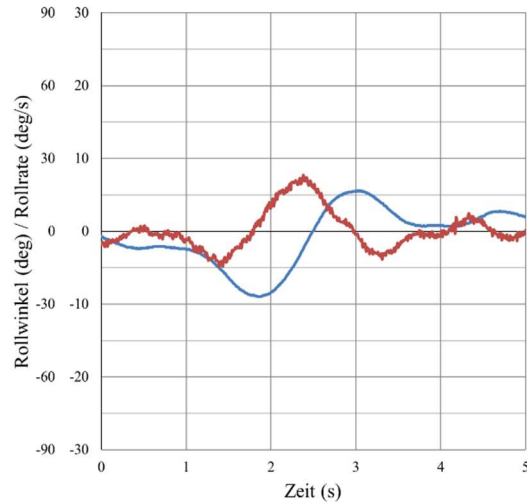


Bild 13: Rollwinkel (blau) und Rollrate (rot) eines Fahrstreifenwechsels nach links mit geringer Intensität ($I=4,4$) bei 58 km/h

Im Gegensatz dazu zeigt Bild 13 einen Spurwechsel niedriger Intensität ($I=4,4$). Der maximale Rollwinkel beträgt weniger als 10° , die maximal erreichte Rollrate liegt unter $30^\circ/\text{s}$. Die Dauer dieses Spurwechsels ist zwar etwas, aber nicht wesentlich länger als im vorangegangenen Versuch. Dieses Beispiel zeigt außerdem recht gut, dass das Ende und manchmal auch der Anfang eines Manövers nicht immer klar definiert ist. Es ist auch anzumerken, dass in beiden Beispielen die erste Spitze des Rollwinkels, aber die zweite Spitze der Rollrate die Höchste ist.

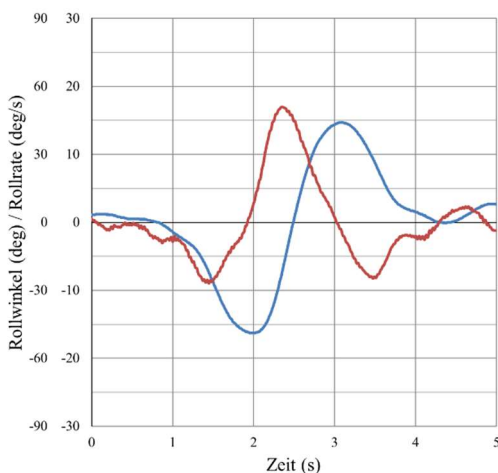


Bild 14: Rollwinkel (blau) und Rollrate (rot) eines Fahrstreifenwechsels nach links mit 97 km/h

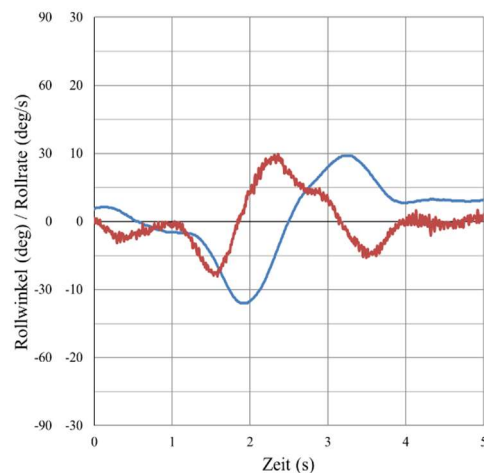


Bild 15: Rollwinkel (blau) und Rollrate (rot) eines Fahrstreifenwechsels nach links mit 52 km/h

Um den Geschwindigkeitseinfluss noch näher zu beleuchten, zeigen die Bilder 14 und 15 je einen gefahrenen Fahrstreifenwechsel mit hoher Geschwindigkeit (97 km/h) und einen mit niedriger Geschwindigkeit (52 km/h). Das langsamer gefahrene Manöver wurde mit fast der Hälfte der Geschwindigkeit ausgeführt, und zwar vom selben Fahrer und mit der gleichen subjektiven Einstellung wie beim vorherigen Test. Die errechneten Intensitätswerte sind trotzdem etwas verschieden, mit $I=5,5$ (bei 97km/h) und $I=4,8$ (bei 52km/h), was aber angesichts der unpräzisen subjektiven „Skala“ nicht verwundert. Das interessanteste Ergebnis dieser Tests bei den beiden stark unterschiedlichen Geschwindigkeiten ist die Dauer des Manövers. Man kann leicht erkennen, dass beide Tests fast dieselbe Zeit dauern, nämlich ungefähr 3 Sekunden. Der Vollständigkeit halber muss erwähnt werden, dass alle bisher gezeigten Versuche vollständige Fahrstreifenwechsel mit einem Spurbreitenversatz von 3,5 Metern waren.

