

RWTH Aachen University  
Fakultät für Maschinenwesen

Institut für Kraftfahrzeuge  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein

**Diplomarbeit**

**Messung der Schräglage von Motorrädern bei Kurvendurchfahrt**

**vorgelegt von:**

Herrn cand. ing. Christian Hädrich, Matr.-Nr.: 272570

**betreut von:**

Dipl.-Ing. Matthias Rittinger

externer Betreuer:

Dipl.-Ing. Wolfgang Hugemann

Aachen, September 2012

Inhalt und Ergebnisse dieser Arbeit sind ausschließlich zum internen Gebrauch bestimmt. Alle Urheberrechte liegen bei der RWTH Aachen University. Ohne ausdrückliche Genehmigung des betreuenden Lehrstuhls ist es nicht gestattet, diese Arbeit oder Teile daraus an Dritte weiterzugeben.



|       |                                                                |    |
|-------|----------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Einleitung.....                                                | 5  |
| 2     | Der Motorradunfall.....                                        | 6  |
| 2.1   | Unfallzahlen.....                                              | 6  |
| 2.2   | Beispielunfall .....                                           | 7  |
| 2.3   | Befunde aus der Literatur .....                                | 9  |
| 3     | Kurvenfahrt.....                                               | 10 |
| 3.1   | Phasen der Kurvenfahrt.....                                    | 10 |
| 3.2   | Kräfte am Fahrzeugschwerpunkt bei stationärer Kurvenfahrt..... | 11 |
| 3.3   | Einfluss der Reifenbreite auf die Schräglage .....             | 13 |
| 3.4   | Korrekturen während der Kurvenfahrt.....                       | 15 |
| 3.5   | Kurventechniken.....                                           | 15 |
| 4     | Messtechnik .....                                              | 17 |
| 4.1   | GPS-Logger.....                                                | 17 |
| 4.1.1 | Global Positioning System .....                                | 18 |
| 4.1.2 | Aufbau des GPS-Systems.....                                    | 18 |
| 4.1.3 | GPS-Nachricht .....                                            | 21 |
| 4.1.4 | Die Navigationsnachricht.....                                  | 21 |
| 4.1.5 | Positionsbestimmung auf der Erde.....                          | 23 |
| 4.1.6 | Berechnung der Geschwindigkeit.....                            | 24 |
| 4.1.7 | DGPS.....                                                      | 25 |
| 4.1.8 | GPS Datenformat NMEA-0813.....                                 | 26 |
| 4.2   | Helmkamera GoPro Hero .....                                    | 28 |
| 5     | Fahrversuche.....                                              | 29 |
| 5.1   | Versuchsstrecke .....                                          | 29 |
| 5.2   | Probanden.....                                                 | 30 |
| 5.3   | Durchführung der Fahrversuche .....                            | 32 |
| 5.3.1 | Ebenes Wiegen.....                                             | 33 |
| 5.3.2 | Schräges Wiegen.....                                           | 35 |
| 5.3.3 | Bestimmung des Radius des Reifenquerschnitts.....              | 37 |



|       |                                                                      |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 5.4   | Fehlerbetrachtung.....                                               | 38 |
| 6     | Versuchsauswertung .....                                             | 42 |
| 6.1   | Erzeugung der GPS-Rohdaten .....                                     | 42 |
| 6.2   | Verarbeitung der GPS-Rohdaten .....                                  | 43 |
| 6.2.1 | Umwandlung der Kugelkoordinaten in kartesische Koordinaten .....     | 44 |
| 6.3   | Weiterverarbeitung der Daten mit DADiSP .....                        | 45 |
| 6.3.1 | Berechnung des Bahnradius .....                                      | 46 |
| 6.3.2 | Berechnung der Schräglage.....                                       | 49 |
| 6.4   | Verifizierung der Versuchsauswertung.....                            | 50 |
| 6.4.1 | Versuchsaufbau .....                                                 | 50 |
| 6.4.2 | Auswertung der Ergebnisse .....                                      | 51 |
| 6.4.3 | Vergleich der Ergebnisse .....                                       | 52 |
| 7     | Versuchsergebnisse .....                                             | 53 |
| 7.1   | Schräglage über alle Fahrer .....                                    | 53 |
| 7.2   | Einfluss der persönlichen Risikobereitschaft auf die Schräglage..... | 54 |
| 7.3   | Einfluss der Fahrerfahrung auf die Schräglage .....                  | 56 |
| 7.4   | Einfluss der Fahrzeugklasse auf die Schräglage .....                 | 57 |
| 7.5   | Abhängigkeit von zwei ausgewählten Merkmalen.....                    | 59 |
| 7.6   | Bewertung der Ergebnisse.....                                        | 60 |
| 8     | Zusammenfassung .....                                                | 61 |
| 9     | Formelzeichen und Indizes .....                                      | 64 |
| 10    | Literatur .....                                                      | 66 |



## 1 Einleitung

Das Motorrad gehört zu den riskantesten Fahrzeugen, die am Straßenverkehr teilnehmen. Besonders hoch ist die Eigengefährdung der Motorradaufassen. Die Fremdgefährdung ist im Vergleich zu anderen Fahrzeugklassen eher gering. Aktuelle Unfallstatistiken belegen, dass die Wahrscheinlichkeit, bei einem Motorradunfall ums Leben zu kommen, viermal so hoch ist wie bei einem Autounfall [DES11]. Die Folge solch schwerer Unfälle sind Gerichtsverfahren, bei denen es oft um hohe Streitwerte für Hinterbliebenenrenten oder Invalidenrenten bzw. -entschädigungen geht. In solchen Fällen wird ein Sachverständiger für die Rekonstruktion des Unfalls und zur Klärung offener Fragen vom Gericht hinzugezogen.

Bei Motorradunfällen auf Landstraßen, die sich im Anschluss an eine Kurve ereignen, stellt sich für den Sachverständigen in der Unfallrekonstruktion regelmäßig die Frage nach der maximalen Geschwindigkeit, mit der die Kurve auf einem Motorrad durchfahren werden konnte. Diese ist zum einen von technischen Faktoren wie etwa der Reifenhaftung und der Fahrwerksauslegung abhängig. Zum anderen spielen jedoch Fahrkönnen und psychologische Faktoren, beispielsweise die vom Fahrer maximal akzeptierte Schräglage, eine wichtige Rolle. Letzteres wird maßgeblich durch die Fahrerfahrung beeinflusst.

Aus den Spuren am Unfallort, zu denen die Endlage der Fahrzeuge, Kratzspuren im Asphalt, das Splitterfeld der Fahrzeuge und die Wurfweite des Motorradfahrers gehören, lässt sich die Geschwindigkeit der Kurvendurchfahrt und damit Schräglage des Fahrers nicht rekonstruieren. Der Sachverständige greift deshalb auf Empfehlungen aus der Literatur zurück. Die Richtwerte zu den abhängig von der Fahrerfahrung akzeptierten Schräglagen stammen aus dem Jahr 1981, wobei die Datengrundlage nicht dokumentiert ist [DAN81].

Im Rahmen dieser Arbeit sollen deshalb nachvollziehbare Messungen auf aktuellen Motorrädern im freien Straßenverkehr durchgeführt werden. Zu Beginn wird die Relevanz des Unfalltypus kurz erläutert. Anschließend werden Befunde aus der Literatur sowie die theoretischen Hintergründe zu den Themen Kurvenfahrt und GPS geliefert, da die Messungen mittels GPS-Loggern erfolgen. Die Auswertung der Querschleunigung und der Schräglage wird in Abhängigkeit der Fahrermerkmale, der eingesetzten Motorräder, der Fahrgeschwindigkeit und dem Streckenverlauf untersucht. Weiterhin werden durch das Befahren eines festgelegten Kurses charakteristische Streckeneinflüsse, wie beispielsweise die Fahrbahnquerneigung, ausgeschlossen. Am Ende der Arbeit erfolgt die Versuchsauswertung sowie eine Bewertung der Ergebnisse, bevor die Arbeit zusammengefasst wird.

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei der Firma ALLPAX und vor allem ihrem Geschäftsführer Herrn Klaus Pals für die spontane und großzügige Unterstützung bedanken. Auf der Suche nach einer adäquaten Waage hat sich Herr Pals ohne Zögern dazu bereit erklärt, mir die in Kapitel 5.3 zum Einsatz kommende Waage für meine Diplomarbeit kostenlos zur Verfügung zu stellen.



## 2 Der Motorradunfall

In diesem Kapitel wird die Relevanz der vorliegenden Arbeit erörtert. Neben aktuellen Unfallzahlen soll der Nutzen für den Sachverständigen und ein Beispielunfall erläutert werden.

### 2.1 Unfallzahlen

Motorradfahren findet in Deutschland immer mehr Zuwachs. Am 1. Januar 2012 waren in Deutschland rund 3,8 Millionen zweirädrige Kraftfahrzeuge zugelassen. Dies entspricht einem Anteil von 7,26 % an allen zugelassenen Kraftfahrzeugen in Deutschland [KRA12].

Zugleich ist das Motorrad aber auch das mit Abstand riskanteste Verkehrsmittel hinsichtlich der Eigengefährdung. Im Jahre 2010 verunglückten insgesamt 26.969 Motorradfahrer. Als verunglückte Personen werden diejenigen bezeichnet, die bei einem Unfall leicht oder schwer verletzt oder gar getötet werden. Unter den Verunglückten befanden sich 635 Todesopfer [DES11].

Ein Vergleich des Anteils der Motorradaufsassen am Gesamtunfallgeschehen zeigt, dass ein deutlicher Anstieg mit zunehmender Schwere der Verletzungen festzustellen ist, Abb. 2-1. 2010 waren 5,7 % der leichtverletzten Personen Motorradaufsassen. Demgegenüber liegt der Anteil der Motorradaufsassen an den getöteten Personen bei 17,4 %.

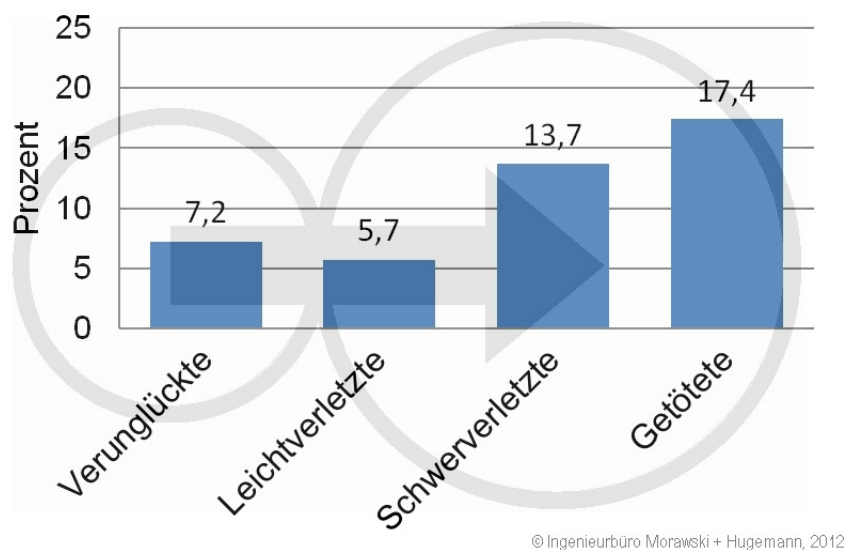


Abb. 2-1: Anteil der Motorradaufsassen am Unfallgeschehen 2010 [ADA09]

Es macht Sinn, das bestandsbezogene Risiko zu ermitteln. Dabei wird die Zahl der Verunglückten Personen einer Fahrzeugklasse auf den jeweiligen Fahrzeugbestand bezogen. Das bestandsbezogene Risiko, auf einem Motorrad getötet zu werden, ist im Jahr 2010 mehr als viermal so hoch wie im Auto. Die Gründe hierfür liegen auf der Hand: Motorradfahrer sind nahezu ungeschützt. Sie haben keine schützende Fahrgastzelle und nur äußerst selten Airbags um sich herum, die sie im Falle eines Unfalls beschützen können [DES11].

Der Motorradunfall lässt sich in verschiedene Kategorien einteilen. So kamen rund 28 % (7538 Personen) der verunglückten und 30 % (192 Personen) der getöteten Motorradfahrer bei Alleinunfällen zu Schaden, das heißt ohne die Beteiligung eines weiteren Verkehrsteilnehmers. Bei der weitaus höheren Zahl von 13556 Zusammenstößen mit einem Pkw erlitten 1378 Pkw-Insassen (8,84 %) und 14205 (91,16 %) Motorradaufsassen Verletzungen. Der Unfallverursacher war jedoch in 71 % der Fälle der Autofahrer [DES11].

## 2.2 Beispielunfall

Bei Motorradunfällen auf Landstraßen, die sich im Anschluss an eine Kurve ereignen, stellt sich regelmäßig die Frage nach der maximalen Geschwindigkeit, mit der die Kurve auf einem Motorrad durchfahren werden konnte. Dies ist für die Sichtverhältnisse der Unfallbeteiligten von großer Bedeutung. Im vorangegangenen Kapitel konnte gezeigt werden, dass bei Motorradunfällen in der Regel mit schweren Verletzungen der Aufsassen und einem hohen Streitwert zu rechnen ist.

Ein solcher Unfall soll im Folgenden kurz beschrieben werden.



Abb. 2-2: Luftbild der Unfallörtlichkeit

An der markierten Einmündung in Abb. 2-2 ereignet sich ein schwerer Motorradunfall, bei dem ein Pkw aus der Einmündung nach links auf die Landstraße abzubiegen versucht, während es zu einer Kollision mit dem Zweirad kommt. Der Motorradfahrer fährt die Landstraße aus Südwesten kommend in Richtung Nordosten. Ungefähr 200 m vor der Einmün-

dung beschreibt die Landstraße in Fahrtrichtung des Motorrades eine leichte Links- und direkt im Anschluss eine leichte Rechtskurve. Eine besondere Geschwindigkeitsbegrenzung gibt es nicht. Im Anschluss an den s-förmigen Verlauf der Fahrbahn befindet sich auf der rechten Seite in Fahrtrichtung eine Baum- und Buschreihe, welche die wechselseitige Sicht zwischen den Unfallbeteiligten behindert. Eine solche Unfallcharakteristik ist für Landstraßen typisch.

Im Rahmen der Unfallrekonstruktion muss eine Sichtuntersuchung durchgeführt werden. Bei einer Sichtuntersuchung werden in zuvor definiertem Abstand Fotos aus der Sicht beider Unfallbeteiligten gefertigt, um die Sichtverhältnisse und die Entfernungen zwischen beiden Fahrzeugen nachvollziehbar zu dokumentieren, bei welchen ein erster Sichtkontakt möglich ist. Im vorliegenden Fall kann der Pkw-Fahrer das Krad frühestens in einer Entfernung von 130 m sehen, wobei sich das Motorrad zu diesem Zeitpunkt noch im Schatten der Baumgruppe befindet und lediglich der Scheinwerfer klar zu erkennen ist.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen ist es für den Sachverständigen von enormer Relevanz zu wissen, wie schnell das Motorrad in der Kurve gefahren ist. Nur so lässt sich die zentrale Frage nach dem Zeitpunkt, zu dem das Krad im Sichtfeld des Pkw-Fahrers auftaucht, rekonstruieren. Die Abb. 2-3 zeigt die Endstellung der beiden Fahrzeuge und das Splitterfeld sowie die Endlage des Motorradfahrers nach dem Unfall. Aus den Deformationen beider Fahrzeuge und deren Endstellung, der Wurfweite des Motorradfahrers und dem Splitterfeld an der Unfallstelle können Rückschlüsse auf die Kollisionsgeschwindigkeiten beider Unfallbeteiligten gezogen werden.

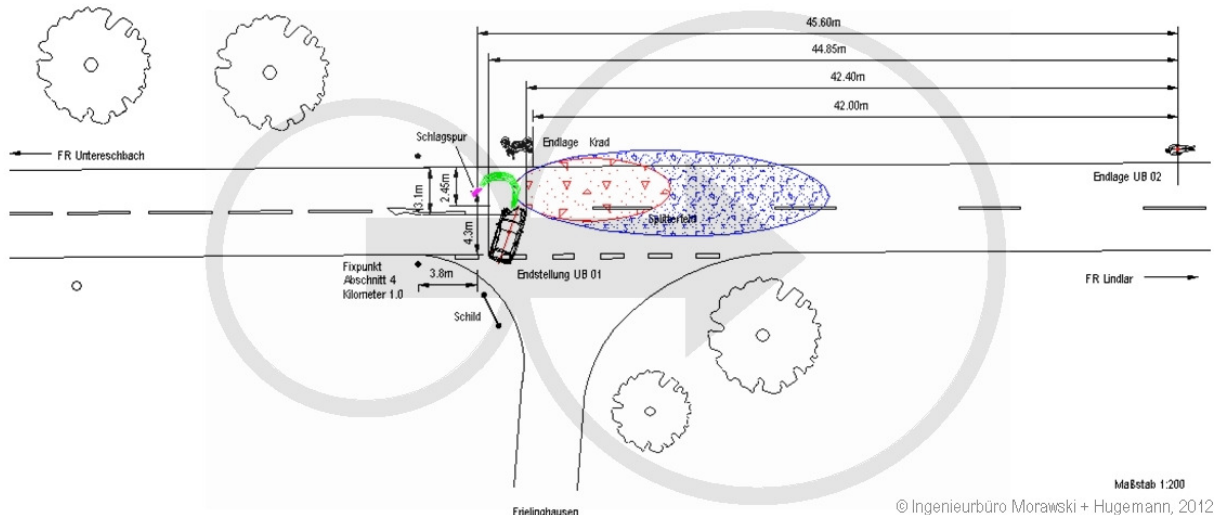


Abb. 2-3: Unfallendsituation

Die Kurvengeschwindigkeit und damit die Schräglage des Motorrades lässt sich jedoch aus Abb. 2-3 nicht ermitteln. Hier ist der Sachverständige auf Erfahrungswerte aus der Literatur angewiesen.



### 2.3 Befunde aus der Literatur

Untersuchungen über die Geschwindigkeit eines Motorradfahrers in der Kurve werden in der Literatur nur an einer Stelle erwähnt. [DAN81] gibt in seinem Buch aus dem Jahre 1981 folgende Empfehlung für die Schräglage  $\lambda$  bei der Berechnung von Kurvenfahrten von Motorrädern:

- bis 25° bei einer Fahrpraxis von 2 bis 3 Jahren
- bis 30° von geübten Normalfahrern ohne Unsicherheitsgefühl ausschöpfbar
- 40° und mehr von sehr versierten Fahrern

In dieser Quelle und auch auf weitere Nachforschungen findet sich kein Hinweis über die Herkunft dieser Daten. Eine Kategorisierung nach der Größe der Kurvenradien wird nicht vorgenommen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass diese Empfehlungen über 30 Jahre alt sind und sich die Technik von damals mit derjenigen heutiger Motorrädern nicht mehr zu vergleichen ist. Die Entwicklung der Motorräder und vor allem der modernen Reifen ermöglicht heute einen ganz anderen Fahrstil als in den 80er Jahren.

Weitere Empfehlungen für die Annahme von Schräglagen bei der Kurvendurchfahrt wie in [LAN07] finden sich zwar, beziehen sich aber alle auf [DAN81].

### 3 Kurvenfahrt

Um das Motorrad durch die Kurve zu bewegen, muss sich der Fahrer mit seiner Maschine in die Kurve legen. Dieser in der Praxis automatisch ablaufende Prozess besteht im Detail aus einer Reihe einzelner Handlungsschritte. Im Folgenden soll die Kurvenfahrt in ihrer Komplexität näher analysiert werden.

Aus Gründen der Vollständigkeit wird zunächst beschrieben, auf welche Weise der Motorradfahrer sein Motorrad bei der Geradeausfahrt im Gleichgewicht halten kann. Hierfür sind zwei Bereiche zu definieren, in denen das Motorrad aus unterschiedlichen Gründen in der Senkrechten bleibt. Ab einer Geschwindigkeit von zirka  $v = 25 \text{ km/h}$  stabilisieren die Kreiselkräfte der Räder und die inneren Kreiselkräfte der rotierenden inneren Bauteile (wie zum Beispiel der Kurbelwelle) die Maschine. Führt der Fahrer jedoch langsamer, reichen die Kreiselkräfte nicht aus, um die Maschine im Gleichgewicht zu halten. In einer Reihe von Versuchen konnte gezeigt werden, dass der Fahrer bei Geschwindigkeiten  $v < 25 \text{ km/h}$  im Sekundentakt mithilfe kleinster Lenkausschläge von ein bis zwei Grad nach links und rechts das Motorrad im Gleichgewicht hält [IFZ10].

#### 3.1 Phasen der Kurvenfahrt

Das Einleiten einer Kurvenfahrt ist das bewusste Herbeiführen einer Instabilität aus der Gleichgewichtslage. In der Regel lässt sich die Kurvenfahrt auf der Landstraße in verschiedene Phasen einteilen. Zuerst bremst der Fahrer die Maschine auf den Einlenkpunkt ab. Ziel einer jeden Kurvenfahrt ist es, exakt im Scheitelpunkt der Kurve die gewünschte Schräglage zu erreichen. Diese komplexe Entscheidung läuft innerhalb weniger Sekundenbruchteile ab. Am zuvor festgelegten Einlenkpunkt macht der Fahrer eine kurze Lenkbewegung in die kurvenabgewandte Richtung, Phase 1 in Abb. 3-1.

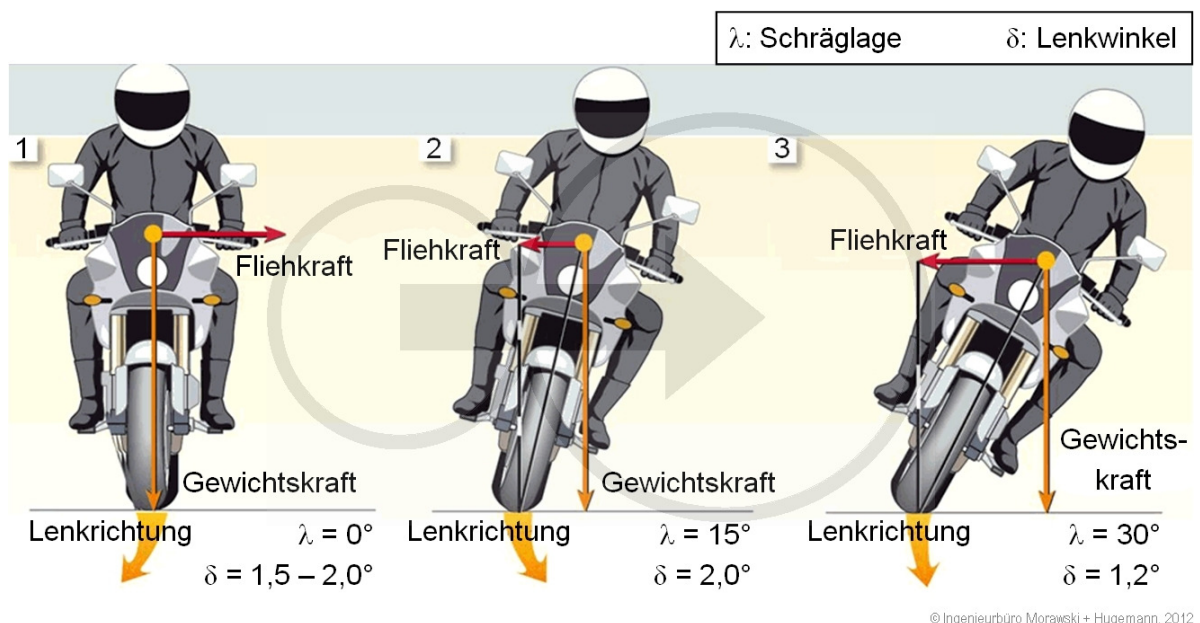


Abb. 3-1: Einleiten der Kurvenfahrt [IFZ10]

Der erste Lenkimpuls, ähnlich dem Ausbalancieren der Maschine bei Geradeausfahrt bei niedrigen Geschwindigkeiten, bringt das Motorrad aus dem Gleichgewicht und die Maschine kippt in Richtung Kurvenmittelpunkt (nach links in Abb. 3-1).