6. Die statistische Auswertung

Wie in Abschnitt 4 erwähnt, basiert diese Studie auf Messungen von nur zwei Fahrern mit signifikant unterschiedlichem Alter und Fahrerfahrung. Daher ist es durchaus von Interesse, wie unterschiedlich sich diese beiden Fahrer in den Tests verhalten haben. Bild 16 zeigt ein Histogramm der maximalen Rollwinkel, die bei Tests mit niedriger Geschwindigkeit im Bereich von 50 km/h gemessen wurden. Man erkennt eine Zwei-Peak-Verteilung mit Häufungen bei 10-12° und bei 18-20°. Die Farben des Histogramms zeigen, dass der Peak bei niedrigeren Winkeln mit dem Fahrer HE und der andere mit dem Fahrer SL verbunden ist. In der Tat war Fahrer SL in diesen Tests hochmotiviert, und seine Leistung zeigt das obere Ende des Bereichs, während Fahrer HE versuchte, sich wie ein Alltagsfahrer zu verhalten. Da diese Tests bei niedrigen Geschwindigkeiten durchgeführt wurden, kann diese Auswertung eine gute Vorstellung von den maximalen Neigungswinkeln geben, die beim Fahren in einer städtischen Umgebung zu erwarten sind.

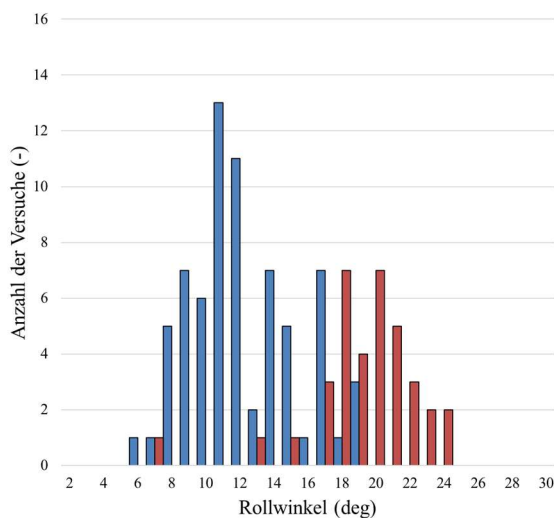


Bild 16: Häufigkeitsverteilung der erreichten maximalen Rollwinkel bei ca. 50km/h. Fahrer: Blau-HE, Rot-SL

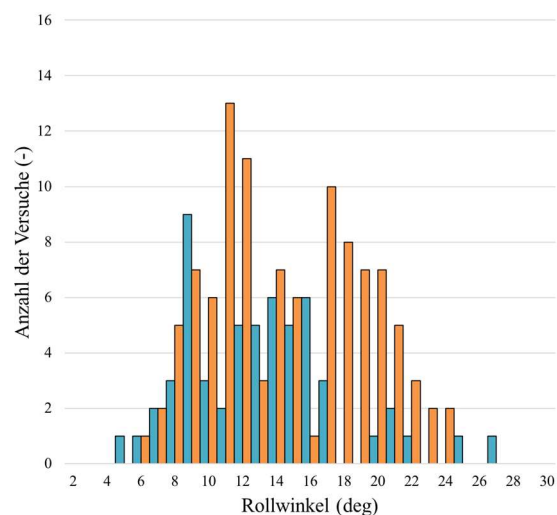


Bild 17: Häufigkeitsverteilung aller erreichten maximalen Rollwinkel. Geschwindigkeit: Gelb < 60km/h, Blau > 70km/h

Das Histogramm in Bild 17 kombiniert gemessene maximale Rollwinkel bei niedrigen Geschwindigkeiten (< 60 km/h) und hohen Geschwindigkeiten (> 70 km/h) für beide Fahrer. Die Verteilung bei niedriger Geschwindigkeit (gelb) wiederholt die Ergebnisse von Bild 16 mit der Doppelspitze, die von den zwei verschiedenen Fahrern verursacht wurde. Die Hochgeschwindigkeitsverteilung wurde nur vom Fahrer HE erfasst und hat eine breite Verteilung zwischen 12 und 17 Grad und einen kleinen Peak nahe 9 Grad. Eine gründliche Datenanalyse ergab, dass diese Häufung hauptsächlich durch halbe Spurwechsel verursacht wird. Es ist naheliegend, dass für einen halben Spurwechsel die Fahrzeugneigung zur Seite früher gestoppt werden muss als für den vollen Fahrstreifenwechsel und daher kleiner ausfällt.