Verharrt der Fahrer in Phase 1, würde die Maschine schlicht und ergreifend umkippen. Zur Vermeidung des Unfalls reagiert der Fahrer auf die kippende Maschine mit einem sanften Lenkeinschlag in Richtung der Kurve, nach links in Abb. 3-1 (Phase 2). Mit dem gewählten Lenkeinschlag stellt sich im Verlauf der Kurve ein Gleichgewichtszustand ein und die Kurve kann in der gewünschten Schräglage durchfahren werden, Abb. 3-1 Phase 3. Während der gesamten Kurvenfahrt kann der Fahrer den Verlauf der Fahrlinie sowohl durch positives oder negatives Beschleunigen als auch durch die Veränderung des Lenkwinkels beeinflussen, siehe Kapitel 3.4.

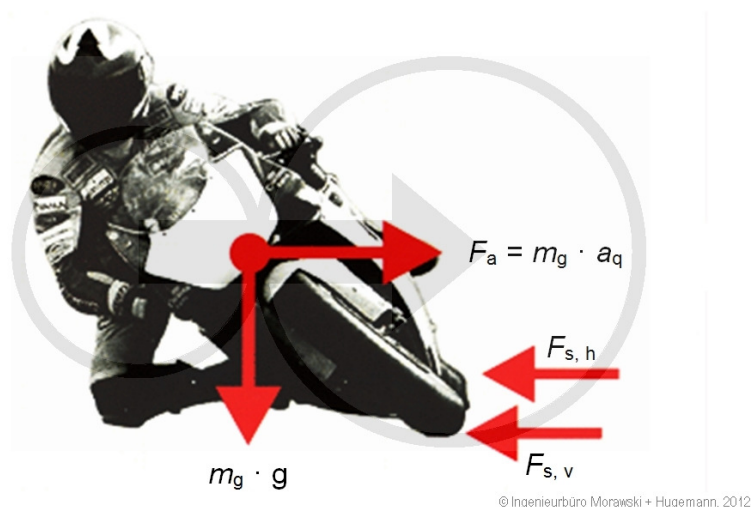
### 3.2 Kräfte am Fahrzeugschwerpunkt bei stationärer Kurvenfahrt

Befährt ein Motorradfahrer eine Kurve mit konstantem Bahnradius, wirkt aufgrund des sich ständig ändernden Bewegungszustandes eine konstante Querbewegung auf die Einheit Fahrer und Maschine. Die Querbewegung zeigt grundsätzlich zum Momentanpol der durchfahrenen Kurve und berechnet sich wie folgt:

$$a_q = \frac{v^2}{R} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Die Querbewegung wirkt auf die träge Masse der Einheit Maschine mit Fahrer und bewirkt eine Seitenkraft im Gesamtschwerpunkt, Abb. 3-2. Diese Seitenkraft muss von den Reifenseitenkräften, welche in der Fahrbahnebene am vorderen und hinteren Reifenlatsch angreifen, im Gleichgewicht gehalten werden:

$$m_g \cdot a_q = \sum_i F_{s,i} = F_{s,v} + F_{s,h} \quad \text{Gl. 3-2}$$



© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 3-2: Vereinfachte Darstellung der Kräfte bei stationärer Kurvenfahrt [ECK10a]

Zusätzlich zum Kräftegleichgewicht in horizontaler Richtung muss das Momentengleichgewicht um den Radaufstandspunkt hergestellt werden. Da das Moment der Fliehkraft um den Radaufstandspunkt ständig bestrebt ist, die Maschine zur Kurvenaußenseite zu kippen, würde der Fahrer ohne weiteres Handeln umfallen. Aus diesem Grund durchfahren Einspurfahrzeuge wie das Motorrad Kurven unter Schräglage. Die Schräglage bewirkt eine Verschiebung des Gesamtschwerpunktes von Maschine und Fahrer zur Kurveninnenseite. Aus dieser Verschiebung resultiert ein Moment der Gewichtskraft um den Reifenaufstandspunkt, welches dem Moment der Fliehkraft entgegen wirkt [ECK10a].

Während der stationären Kurvenfahrt stehen die resultierenden Momente aus Gewichtskraft  $F_G$  und Zentrifugalkraft  $F_a$  im ständigen Gleichgewicht. Abb. 3-3 zeigt die Kräfte und die daraus resultierenden Momente während der stationären Kurvenfahrt an einem vereinfachten Modell.

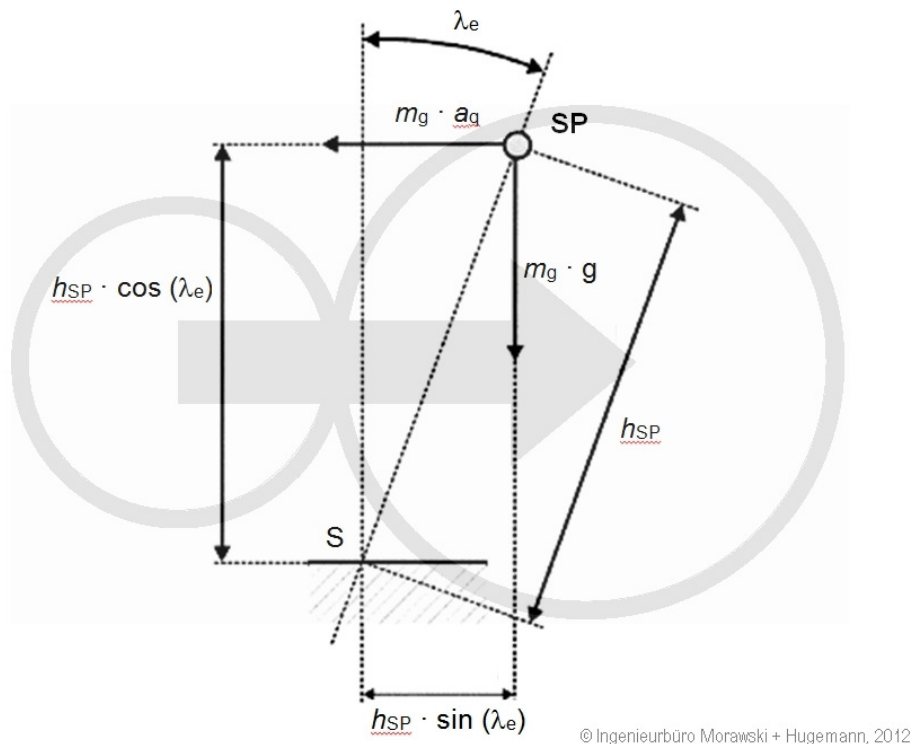


Abb. 3-3: Kräfte am Gesamtschwerpunkt der Einheit Maschine mit Fahrer [ECK10a]

Folgende Gleichgewichtsbedingung, Gl. 3-3, gilt nach Abb. 3-3

$$\sum M_{i,S} = 0 = m_g \cdot a_q \cdot h_{SP} \cdot \cos(\lambda_e) - m_g \cdot g \cdot h_{SP} \cdot \sin(\lambda_e)$$

$$\Leftrightarrow m_g \cdot a_q \cdot h_{SP} \cdot \cos(\lambda_e) = m_g \cdot g \cdot h_{SP} \cdot \sin(\lambda_e)$$

$$\Leftrightarrow \frac{a_q}{g} = \tan(\lambda_e) \Leftrightarrow \lambda_e = \tan^{-1}\left(\frac{a_q}{g}\right)$$

Gl. 3-3



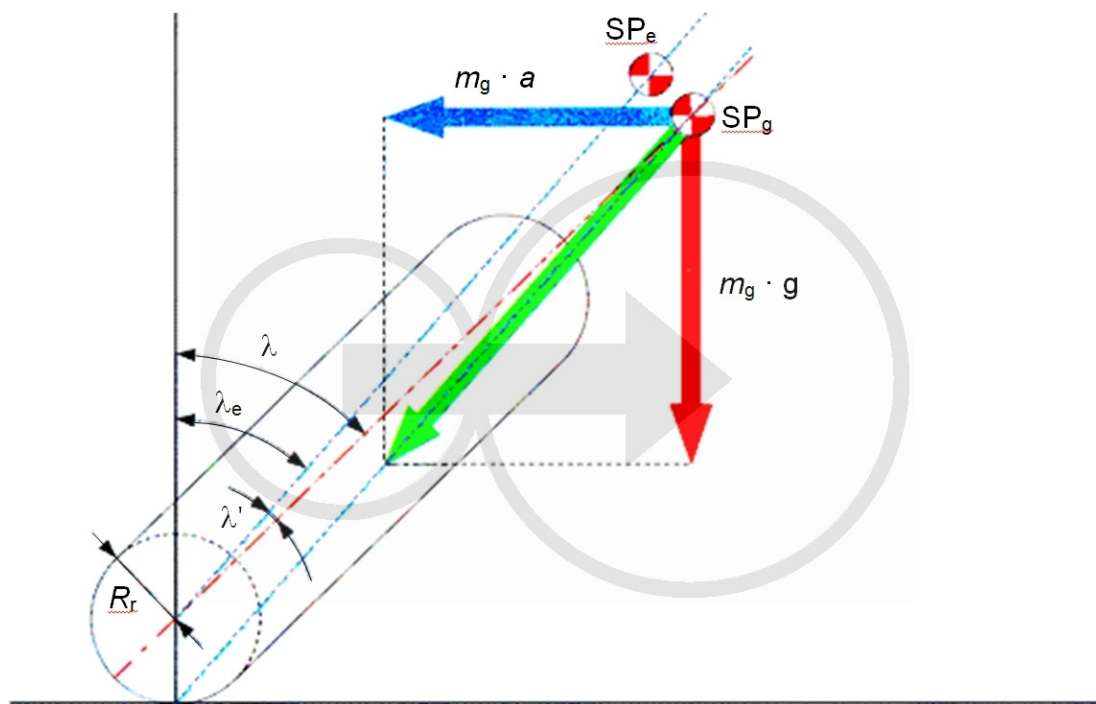
Aus Gl. 3-3 wird ersichtlich, dass die Schräglage  $\lambda_e$ , mit der eine Kurve mit dem Radius  $R$  bei gewählter Geschwindigkeit  $v$  durchfahren werden kann, einzig und allein von der Querbesehleunigung  $a_q$  und damit nach Gl. 3-1 von den Parametern Bahnradius  $R$  und Geschwindigkeit  $v$  abhängt und völlig unabhängig von dem Fahrzeug ist [ECK10a].

### 3.3 Einfluss der Reifenbreite auf die Schräglage

Die zuvor gewonnene Erkenntnis ist nur unter der Annahme gültig, dass die Reifen des Motorrades als infinitesimal schmale Scheiben angenommen werden. In der Realität übt die Reifenbreite einen großen Einfluss auf das Fahrverhalten aus.

In der folgenden Herleitung des Einflusses der Reifenbreite auf die Schräglage wird der Reifenquerschnitt als kreisrund angenommen, Abb. 3-4.

Bewegt sich das Motorrad aus der Senkrechten in die Schräglage, kippt das Motorrad nicht um den Radaufstandspunkt, sondern rollt auf dem Reifenquerschnitt  $R_r$  ab, wodurch der Radaufstandspunkt in Richtung Kurveninnenseite wandert.



© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 3-4: Einfluss der Reifenbreite auf die Schräglage [COC05]

Die Verbindungslinie zwischen verschobenem Radaufstandspunkt und dem Schwerpunkt  $SP_g$  stimmt nun nicht mehr mit der Motorradebene überein, sondern ist im Schwerpunkt um den Winkel  $\lambda'$  geneigt.

Der Winkel zwischen der Senkrechten und der oben genannten Verbindungslinie wird als effektiver Schräglagenwinkel  $\lambda_e$  bezeichnet. Hieraus resultieren neue Hebelarme für die Ge-



wichtskraft und die Fliehkraft bei der Berechnung des Momentengleichgewichtes analog zu Gl. 3-3. Die in Gl. 3-3 durchgeführten Berechnungen sind bei der Annahme eines kreisrunden Reifenquerschnitts nur für die effektive Schräglage  $\lambda_e$  gültig. Für den tatsächlichen Schräglagenwinkel  $\lambda$  zwischen der Motorradebene und der Fahrbahnnormalen ergibt sich der zusätzliche Winkel  $\lambda'$ :

$$\lambda' = \arctan\left(\frac{R_r \cdot \sin(\lambda_e)}{h_{SP} - R_r}\right) \quad \text{Gl. 3-4}$$

Daraus resultiert der Gesamtschräglagenwinkel  $\lambda$ :

$$\lambda = \lambda_e + \lambda' \quad \text{Gl. 3-5}$$

Die Vernachlässigung der Reifenbreite bei der Berechnung der Schräglage führt demnach stets zu einer zu gering berechneten Schräglage. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang: Je breiter ein Reifen ist, desto stärker muss der Fahrer sich bei gleicher Geschwindigkeit mit seinem Motorrad in die Kurve legen. Im Folgenden soll dies anhand eines Beispiels näher erläutert werden. In Abb. 3-5 ist die Kurvenfahrt dreier Motorräder mit gleicher Schwerpunkthöhe und gleicher Geschwindigkeit, jedoch mit verschiedenen breiten Reifen gezeigt.

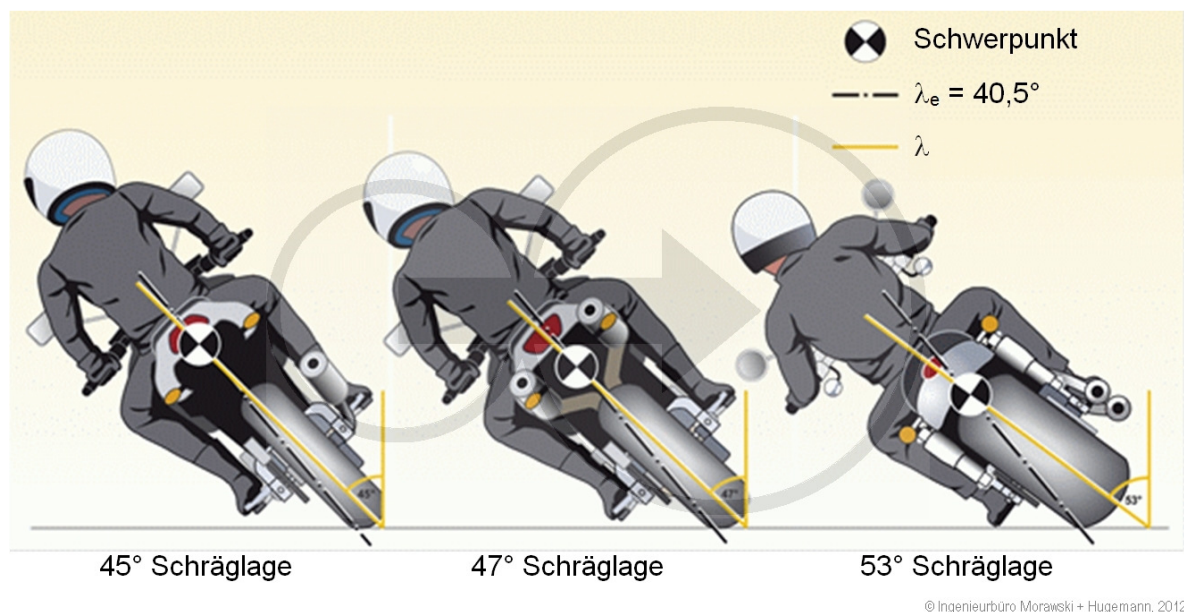


Abb. 3-5: Beispiel für den Einfluss der Reifenbreite auf die Schräglage [IFZ10]

Alle drei Maschinen haben nach Gl. 3-3 exakt den gleichen effektiven Schräglagenwinkel  $\lambda_e = 40,5^\circ$ . Aufgrund der unterschiedlichen Reifenbreiten unterscheidet sich die tatsächliche Schräglage der Maschinen um bis zu acht Grad. In der Praxis wäre ein Schräglagenwinkel von  $\lambda = 53^\circ$  für die Chopper in Abb. 3-5 rechts undenkbar, da die Fußrasten meist wesentlich eher aufsetzen.



### 3.4 Korrekturen während der Kurvenfahrt

Beschleunigt der Fahrer während der Kurvenfahrt seine Maschine und vergrößert somit seine Geschwindigkeit, vergrößert er ebenfalls nach Gl. 3-1 die Zentrifugalkraft, welche immer zur Kurvenaußenseite wirkt. Das Motorrad richtet sich demnach bei gleichbleibendem Lenkwinkel auf. Alternativ hat der Fahrer die Möglichkeit, durch eine erneute Veränderung des Lenkwinkels zur Kurveninnenseite das Motorrad wieder aufzurichten. Ein Abbremsen in der Kurve hat eine Verringerung der Geschwindigkeit und damit der Zentrifugalkraft zur Folge. Die Wahl einer engeren Fahrspur ist so möglich. Ist eine engere Fahrspur aufgrund einer sich zuziehenden Kurve bei konstanter Geschwindigkeit erwünscht, kann der Fahrer dies durch eine Öffnung der Lenkung zur Kurvenaußenseite erzeugen.

Die Kurvenfahrt kann also durch Beschleunigen der Maschine oder einen Lenkimpuls zur Kurveninnenseite beendet werden.

### 3.5 Kurventechniken

Die bisherigen Überlegungen und Berechnungen beziehen sich jeweils auf den Fall, dass der Fahrer während der Kurvenfahrt in einer Flucht mit der Maschinenachse bleibt. Tatsächlich gibt es jedoch verschiedene Techniken, eine Kurve zu durchfahren, vgl. Abb. 3-6.

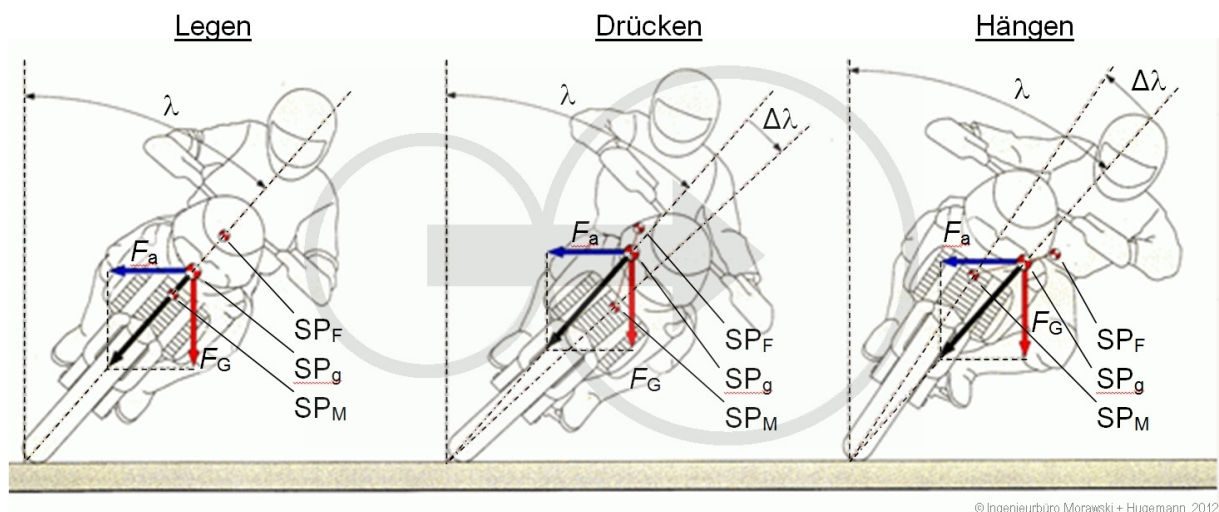


Abb. 3-6: Verschiedene Kurventechniken bei gleicher Geschwindigkeit [COC05]

Die mit den Modellen der vorangegangenen Abschnitte berechnete Schräglage stimmt mit der Schräglage des Fahrstils „Legen“ überein. Hierbei liegen der Schwerpunkt der Maschine  $SP_M$  und der des Fahrers  $SP_F$  auf einer Achse, sodass der Gesamtschwerpunkt  $SP_g$  ebenfalls auf dieser Achse liegt, Abb. 3-6 links.

Das „Drücken“ stammt aus dem Geländesport und eignet sich besonders für langsame und enge, unübersichtliche Kurven, die einen blitzartigen Kurswechsel erfordern. In der Mitte der Abb. 3-6 ist das Fahrverhalten eines Fahrers mit diesem Fahrstil gezeigt. Mithilfe von Gl. 3-3

kann gezeigt werden, dass eine Kurve mit einer definierten Geschwindigkeit mit nur einem einzigen Schräglagenwinkel durchfahren werden kann, wobei die Schräglage als gedachte Linie durch den Radaufstandspunkt und den Gesamtschwerpunkt aus Fahrer und Maschine  $SP_g$  definiert ist. Die Schräglage durch den Gesamtschwerpunkt ist die gleiche, wie bei dem Fahrstil „Legen“. Vergleicht man die Schräglagen durch den Schwerpunkt der beiden Motorräder  $SP_M$ , so erreicht man durch das „Drücken“ eine deutlich größere Schräglage, als durch das in die Kurve „Legen“. Der Fahrstil „Drücken“ bietet verglichen mit dem Fahrstil „Legen“ keinen Zugewinn an Grip auf der Straße. Es ist durchaus vorstellbar, dass mit zunehmender Schräglage die Reifenaufstandsfläche, auch Reifenlatsch genannt, abnimmt [COC05, IFZ10].

Fahrer von Renn- und Supersport-Maschinen bedienen sich der Tatsache des sich verändernden Reifenlatsches und „Hängen“ sich während der Kurvenfahrt von der Maschine. Der Schwerpunkt des Fahrers  $SP_F$  liegt unterhalb des Schwerpunktes der Maschine  $SP_M$ , so dass das Motorrad die Kurve mit deutlich geringerer Schräglage durchfahren kann, als beim „Legen“, Abb. 3-6. Bezogen auf den Gesamtschwerpunkt wirken bei gleichem Bahnradius und gleicher Geschwindigkeit die identischen Zentrifugal- und Gewichtskräfte, wodurch der Schräglagenwinkel durch Radaufstandspunkt und Gesamtschwerpunkt auch derselbe ist. Durch die größere Radaufstandsfläche können jedoch wesentlich höhere Seitenkräfte übertragen werden [COC05].