Eine ausführlichere Analyse wie und wo sich der Fahrereinfluss in den Messwerten bemerkbar macht findet man in [8] und [9].

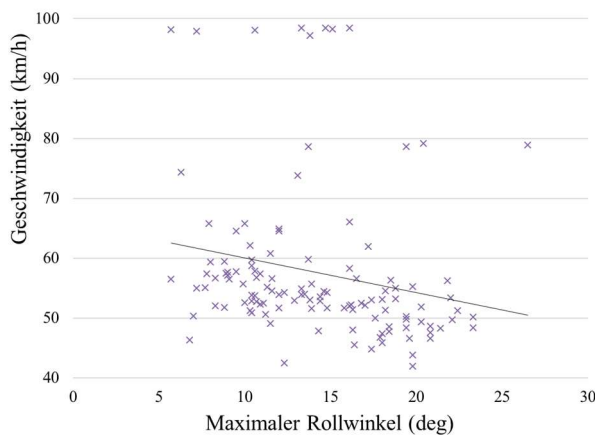


Bild 18: Streudiagramm für Fahrgeschwindigkeit und maximalem Rollwinkel

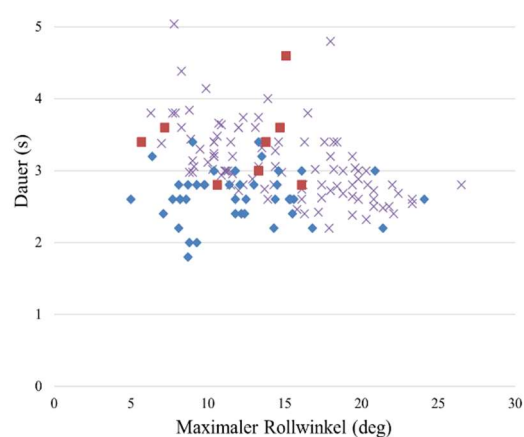


Bild 19: Streudiagramm für die Manöverdauer und den maximalen Rollwinkel. Rot: > 90 km/h, Blau: halbe Breite

Ein möglicher Zusammenhang zwischen der Fahrgeschwindigkeit und den maximal gefahrenen Rollwinkeln wird anhand von Bild 18 untersucht. Diese Abbildung zeigt ein Streudiagramm, das Markierungen für jeden auswertbaren Versuch zeigt. Die meisten hochwertigen Manöver wurden mit 50-60 km/h durchgeführt. Es wurden zwar insgesamt mehr Hochgeschwindigkeits-Spurwechselmanöver gefahren, aber eine große Zahl davon waren halber Fahrstreifenwechsel. Diese wurden ausgeschlossen, um sie nicht mit den ganzen Spurwechseltests zu vermischen. Es wurden auch nur „saubere“ Versuche aufgenommen, um „Datenrauschen“ durch weniger gute Ergebnisse zu vermeiden. In Zukunft wird eine alternative Methode zur Datenauswertung verwendet werden müssen, um auch solch unpräzise gefahrenen Versuche auswerten zu können.

Für die Datenwolke wurde eine Trendlinie mit der Methode der kleinsten Quadrate berechnet und eingezeichnet. Diese bestätigt den auch visuell erkennbaren Trend zu kleineren Rollwinkeln bei höheren Geschwindigkeiten. Allerdings ist dieser Trend nicht sonderlich ausgeprägt. Nur die wenigen gelungenen Messungen bei knapp 100 km/h für sich genommen zeigen einen niedrigeren mittleren maximalen Rollwinkel von ca. 17 Grad im Vergleich zu niedrigeren Geschwindigkeiten.