## 4 Messtechnik

Grundsätzlich lässt sich die Schräglage von Motorrädern mit einem Schräglagensensor ermitteln. Die junge Entwicklung des Bosch-Schräglagensensors zeigt, dass das Messen der Schräglage nicht trivial ist. Ein fest montierter Beschleunigungssensor zum Beispiel neigt sich mit dem Motorrad, sobald dieses die Senkrechte verlässt. Aus diesem Grund misst man mit Beschleunigungssensoren die Querschleunigung immer nur anteilmäßig. Auch die Verwendung von Drehratensensoren alleine ist keine Lösung. Die Drehrate muss doppelt integriert werden, um die Schräglage zu errechnen. Richtet sich das Motorrad wieder auf, bedarf es einem weiteren Sensor, welcher dies erkennt und die Schräglage bei Erreichen der Senkrechten wieder nullt. Eine Kombination der beiden Sensoren stellt der von Bosch entwickelte Sensor dar.

Bosch hat 2009 den ersten Schräglagensensor für Motorräder in den Handel gebracht. In dem Sensor sind zwei Drehratensensoren sowie zwei Beschleunigungssensoren verbaut. Gemessen wird bei diesem Sensor der Neigungswinkel des Motorrades aus der Vertikalen. BMW und Aprilia beispielsweise bieten diesen Sensor ab Werk bei einigen Maschinen an. Der Sensor muss genau im Schwerpunkt des Motorrades installiert werden und lässt sich nicht für Versuchszwecke individuell an jedem Motorrad nachrüsten, ohne bauliche Veränderungen an den Maschinen vorzunehmen. Aus diesem Grund kommen bei den Fahrversuchen in dieser Arbeit zwei GPS-Logger und eine Helmkamera zum Einsatz, wobei der zweite Logger nur als Backup genutzt wird und die Helmkamera der Überprüfung der freien Fahrt dient. Das Signal eines GPS-Loggers reicht aus, um die Schräglage mittels mathematischen Modellen zu bestimmen. Die Funktionsweise und Verwendung des Global Positioning Systems und der GPS-Logger wird in diesem Kapitel erläutert.

### 4.1 GPS-Logger

GPS-Logger sind kleine, handliche GPS-Empfänger mit einem internen Speicher. Sie schreiben während des Betriebs alle verarbeiteten GPS-Daten mit. Das Ergebnis kann im Anschluss am Computer ausgewertet werden.

Die beiden in dieser Arbeit zum Einsatz kommenden GPS-Logger der Marke QStarz tragen die Bezeichnung BT-Q1000EX (10 Hz), Abb. 4-1.



Abb. 4-1: QStarz BT-Q1000EX Race Logger [VAR12]

Bedingt durch die Verwendung der verschiedensten Motorräder in den Fahrversuchen muss eine Lösung gefunden werden, die GPS-Logger möglichst unkompliziert zu installieren, ohne bauliche Veränderungen an den Motorrädern vorzunehmen. Die beiden verwendeten GPS-Logger wurden in einer Pilotuntersuchung mit zwei weiteren GPS-Loggern, dem DL1-Logger und dem externen GPS-Empfänger GPS18-5Hz von Garmin in Kombination mit einem PDA, verglichen. Vor allem wegen ihrer sehr hohen Genauigkeit sowie ihrer Handlichkeit und der damit verbundenen einfachen Handhabung wurden die beiden GPS-Logger von QStarz ausgewählt.

Die Abmessungen der GPS-Logger betragen 72,2 x 46,5 x 20 mm. Die geringe Größe ermöglicht es, die Geräte während der Versuche in das Kartenfach des Tankrucksacks am Motorrad zu legen oder, falls der Fahrer über keinen Tankrucksack verfügt, die Logger mithilfe von Kabelbindern am Lenker oder den Spiegeln schnell und sicher zu befestigen. So wird eine optimale, ungehinderte Ausrichtung der Logger in Richtung Himmel gewährleistet.

In dem GPS-Logger BT-Q1000EX von QStarz ist der MTK II GPS-Chip verbaut. Die Empfangsempfindlichkeit beträgt -165 dBm. Mit seinen 66 Kanälen ist es dem Chip möglich, die Datenströme der Satelliten zeitversetzt und unabhängig voneinander zu verarbeiten. Die maximale Abtastrate der beiden verwendeten GPS-Logger beträgt durch die hohe Anzahl der Kanäle 5 bzw. 10 Hz. Der interne Speicher bietet Platz für 400.000 Wegpunkte.

Durch die mitgelieferte Software kann der Logger konfiguriert werden. Im Anschluss an die Versuche lassen sich die aufgenommenen GPS-Daten im NMEA-Datenformat exportieren und stehen so direkt für die weitere Auswertung in Excel und DaDISP zur Verfügung.

#### **4.1.1 Global Positioning System**

Das Global Positioning System, kurz GPS, wurde vom amerikanischen Verteidigungsministerium (U.S. Department of Defense, DoD) entwickelt und dient der weltweiten, wetterunabhängigen, satellitengestützten Positions- und Zeitbestimmung eines ruhenden oder bewegten Objektes. Die vollständige Bezeichnung lautet NAVSTAR-GPS und steht für NAVigation System with Timing And Ranging Global Positioning System [KOW09].

In dieser Arbeit kommt nur das amerikanische NAVSTAR-GPS zum Einsatz. Auf die (sich zum Teil in Planung befindlichen) GPS-Systeme GALILEO und GLOSNASS wird deshalb nicht eingegangen.

#### **4.1.2 Aufbau des GPS-Systems**

Das GPS-System besteht aus drei Segmenten, dem Weltraumsegment, dem Kontrollsegment und dem Benutzersegment. Abb. 4-2 zeigt die einzelnen Bestandteile sowie die zugehörigen Kommunikationsrichtungen.



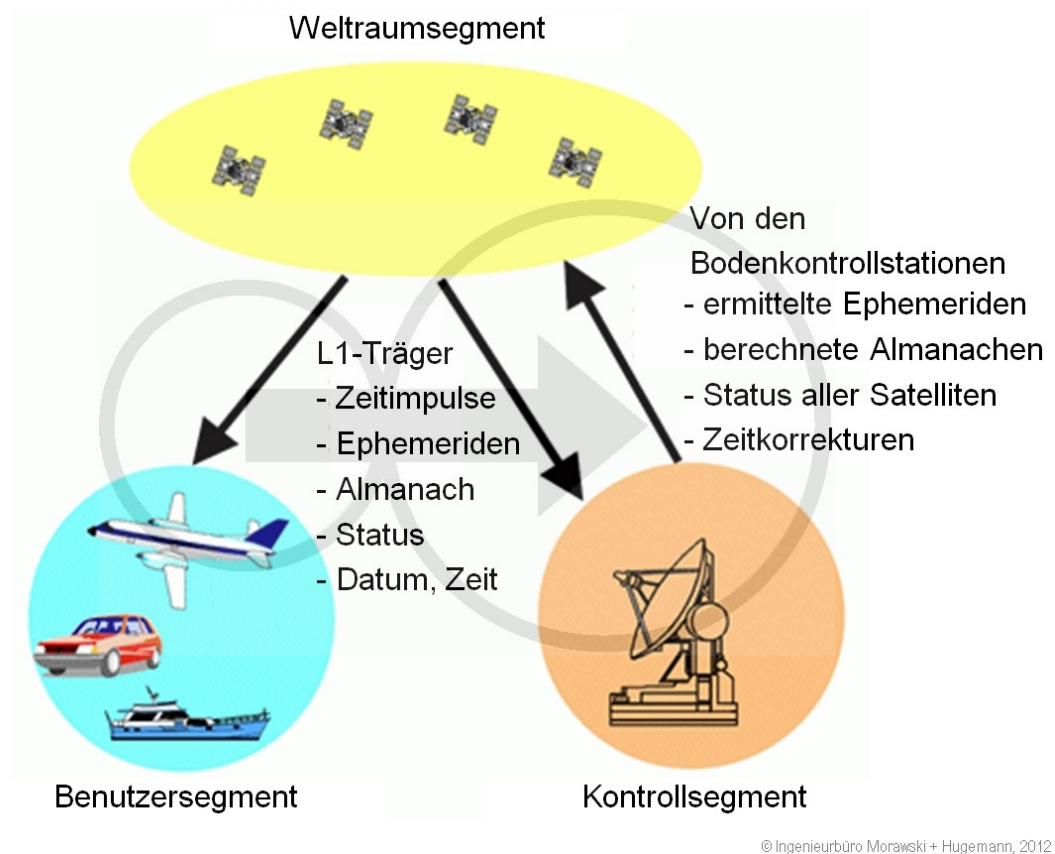


Abb. 4-2: Bestandteile des GPS-Systems [ZOG06]

Derzeit umkreisen 29 aktive Satelliten die Erde in einem Abstand von 20.180 km. Diese sind auf sechs jeweils um  $55^\circ$  zum Äquator geneigte Bahnen verteilt, Abb. 4-3. Für eine Erdumrundung benötigt ein Satellit 11 h 58 min. Er befindet sich demnach nach 23 h 56 min wieder über seinem Ausgangspunkt. Dies entspricht genau einem Sternentag [HUG07].

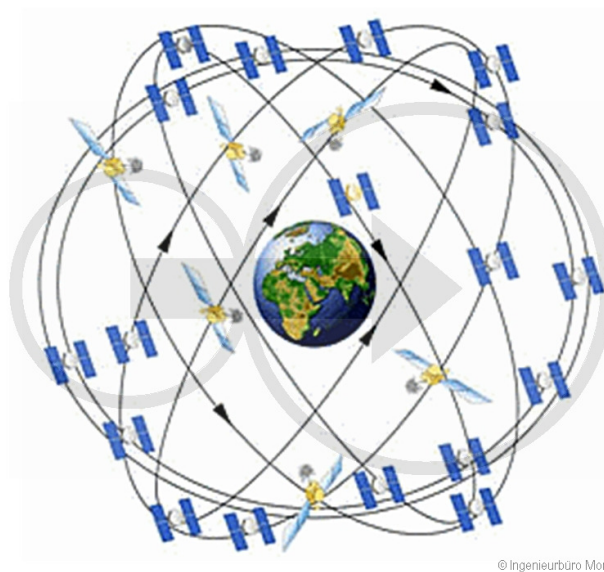


Abb. 4-3: Verteilung der Satelliten auf ihren Bahnen [PNT12]

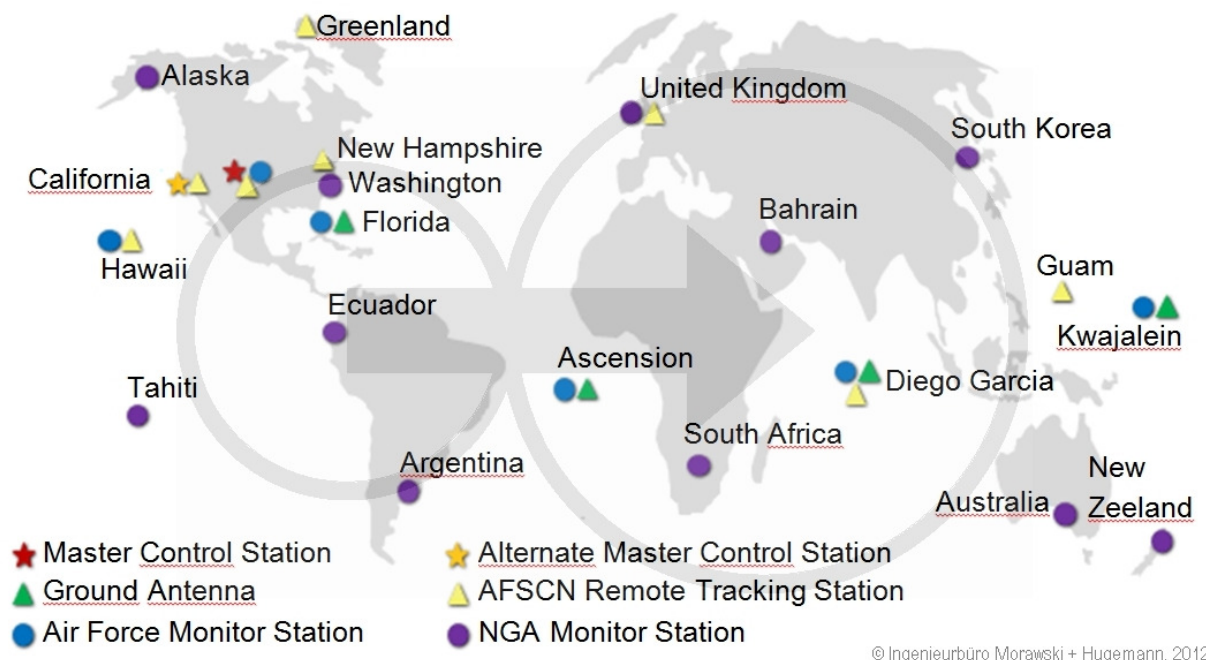
Die GPS-Satelliten führen bis zu vier Atomuhren mit sich, welche ständig mit dem Kontrollsegment synchronisiert werden. Sie senden ununterbrochen Zeitsignale und Daten auf einer Frequenz von 1.575,42 MHz für die zivile Anwendung aus. Die minimale auf der Erde zu empfangende Leistung der Signale beträgt -158 dBW bis -160 dBW [ZOG06].

Neben der zivilen Anwendung gibt es eine zweite Frequenz für militärische Zwecke, welche jedoch im Rahmen dieser Arbeit keine Rolle spielt und deshalb nicht näher erläutert werden soll.

Zur ständigen Kontrolle des Weltraumsegmentes wurden ein Hauptquartier im US Bundesstaat Colorado, ein alternatives Hauptquartier in Kalifornien, zwölf Bodenkontrollstationen und 16 Monitorstationen eingerichtet. Diese bilden zusammen das Operational Control System (OCS) [PNT12].

Die Aufgaben des Kontrollsegmentes bestehen in der Beobachtung der Satellitenbewegungen und der Berechnung der Bahndaten (Ephemeriden), der Überwachung der Satellitenuhren und der Vorhersage ihres Verhaltens, der Zeitsynchronisation der Satelliten, der Übermittlung der genauen Bahndaten der im Funkkontakt stehenden Satelliten, der Übermittlung der Bahndaten aller Satelliten (Almanach) sowie der Übermittlung weiterer Informationen wie dem technischen Zustand aller Satelliten und dem Uhrenfehler.

Die Abb. 4-4 gibt einen Überblick über das Kontrollsegmentes.



© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 4-4: Verteilung der Stationen des Kontrollsegmentes [PNT12]

Aus den Aufgaben wird deutlich, dass das Weltraumsegment und das Kontrollsegment bidirektional miteinander kommunizieren müssen [ZOG06, PNT12].

Anders als die bidirektionale Kommunikation des Weltraumsegmentes mit dem Kontrollsegment ist die Kommunikation zwischen den Satelliten und dem Benutzersegment unidirektional. Das Benutzersegment kann lediglich Daten der Satelliten empfangen, Abb. 4-2.

In das Benutzersegment fallen alle Arten von GPS-Empfängern. Sie empfangen die ununterbrochen von den Satelliten ausgestrahlten Signale.

#### 4.1.3 GPS-Nachricht

Die zivile Anwendung nutzt zwei der von den Satelliten ausgesendeten Signale. Der c/a Code zur eindeutigen Identifizierung des jeweiligen Satelliten und die Navigationsnachricht, welche präzise Informationen über den direkt im Kontakt befindlichen Satelliten sowie grobe Informationen über alle weiteren Satelliten enthält [ZOG06].

Der c/a Code (coarse/acquisition Code), Abb. 4-5, besteht aus einer scheinbar zufälligen Folge von 1023 Nullen und Einsen (Pseudo Random Noise Code, PRN) und wird mit einer Frequenz von 1.023 MHz übertragen.

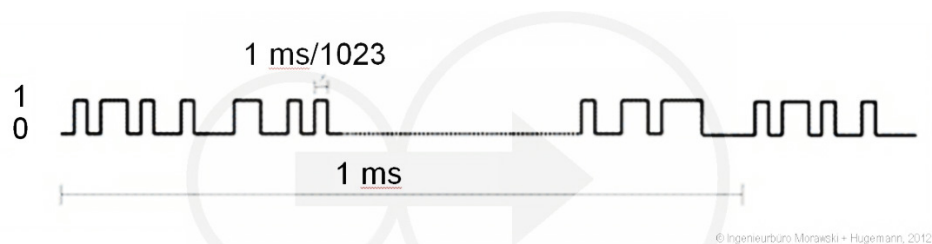


Abb. 4-5: Aufbau des c/a Codes

Das Codemuster mit einer Länge von einer Millisekunde wird ständig wiederholt und dient dem Empfänger zur eindeutigen Identifikation des Satelliten und zur Laufzeitmessung. Jeder Satellit besitzt ein eindeutiges, ihm zugeordnetes Muster.

#### 4.1.4 Die Navigationsnachricht

Jeder Satellit sendet neben dem c/a Code folgende Inhalte ständig aus:

- Systemzeit und Zeitkorrekturwerte
- präzise eigene Bahndaten (Ephemeriden)
- ungefähre Bahndaten der anderen Satelliten (Almanach)
- Systemzustand

Eine komplette Nachricht besteht aus insgesamt 37.500 Bits. Bei einer Übertragungsrate von 50 Hz ergibt sich eine Dauer von 12,5 Minuten zur Übertragung der gesamten Nachricht. Dies ist auch die Zeit, die ein GPS-Empfänger für eine Positionsbestimmung benötigt, wenn noch überhaupt keine Daten vorliegen.

Zur präzisen Navigation werden die Inhalte in Rahmen zusammengefasst, Abb. 4-6. Jeder Rahmen ist 1500 Bits lang und benötigt zur Übertragung 30 Sekunden. Die 1500 Bits sind in



fünf Unterrahmen zu je 300 Bits unterteilt, jeder Unterrahmen wiederum in zehn Worte mit jeweils 30 Bits. Zu Beginn eines jeden Unterrahmens steht das Telemetriewort (TLM) und das Übergabewort (Hand Over Word, HOW). Das Telemetriewort beinhaltet Informationen über die Aktualität der Ephemeridendaten. Das Übergabewort dient der Übergabe der Zeit [KAH06].

Der erste Unterrahmen enthält alle Zeitinformationen des Satelliten. Diese umfassen die Parameter zur Korrektur der Laufzeitverzögerung und der Satellitenzeit. Darüber hinaus umfasst der erste Unterrahmen Informationen über den technischen Zustand des Satelliten und die ungefähre Positionsgenauigkeit des Satelliten sowie die Wochennummer mit einer Länge von 10 Bit.

Die beiden folgenden Unterrahmen liefern dem Empfänger die exakten Ephemeridendaten des aussendenden Satelliten.

Unterrahmen vier enthält Informationen über die Almanach-Daten der Satelliten 25 – 32, wobei pro Unterrahmen jeweils der Almanach eines Satelliten gesendet wird. Außerdem enthält Unterrahmen vier Informationen über die Differenz zwischen GPS- und UTC-Zeit sowie über die ionosphärisch bedingten Messfehler.

Der letzte Unterrahmen versorgt den Empfänger mit den groben Bahndaten (Almanach) der Satelliten 1 – 24, wobei auch hier jeweils nur die Informationen eines Satelliten pro Unterrahmen übertragen werden können. Je 25 Rahmen erfolgt darüber hinaus ein Bericht über den technischen Zustand der Satelliten 1 – 24.

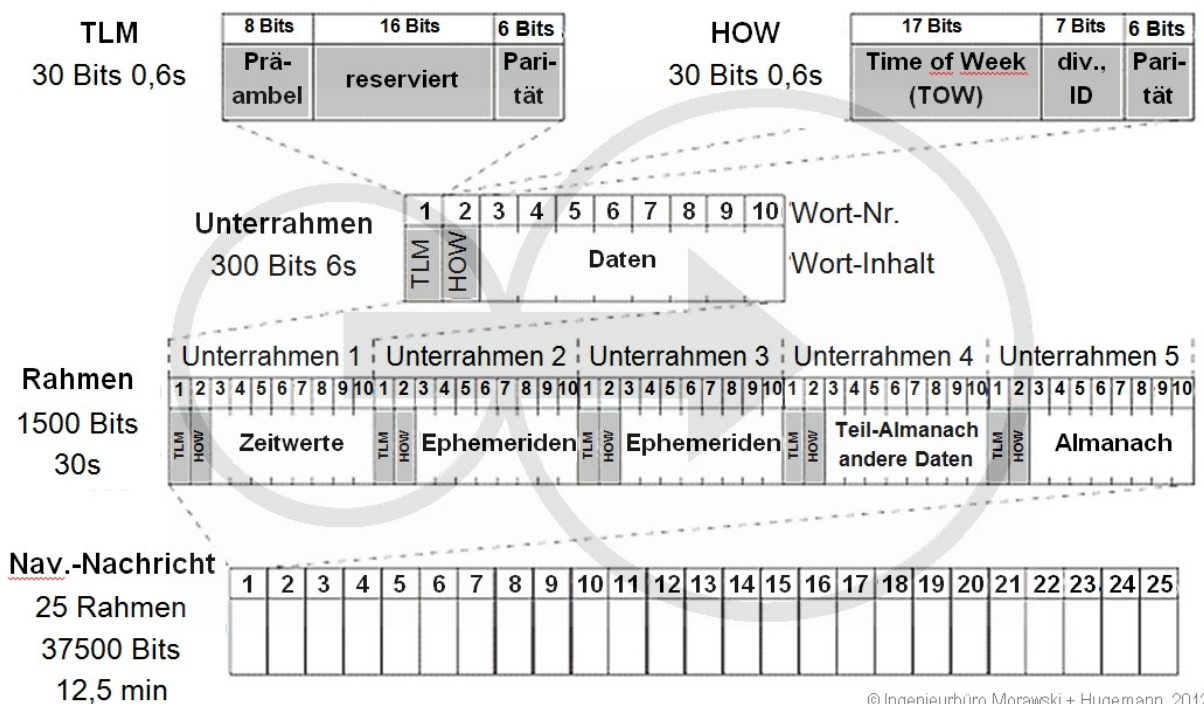


Abb. 4-6: Aufbau der Navigationsnachricht

Eine komplette Nachricht besteht aus 25 Rahmen, wobei bei allen 25 Rahmen der Inhalt der Unterrahmen eins bis drei identisch ist. Auf diese Weise ist alle 30 Sekunden eine genaue Positionsermittlung durch den GPS-Empfänger möglich, sofern die Almanach-Daten aller Satelliten bereits einmal übertragen wurden oder noch gespeichert sind.

#### 4.1.5 Positionsbestimmung auf der Erde

GPS-Systeme basieren auf Laufzeitdifferenzmessungen. Dazu werden von den Satelliten Signale ausgesendet und deren Laufzeit, also die Zeit, die zwischen dem Aussenden und dem Empfang vergeht, gemessen. Die Satelliten führen für diesen Zweck bis zu vier Atomuhren mit sich. Atomuhren sind die derzeit präzisesten erhältlichen Zeitgeber und können von der Erde aus ständig synchronisiert werden.