Das wahrscheinlich interessanteste Ergebnis der statistischen Analyse ergab die Suche nach einer vermuteten Korrelation zwischen der Dauer eines Spurwechsels und dem maximalen Rollwinkel. Das Streudiagramm in Bild 19 enthält vollständige Spurwechsel (X) und auch halbbreite Spurwechsel (◇). Die Hochgeschwindigkeitsversuche ($v > 90 \text{ km/h}$) aus Bild 18 sind ebenfalls eingezeichnet und rot markiert (□). Wenn man nur die vollen Fahrstreifenwechsel analysiert, dann kann ein eher schwacher Trend erkannt werden, nämlich eine Zunahme mit abnehmendem Rollwinkel. Von wenigen Ausreißern abgesehen liegt die Fahrstreifenwechseldauer im Bereich von 2-4 Sekunden mit einem gut abgesicherten Mittelwert bei ca. 3 Sekunden. Wesentlich ist, dass dieser Wert sich auf den idealisierten und bis zum Ende betrachteten Fahrstreifenwechsel bezieht, so wie in Abschnitt 4 erläutert. Die eher wenigen Messungen mit hoher Geschwindigkeit (rote Quadrate) liegen im oberen Bereich dieses Intervalls, nur ein Wert fällt nach oben hinaus.

Es ist zwar plausibel, dass ein aggressiv gefahrener Spurwechsel in kürzerer Zeit durchgeführt werden kann, nach den vorliegenden Messungen ist der Zeitgewinn jedoch geringer als zunächst vermutet wurde. Fast alle Spurwechsel wurden innerhalb von 2-4 Sekunden abgeschlossen. Auch die Hochgeschwindigkeitsergebnisse sind relativ gleichmäßig in der Wolke der Messpunkte verteilt. Betreffend eine tiefergehende Analyse dieser Abhängigkeit wird auf [8] und [9] verwiesen.

Die blauen Datenpunkte in Bild 19 sind die Ergebnisse für die Fahrstreifenwechsel mit halber Breite. Diese Ergebnisse bilden eine lokale Gruppe, die überwiegend zwischen 2 und 3 Sekunden liegt, was darauf hinweist, dass der Spurversatz erwartungsgemäß einen Einfluss auf dieses Ergebnis hat.

7. Ein mathematisches Modell des Manövers

Eines der Ziele dieser Studie war es, mathematische Funktionen abzuleiten, um charakteristische Parameter eines Spurwechselmanövers zu beschreiben. In [8] wurden Regressionsmodelle verwendet, um analytische Ausdrücke für die Spurwechseldauer, die maximale Rollrate und schließlich die Zeitfunktionen von Rollwinkel und Rollrate zu finden.

Dabei wurden verschiedene Ansatzfunktionen untersucht und die Parameter dieser Funktionen durch lineare und nichtlineare Regressionsanalyse für die gemessenen und vorbereiteten fahrdynamischen Daten ermittelt. Es handelt sich dabei um eine weitgehend auf „Data Mining“ basierende Datenanalyse. Das heißt, es findet kein Apriori-Wissen Verwendung, und auch keine auf den üblichen mechanischen Modellen basierenden Annahmen. Der Grund für diese Vorgangsweise ist darin zu suchen, dass diese konsequente Analyse von Messdaten bisher noch nicht versucht wurde und es daher interessant war, zu sehen, wie erfolgreich dieser Ansatz ist. Für diese numerische Vorgangsweise wurden die im Softwarepaket Matlab enthaltenen Datenanalysefunktionen und Toolboxes verwendet.

Die vollständige Herleitung der gesuchten Funktionen wird in [8] ausführlich erläutert. Im Folgenden werden nur die wichtigsten Ergebnisse und Funktionen vorgestellt.

Die Dauer eines Spurwechselmanövers kann mit dem folgenden Ausdruck berechnet werden:

$$t_{sw} = -0.2346 I + 0.3379 b + 3.1715$$

wobei t_{sw} (sec) die Zeitdauer des Fahrstreifenwechselmanövers bezeichnet, I (-) die Intensität des Fahrers bei der Ausführung des Manövers, und b (m) die Breite des Spurwechsels. Es fällt auf, dass diese Dauer hier nur mehr von der Fahreraktion und der Spurbreite abhängt, aber nicht von z.B. der Fahrgeschwindigkeit. Im Kapitel 6 wurde kurz gezeigt, dass die Fahrgeschwindigkeit eine eher untergeordnete Rolle bei der Spurwechselzeit spielt. Diese Erkenntnis wurde in [8] gewonnen, wo auch andere, Mehrparameter-Ansätze untersucht wurden. Letztlich hat sich jedoch gezeigt, dass dadurch kaum Verbesserungen in der Approximationsgüte erzielt werden konnten. Es ist aber gut möglich, dass sich diese Einschätzung noch ändert, wenn in Zukunft mehr und stärker gestreute Messungen verfügbar sein werden.