Die Satelliten senden ununterbrochen ihre aktuelle Position sowie ihre Bordzeit in Richtung Erde. Die ausgesendeten Signale bewegen sich mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  auf die Erde zu und werden von den GPS-Empfängern empfangen und ausgewertet. Durch den Vergleich der Ankunftszeit des Satellitensignals mit der gesendeten Bordzeit kann die Laufzeit  $T$  des Signals bestimmt werden. Die gesuchte Entfernung  $p$  (Pseudoentfernung) des Satelliten ergibt sich nach Gl. 4-1 zu:

$$p = T \cdot c$$

Gl. 4-1

Zur Veranschaulichung wird die Positionsbestimmung in der Ebene an einem Beispiel erläutert. Der Punkt A auf der Erde in Abb. 4-7 links soll in seinen ebenen Koordinaten mithilfe des GPS bestimmt werden. Hierzu empfängt ein GPS-Empfänger im Punkt A das Signal zweier Satelliten  $S_1$  und  $S_2$ , deren Laufzeit  $T_1 = 0,05$  s bzw.  $T_2 = 0,07$  s beträgt. Mit Gl. 4-1 lässt sich nun der Abstand des Punktes A zu den Satelliten  $S_1$  und  $S_2$  berechnen. Die graue Wolke im Umkreis der Erde zeigt den Nutzungsbereich des GPS-Systems, sodass der Punkt B nicht in Frage kommt [ECK10b].

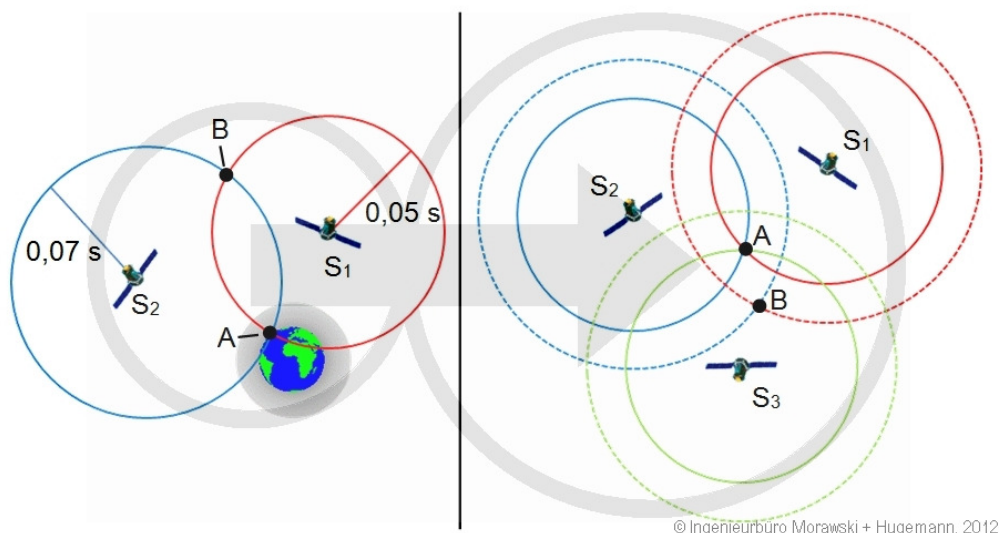


Abb. 4-7: Positionsbestimmung auf der Erde



Ein GPS-Empfänger verfügt jedoch nicht über eine hochpräzise und synchronisierte Atomuhr, wie sie in den Satelliten zum Einsatz kommt. Die rechte Hälfte der Abb. 4-7 (ohne die Umlaufbahnen des dritten, grünen Satelliten zu beachten) zeigt die Folgen eines möglichen zeitlichen Gangunterschiedes zwischen den Uhren der Satelliten  $S_1$  und  $S_2$  mit der internen Uhr des GPS-Empfängers auf. Die Größenverhältnisse zwischen den Gangunterschieden sind zur Veranschaulichung überdimensional groß dargestellt. Bei einem Gangunterschied von beispielsweise  $\Delta T = 1 \mu\text{s}$  verschiebt sich die tatsächliche Position des Punktes A nach Punkt B und verursacht einen Positionsfehler von rund 300 m. Neben den beiden Koordinaten in der Ebene kommt also die Zeit als dritte zu bestimmende Größe hinzu. Kann die Zeit aus den Satellitensignalen bestimmt werden, so wird der aus der Zeitabweichung resultierende Positionsfehler eliminiert. Notwendig hierfür ist die Auswertung des Signals eines dritten Satelliten. Betrachtet man die rechte Hälfte der Abb. 4-7 mit den Umlaufbahnen aller drei Satelliten, so stellt man fest, dass es drei Schnittpunkte aus je zwei Kreisen mit dem Uhrenfehler (gestrichelte Linien) gibt. Der GPS-Logger bemerkt den Uhrenfehler demnach sofort, da er keinen gemeinsamen Schnittpunkt ermitteln kann. Es folgt eine Uhrensynchronisation. Hierbei wird die interne Uhr des GPS-Empfängers solange modifiziert, bis sich die drei Schnittpunkte aus je zwei Kreisen in einem gemeinsamen Schnittpunkt A treffen [ECK10b].

Neben den Ebenenkoordinaten wird auf der Erde zusätzlich eine Höhenangabe für die exakte Positionsbestimmung benötigt. Das zuvor beschriebene Modell lässt sich um einen zusätzlichen vierten Satelliten erweitern, so dass eine dreidimensionale Positionsbestimmung mit Korrektur des Gangfehlers der Uhren möglich ist.

Üblicherweise sind bei der Positionsbestimmung je nach Stellung und Verfügbarkeit der Satelliten Abweichungen von  $\pm 15 \text{ m}$  in der x,y-Ebene zu erwarten [KOW09, ZOG06]. Ein Versuch zur Genauigkeit des GPS findet sich auch in Kapitel 6.1.

#### 4.1.6 Berechnung der Geschwindigkeit

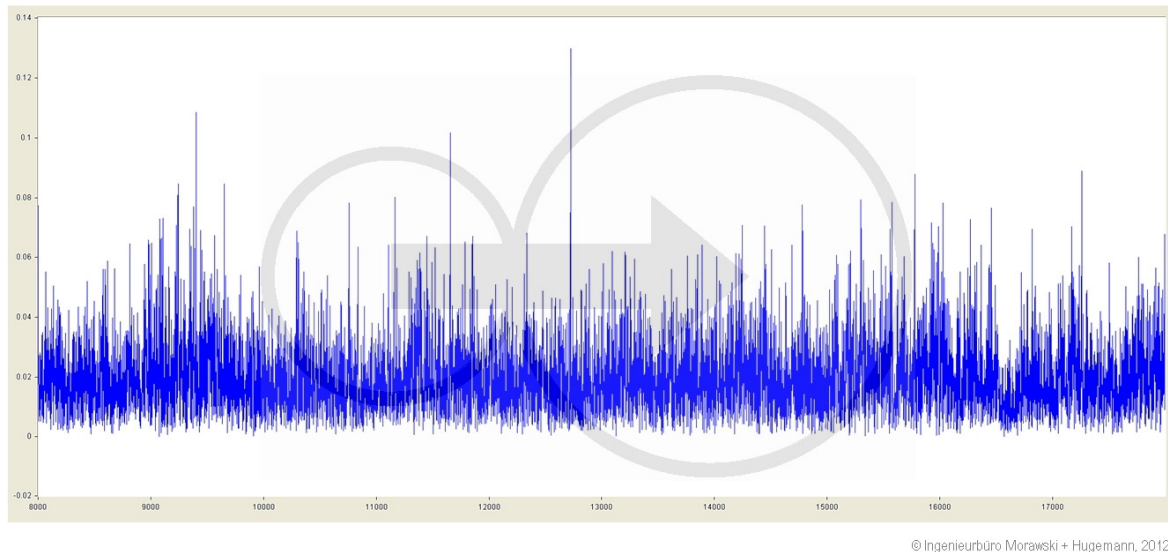
Die Berechnung der Geschwindigkeit aus dem GPS-Signal kann auf zwei Arten erfolgen. Der erste und naheliegende Weg ist die Bestimmung der Geschwindigkeit aus den Koordinaten der Datenpunkte und der Zeit. Die GPS-Koordinaten sind jedoch fehlerbehaftet.

Die zweite und tatsächlich praktizierte Möglichkeit die Geschwindigkeit zu bestimmen, ist das Ausnutzen des Dopplereffekts. Da sich die Satelliten und der GPS-Empfänger relativ zueinander in Bewegung befinden, wird die Trägerfrequenz des ausgesendeten GPS-Signals in ihrer Frequenz verschoben vom GPS-Empfänger empfangen. Mittels eines digitalen Phasenregelkreises, kurz PPL (engl.: phase-locked loop), wird die Differenz zwischen der empfangenen Frequenz und der Trägerfrequenz ermittelt. Die Differenz wird als Dopplerverschiebung bezeichnet. Diese Dopplerverschiebung ist direkt proportional zur Relativgeschwindigkeit zwischen Satellit und Empfänger. Durch den Kontakt zu mehreren Satelliten ist eine 3D-Geschwindigkeitsbestimmung direkt möglich.

Bei einem stationären GPS-Logger liegt während eines einstündigen Tests bei einer Aufzeichnungsrate von 1 Hz die Dopplergeschwindigkeit im Mittel bei  $v_D = 0,023 \text{ km/h}$ . Die aus



den Koordinaten berechnete Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt hingegen  $v_K = 0,2464$  m/s. Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsauswertung mittels Dopplereffekt ist demnach um den Faktor 8,6 größer als die Berechnung der Geschwindigkeit aus den Track-Punkten und der Zeit. Für die Untersuchung der Genauigkeit der Geschwindigkeitsermittlung mittels Dopplereffekt ist die Geschwindigkeit des Loggers über Grund irrelevant, da sie im Vergleich zur Rotationsgeschwindigkeit der Erde und der Bahngeschwindigkeit der Satelliten sehr gering ist. Die Relativgeschwindigkeit zwischen dem auf der Erde (stationären) GPS-Logger und den Satelliten ist demnach nie null [CHA07].



© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 4-8: Auswertung der Geschwindigkeit (km/h) bei einem stationären GPS-Logger

Die Vorteile der Auswertung der Dopplerfrequenz liegen vor allem in der Unempfindlichkeit der Genauigkeit gegenüber der Koordinatenbestimmung, da die Laufzeitdifferenzen, welche vor allem durch die geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit des GPS-Signals in der Ionosphäre hervorgerufen werden, bei der Auswertung des Dopplereffekts keine Rolle spielen. Die Auswertung des Dopplereffekts ist darüber hinaus mit wesentlich höherer Geschwindigkeit möglich als die Positionsbestimmung durch die Pseudoentfernung. Der Grund hierfür ist, dass der Inhalt des GPS-Signals für die Messung des Dopplereffekts nicht decodiert werden muss. Die Geschwindigkeit  $ds/dt$  kann über die Lichtgeschwindigkeit  $c$ , die empfangene Frequenz  $f_r$  und die Trägerfrequenz  $f_s$  errechnet werden [BÖD02]:

$$\frac{ds}{dt} = c \cdot \left( 1 - \frac{f_r(t)}{f_s} \right) \quad \text{Gl. 4-2}$$

#### 4.1.7 DGPS

Eine Abwandlung des rein satellitengestützten GPS ist das Differential GPS (DGPS). Hierbei wird ein mobiler GPS-Empfänger mit einer festen Empfangseinheit auf der Erde gekoppelt. Die statische Empfangseinheit ermittelt ihre Position mittels GPS und errechnet die Abwei-



chung zu ihrer bekannten tatsächlichen Position. Diese Differenz übermittelt sie an den mobilen Empfänger, der hierdurch die eigene GPS-Position korrigieren kann. Somit wird eine deutlich genauere Positionsbestimmung erzielt. Mit  $\pm 3 - 5$  m liegt die Genauigkeit der Positionsbestimmung mittels DGPS deutlich über der Genauigkeit von konventionellen GPS-Systemen [KOW09].

#### 4.1.8 GPS Datenformat NMEA-0813

Bei dem Datenformat der National Marine Electronics Association, kurz NMEA, handelt es sich um ein weitgehend standardisiertes Datenformat der Nationalen Vereinigung für Marineelektronik. Dieses Dateiformat wurde ursprünglich für die Kommunikation zwischen Navigationsgeräten auf Schiffen entwickelt und auch heute noch dafür verwendet. Außerdem können Computer und GPS-Empfänger über dieses Dateiformat kommunizieren.