Die maximale Amplitude der Rollrate wird wie folgt angegeben:

$$\dot{\phi}_{max} = 11.5724 I - 10.5877 t_{sw} + 13.4428$$

Es bedeutet $\dot{\phi}_{max}$ (°/s) die maximale Rollrate, I die Intensität, und t_{sw} (sec) die Zeitdauer des Manövers. Schließlich kann die Roll-Winkelgeschwindigkeit (Rollrate) als Zeitfunktion angeschrieben werden

$$\dot{\phi}(t) = \dot{\phi}_{max} e^{\frac{-3.14}{t_{sw}^2}} \cos\left(\frac{3\pi}{d} |t|^{1.21}\right)$$

Der zeitliche Verlauf des Rollwinkels $\phi(t)$ kann dann numerisch durch Integration der Rollrate $\dot{\phi}(t)$ erhalten werden.

Mit den vorgestellten Funktionen können synthetische Zeitverläufe der wesentlichen Parameter eines Spurwechselmanövers erstellt werden. Daher ist der ultimative Test für die Qualität dieser analytischen Ausdrücke ein Vergleich mit tatsächlich gemessenen Signalverläufen. Ein solcher Vergleich ist in den Diagrammen der folgenden Bilder 20 -23 gezeigt. Es sind dies im Wesentlichen die Diagramme der Bilder 12-15, aber es wurden die synthetischen Funktionen hinzugefügt und können mit den gemessenen Signalen verglichen werden.

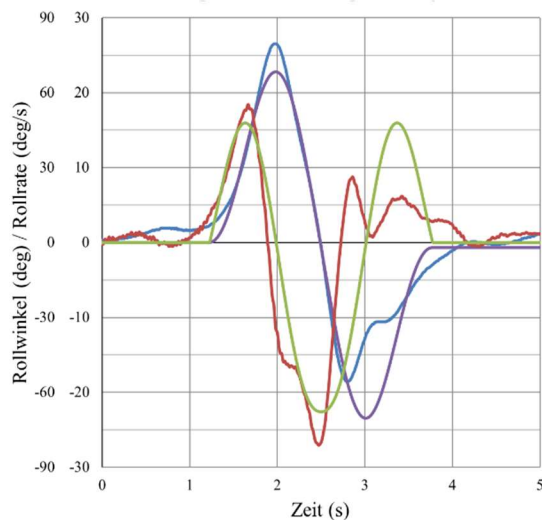


Bild 20: Signalverläufe von Bild 12 ergänzt um die synthetischen Signale Rollwinkel (violett) und Rollrate (grün) eines Fahrstreifenwechsels nach rechts mit hoher Intensität ($I=7,1$) bei 79 km/h

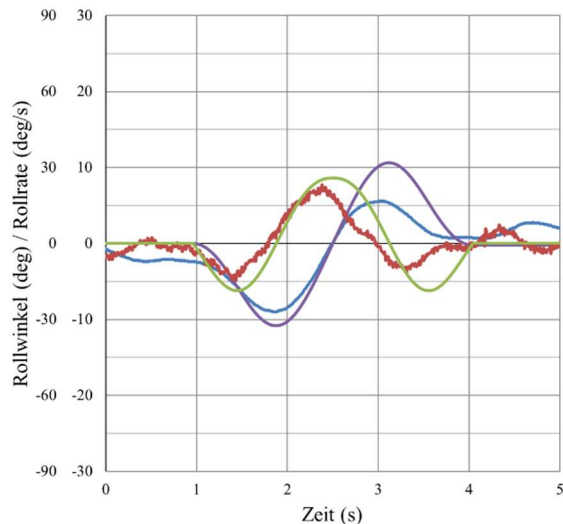


Bild 21: Signalverläufe von Bild 13 ergänzt um die synthetischen Signale Rollwinkel (violett) und Rollrate (grün) eines Fahrstreifenwechsels nach links mit geringer Intensität ($I=4,4$) bei 58 km/h

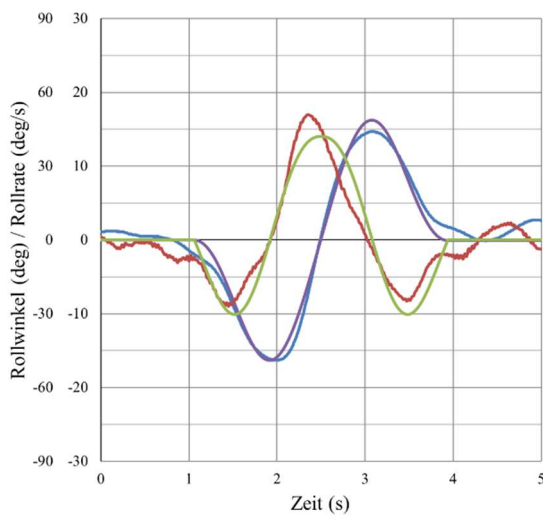


Bild 22: Signalverläufe von Bild 14 ergänzt um die synthetischen Signale Rollwinkel (violett) und Rollrate (grün) eines Fahrstreifenwechsels nach links mit 97 km/h

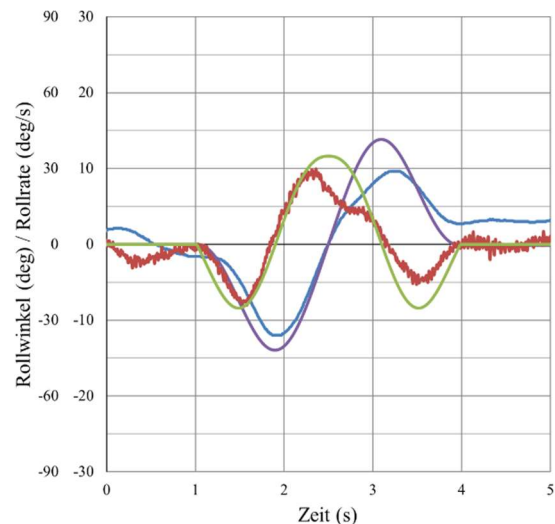


Bild 23: Signalverläufe von Bild 15 ergänzt um die synthetischen Signale Rollwinkel (violett) und Rollrate (grün) eines Fahrstreifenwechsels nach links mit 52 km/h

Wie man sehen kann, stimmen gemessene und synthetische Funktionen sehr gut überein. Natürlich sind die synthetischen Funktionen glatter, da kein Messrauschen vorhanden ist und auch die Einflussnahme des Fahrers ist in der synthetischen Lösung nicht vorhanden. Gelegentlich wird auch die zweite Spitze des Rollwinkels überschätzt. Dieses Problem tritt insbesondere dann auf, wenn die Originaldaten weniger glatt sind und die Anpassung an die Rollrate noch nicht perfekt ist. Aber insgesamt konnte ein sehr befriedigendes Ergebnis erreicht werden, besonders bei der Einleitung des Fahrstreifenwechselmanövers. Das Manöverende wurde in den Versuchen wegen der durchaus anspruchsvollen regelungstechnischen Fahraufgabe, nämlich in einem Zug auf die neue Fahrlinie einzulenken, oftmals nicht sehr „sauber“ gefahren und entzieht sich daher einer guten analytischen Beschreibung.

8. Die Reaktionszeitmessungen

Wie schon in Kapitel 3 ausgeführt, wurden die Fahrstreifenwechsel zum Teil mit freier Wahl des Zeitpunktes gefahren, und zum Teil nach einer Reaktionsaufforderung. Außerdem wurden auch reine Reaktionszeitmessungen ohne Fahrstreifenwechsel durchgeführt.

Fahrstreifenwechsel ohne Aufforderung (und daher ohne Zeitmessung) waren all jene auf der Autobahn bzw. Schnellstraße, da sich die Verkehrssituation auf diesen Straßen in der Regel nicht für diese Versuche eignete. Daher wurden die Versuche mit Zeitmessung auf stadtnahen Landstraßen (mit Fahrstreifenwechsel) und im städtischen Verkehr (ohne Fahrstreifenwechsel) durchgeführt.

Die Versuchsanordnung war derart, dass ein vorausfahrendes Fahrzeug dem nachfolgenden Motorradfahrer durch das Einschalten einer Signallampe (Warnblinkanlage) die Aufforderung zu einem Fahrstreifenwechsel signalisierte. Die aufleuchtende Lampe war auf den zeitsynchron mitlaufenden Aufzeichnungen der On-Board-Videokameras zu sehen. Der Beginn der Fahrerreaktion wurde durch die Betätigung von zwei Minischaltern an den beiden Lenkergriffen aufgezeichnet. Diese Betätigung erfolgte unbewusst durch die für den Fahrstreifenwechsel erforderlichen Lenkbewegungen. Bei den Versuchen ohne Fahrstreifenwechsel genügte es, den Lenkergriff fester zu umfassen, um die Minischalter zu betätigen.

Die Auswertung erfolgte auf zweierlei Arten. Der Beginn der Reaktionszeit war immer durch das Videosignal definiert. Für die Fahrerreaktion wurde einerseits das Schaltersignal verwendet, aber auch der zeitliche Verlauf der Rollrate. Es zeigte sich nämlich, dass dieses Signal auch sehr sensibel die Fahrerreaktionen erfasst. Natürlich wurden die Ergebnisse verglichen und es zeigte sich, dass die visuelle Identifikation des Reaktionsbeginns anhand des Rollratenverlaufes häufig zeitlich sehr nahe am Triggersignal lag. Diese doppelte Auswertung hatte zudem den Vorteil, dass Fehlauflösungen oder auch verzögerte Auslösungen der Triggerschalter zweifelsfrei erkannt und in den Daten berücksichtigt werden konnten.

In der nachstehenden Tabelle sind nur Versuche mit Fahrstreifenwechsel berücksichtigt, und die Auswertung erfolgte auf Basis der Signale der Triggerschalter. Die einzelnen Parameter sind die üblichen statistischen Kenngrößen Stichprobenanzahl n , Mittelwert \bar{x} , Median \tilde{x} , Standardabweichung σ , sowie Minimal- und Maximalwert.

Versuchsreihe	n	\bar{x}	\tilde{x}	σ	MIN	MAX
HE1	16	0,83	0,77	0,35	0,27	1,58
HE2	20	0,74	0,58	0,32	0,46	1,47
SL1	16	0,53	0,50	0,16	0,34	0,85
HE	36	0,78	0,69	0,33	0,27	1,58
SL	16	0,53	0,50	0,16	0,34	0,85
Gesamt	52	0,70	0,61	0,31	0,27	1,58

Tabelle 1: Statistische Parameter der ausgewerteten Versuchsreihen. (Zeitangaben in Sek.)

Von primärem Interesse ist natürlich der Mittelwert der Lenk-Reaktionszeit und dieser ergibt sich für die hier ausgewerteten Fahrstreifenwechselmanöver mit optischer Aufforderung zu 0,70 Sekunden. Der Fahrervergleich anhand dieser Messungen zeigt, dass Fahrer HE mit einem Mittelwert von 0,78 Sek langsamer reagierte als Fahrer SL mit 0,53 Sek. Auch die Standardabweichung war bei Fahrer HE höher. Allerdings waren die Unterschiede zwischen den beiden Fahrern deutlich geringer bei den Reaktionszeitversuchen ohne Fahrstreifenwechsel. Weitere Ergebnisse und Auswertungen findet der interessierte Leser in [8].

Auch für diese Versuche gilt, dass zwar der gesamte Umfang mit 175 ausgewerteten Reaktionszeitversuchen durchaus repräsentativ ist, jedoch nur zwei Testpersonen zur Verfügung standen und daher die Ergebnisse eine eingeschränkte Aussagekraft haben.

9. Schlussfolgerungen

Die mit einem Messmotorrad durchgeführten zahlreichen Fahrstreifenwechsel-Manöver im öffentlichen Verkehr auf Basis eines innovativen Versuchsdesigns haben mehrere sehr interessante Erkenntnisse geliefert.

Zunächst konnte festgestellt werden, dass zwar die Phase der Einleitung und das erste Einlenken in das Manöver gut reproduzierbar und weitgehend einheitlich verläuft. Das Zurück- und Einlenken auf die neue Fahrspur gelingt jedoch oft nicht beim ersten Ansteuern und erfordert mehrfache Lenkkorrekturen des Fahrers. Dies wurde bisher bei der mathematischen Beschreibung eines Fahrstreifenwechsels nicht beachtet und berücksichtigt. Allerdings zeigt sich dieses Verhalten nur dann, wenn die Fahrer versuchen, sehr präzise die neue Fahrlinie einzuhalten. Für die tägliche Praxis spielt es in der Regel keine Rolle, ob eine Fahrlinie auf 10cm genau eingehalten wird.

Mittels des instrumentierten Motorrades konnten sehr viele fahrdynamische Parameter gemessen werden. Das Fahrzeug war jedoch nicht mit einem Lenkmomentsensor ausgerüstet. Es wird jedoch vermutet, dass die „Intensität“ der Ausführung des Manövers durch den Fahrer, am besten durch das Lenkmoment erfasst werden könnte, weil dieses in direktem Zusammenhang mit der Höhe der Kraftanstrengung gesehen werden kann. In Ermangelung dieser Messgröße, wurde der maximale Rollwinkel des Manövers als Ersatzgröße herangezogen und ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem maximalen Rollwinkel und der als „Intensität“ definierten charakteristischen Größe zur Beschreibung der Fahreraktion gefunden. Die Brauchbarkeit dieses neu geschaffenen Parameters hat sich bestätigt. Eine erweiterte Basis zur Parameteridentifikation, bzw. zur Überprüfung möglicher zusätzlicher Einflussgrößen wäre wünschenswert. Eine höhere Anzahl von Testfahrern ist das nächste Ziel im Rahmen dieser Studien.

Etwas überraschend war die Erkenntnis, dass die Dauer eines Fahrstreifenwechsels zwar vom Spurversatz abhängt und auch von der Intensität der Ausführung durch den Fahrer, aber kaum von der Fahrgeschwindigkeit. Diese Erkenntnis gipfelt in einer analytischen Formulierung für die Dauer des Fahrmanövers, welche nur von den beiden obgenannten Größen abhängt. Im weiteren wurden mittels statistischer Methoden und im Sinne eines Black-Box Modells

analytische Formulierungen für das Fahrstreifenwechselmanövers gefunden mit denen schon sehr gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Diese Formulierungen bedürfen zwar noch einer weiteren Absicherung durch Messungen mit einem größeren Probandenpool, sind aber ein vielversprechender Ausgangspunkt für weitere Studien.

Als Nebenprodukt der Fahrstreifenwechselversuche kann auch die Messung der Antwortzeiten der Fahrer durch eine Lenkreaktion auf einen visuellen Reiz gesehen werden. Jedenfalls konnten weit mehr als 100 Reaktionszeit-Versuche durchgeführt werden. Die Ergebnisse liegen nun in Tabellenform vor. Die Tatsache, dass nur zwei Fahrer all diese Experimente ausgeführt haben, ist aus statistischer Sicht zwar bedauerlich und schränkt die Allgemeinheit der Aussagen auch ein, aber die Autoren arbeiten an einem neuerlichen Testprogramm mit mehr Teilnehmer_innen. Im Hinblick auf die generische und analytische Beschreibung eines Motorradfahrers der ein Fahrstreifenwechselmanövers konnten aber jedenfalls Fortschritte erzielt werden.

Danksagung

Die Autoren danken insbesondere der KTM Motorrad AG, Mattighofen, Österreich, für die Bereitstellung des in dieser Studie verwendeten Motorrads.

Weiters gebührt unserem Kollegen Ing. Manfred Neumann besonderer Dank für seine wertvolle Hilfe bei der Vorbereitung und Durchführung der Messungen.

Literatur

- [1] Watanabe, Y., Yoshida, K., Motorcycle Handling Performance for Obstacle Avoidance, Paper no. 73033, Proceedings of the 2nd International Congress on Automotive Safety, July 16-18, 1973.
- [2] NHTSA, Accident avoidance capabilities of motorcycles, January 1976.
- [3] NHTSA, Accident avoidance capabilities of motorcycles-lane change maneuver simulation and full-scale tests, October 1976.
- [4] Kuschefski, A., Brake or Swerve? Or both? The idea of the study and first results. Institut für Zweiradsicherheit, Essen, 1995.
- [5] Savino, Pierini, Lenne, Development of a low-cost motorcycle riding simulator for emergency scenarios involving swerving, J Automobile Engineering 2016, Vol 230(14).
- [6] Amodio, Panzani, Savaresi, Design of a lane change driver assistance system, with implementation and testing on motorbike, 2017 IEEE IV Redondo Beach, CA, USA.
- [7] Sharp, R.S., Motorcycle Steering Control by Road Preview, ASME J Dynamic Systems, Measurement and Control, July 2007, Vol 129.

- [8] Litschauer, S., Untersuchungen zum Spurwechselmanöver mit Motorrädern, Diplomarbeit, Inst. für Mechanik und Mechatronik, TU-Wien, 2020.
- [9] Ecker, H., Litschauer, S. Experimental Study On Lane Change Maneuvers With A Motorcycle, DETC2020-22713, Proc. of IDETC/CIE2020, Aug.16-19, St.Louis,MO,USA.
- [10] Schwieger.K., Saleh, P., Hula, A., Hahn, M., Genser, A., Ecker, H., Neumann, M., Evaluierung potentieller Gefahrenstellen für Motorradfahrer_innen basierend auf Fahrdynamikdaten – viaMotorrad, Forschungsbericht Österr. Verkehrssicherheitsfond, 2019.
- [11] Cossalter, V., „Motorcycle Dynamics“, 2nd. ed., 2002.