Die verwendeten GPS-Logger können die Datensätze GPGLA, GPGSA, GPGSV und GPRMC schreiben. Im Folgenden sollen lediglich die für diese Arbeit relevanten Datensätze GPGLA und GPRMC erläutert werden.

Alle Datensätze benutzen die gleiche Formatierung. Ein Satz beginnt mit einem \$-Zeichen, es folgt eine zwei Zeichen lange Kennung des Senders und eine drei Zeichen lange Kennung des Satzes. Im Falle des Datensatzes GPGLA ist dies zum Beispiel GP als Kennung für den Sender und GLA als Kennung des Satzes. Beendet wird jeder Satz mit einer Prüfsumme. Die einzelnen Daten eines Datensatzes sind durch Kommas voneinander getrennt. Sind Daten in einem Datensatz nicht verfügbar, so werden diese weggelassen. Das Komma wird jedoch immer mitgeschrieben. Ein Empfänger kann auf diese Weise durch Zählen der Kommas immer die richtigen Daten zuordnen. Ein Satz ist inklusive aller Zeichen bis zu 82 Zeichen lang [KOW09].

Der GPGLA Datensatz ist für die Anwendung in dieser Arbeit der wichtigste Datensatz. Er enthält die genauen Informationen über die aktuelle Position und die GPS-Uhrzeit.

Der Breiten- und Längengrad im NMEA-Datensatz muss nach dem folgenden Schema umgewandelt werden, um die Position in der Einheit Grad, Minuten und Sekunden zu erhalten.

$$GGMM.SSSS \Rightarrow GG^{\circ}MM'(0.SSSS \cdot 60)'' \quad \text{Gl. 4-3}$$

Die Angabe der Uhrzeit erfolgt in dem Format *HHMMSS.SS*.

Der Datensatz sieht wie folgt aus:

\$GPGLA,100446.40,5102.01089,N,00702.42643,E,1,09,1.0,55.4,M,47.2,M,,\*66



In der Abb. 4-9 sind die einzelnen Bestandteile näher erläutert.

|               |                                                             |
|---------------|-------------------------------------------------------------|
| \$            | Beginn eines neuen Datensatzes                              |
| GPGGA         | Datensatztyp (Sender- und Satzkennung)                      |
| 100446.40     | Uhrzeit                                                     |
| 5102.01089,N  | Breitengrad                                                 |
| 00702.42643,E | Längengrad                                                  |
| 1             | Qualität der Messung<br>0 = ungültig<br>1 = GPS<br>2 = DGPS |
| 09            | Anzahl der in Kontakt stehenden Satelliten                  |
| 1.0           | HDOP (Genauigkeit)                                          |
| 55.4,M        | Höhe über Meer (über Geoid)                                 |
| 47.2,M        | Höhe Geoid minus Höhe Ellipsoid (WGS84)                     |
| *66           | Prüfsumme                                                   |

Abb. 4-9: Erläuterung des Datensatzes GPGGA [KOW09]

Der zweite verwendete Datensatz ist der GPRMC-Datensatz. Aus ihm wird die GPS-Geschwindigkeit abgelesen.

Der komplette Datensatz sieht wie folgt aus:

\$GPRMC,115141.10,A,5100.5169,N,00719.9407,E,68.157167,203.581458,170612,,\*03

In der Abb. 4-10 sind die einzelnen Bestandteile näher erläutert.

|              |                                        |
|--------------|----------------------------------------|
| \$           | Beginn eines neuen Datensatzes         |
| GPRMC        | Datensatztyp (Sender- und Satzkennung) |
| 115141.10    | Uhrzeit                                |
| A            | Status<br>A = Active<br>V = Void       |
| 5100.5169,N  | Längengrad                             |
| 00719.9407,E | Breitengrad                            |
| 68.157167    | Geschwindigkeit in Knoten              |
| 203.581458   | Bewegungsrichtung in Grad              |
| 170612       | Datum                                  |
| *03          | Prüfsumme                              |

Abb. 4-10: Erläuterung des Datensatzes GPRMC [KOW09]

Der Längen- und Breitengrad ist wie in dem zuvor erläuterten Format des Datensatzes GPGGA angegeben.

Die Angabe der Geschwindigkeit in der Einheit Knoten resultiert aus der ursprünglichen Verwendung des NMEA-Formates in der Seefahrt. Die Geschwindigkeit lässt sich nach Gl. 4-4 in die Einheit m/s umrechnen.

$$v_{\text{Str}} = v_{\text{See}} \cdot 0,5144 \quad \text{Gl. 4-4}$$

## 4.2 Helmkamera GoPro Hero

Die Fahrversuche in dieser Arbeit finden im öffentlichen Straßenverkehr statt. Aussagekräftige Ergebnisse können nur bei den Kurvenfahrten entstehen, bei denen der Proband freie Fahrt in der Kurve hat. Durch die Auswertung der Videoaufzeichnung ist es möglich, die Kurven, in denen die freie Fahrt des Probanden durch langsameren Straßenverkehr behindert wird, von der Ergebnisauswertung auszuschließen.

Die Action-Kamera GoPro Hero eignet sich durch ihr umfangreiches Zubehör unter anderem als Helmkamera im Motorsport. Mittels eines elastischen Helmbandes kann jeder Fahrer die Kamera während der Versuche unkompliziert und sicher auf seinem Helm tragen.

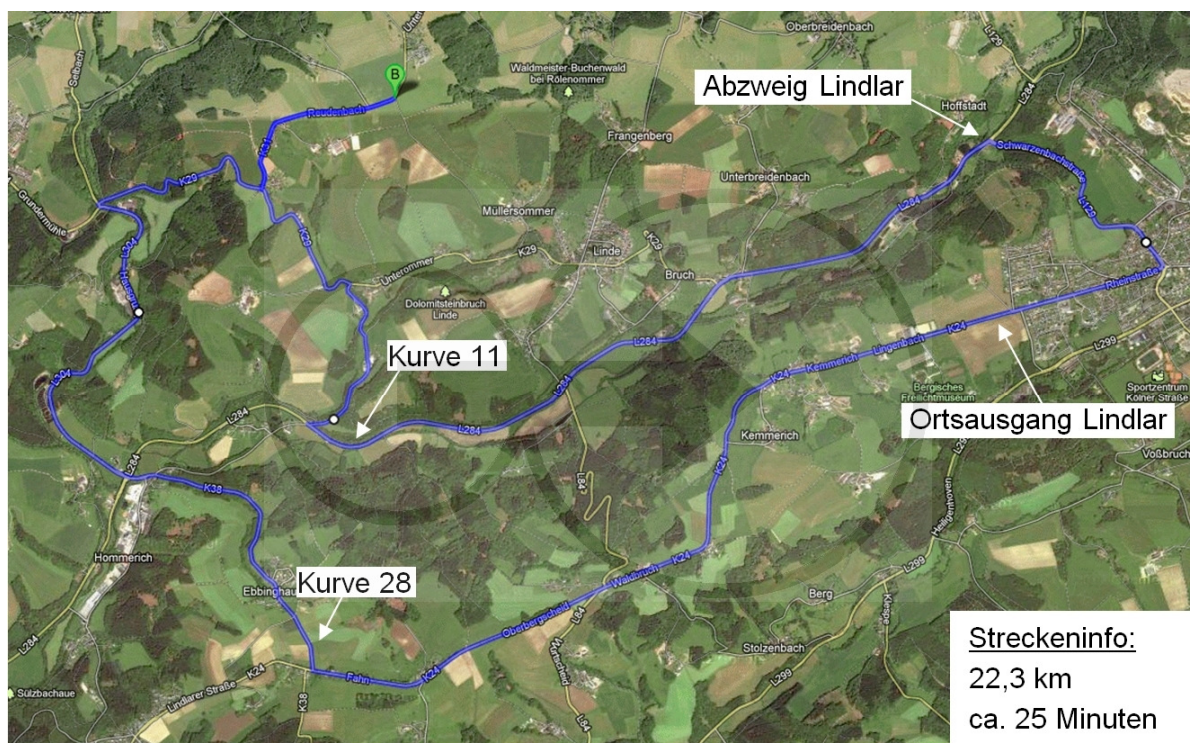


## 5 Fahrversuche

Die Versuchsfahrten aller Probanden werden auf einer gezielt ausgewählten Versuchsstrecke im Bergischen Land nahe Lindlar unter Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt.

### 5.1 Versuchsstrecke

Bei der Planung der Strecke, Abb. 5-1, gilt es vor allem, die gleichmäßige Verteilung der relevanten Kurvenradien zu berücksichtigen. Darüber hinaus sollen die Kurvenradien in den Luftbildern gut auszuwerten sein. Aus diesem Grund werden lediglich die gut sichtbaren, nicht durch dichten Baumbestand entlang der Straße verdeckten Kurven in der Auswertung berücksichtigt.



© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 5-1: Übersicht der Versuchsstrecke

Die Strecke hat insgesamt eine Länge von 22,3 km. Zu Beginn durchfahren die Probanden eine eher schmale, nicht durch Leitlinien markierte Passage. Hier sind bis auf eine Ausnahme Bahnradien im Bereich bis 100 m zu erwarten. Ab Kurve 11 beginnt der erste schnelle Abschnitt der Versuchsstrecke. Die Fahrspuren für beide Verkehrsrichtungen sind hier durch Leitlinien getrennt. Eine durch Beschilderung angeordnete Geschwindigkeitsbegrenzung gibt es nicht. Die Kurvenradien in Abschnitt zwei liegen im Bereich 100 – 300 m. Nach Kurve 18 geht es rechts ab in Richtung Lindlar. Es folgen erneut engere, jedoch mit separaten Fahrspuren versehene Kurven im Bereich 40 – 120 m. Am Ortsausgang Lindlar wird die Strecke sehr übersichtlich und hell. Dieser Bereich gilt aufgrund der separaten Fahrspuren und der





überwiegend großen Kurvenradien im Bereich 70 – 300 m als der zweite schnelle Abschnitt der Versuchsstrecke. Ab Kurve 28 fehlt die Mittellinie erneut und die Kurven werden wieder enger. Hier nimmt die Asphaltqualität zum Teil deutlich ab. In diesem letzten Abschnitt betragen die Kurvenradien 10 – 80 m. Bei der Auswertung werden insgesamt 39 Kurven mit Radien von 10 – 300 m berücksichtigt. Alle Kurven wurden auf Querneigung untersucht. Hier konnten jedoch keine nennenswerten Neigungen der Straße festgestellt werden.

Um ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, ist es den Fahrern nicht gestattet, die Strecke vor der eigentlichen Versuchsfahrt abzufahren. So sollen Lerneffekte ausgeschlossen werden.

## 5.2 Probanden

Die Auswahl der Probanden erfolgt zufällig über das Internet. Insgesamt stehen für diese Arbeit 29 Fahrer zur Verfügung. Jeder Proband ist die Versuchsstrecke mit dem eigenen, ihm vertrauten Motorrad gefahren, Abb. 5-3.

|          | Risikobereitschaft | Fahrpraxis in Jahren | Alter | Motorrad                |
|----------|--------------------|----------------------|-------|-------------------------|
| Fahrer01 | mittel             | 7                    | 55    | Honda CBX 650           |
| Fahrer02 | mittel             | 0,75                 | 57    | Triumph Street Triple   |
| Fahrer03 | niedrig            | 5                    | 42    | Honda CBF 1000          |
| Fahrer04 | hoch               | 3                    | 39    | Triumph Daytona         |
| Fahrer05 | hoch               | 2                    | 41    | Triumph Street Triple R |
| Fahrer06 | hoch               | 9                    | 55    | Honda Varadero XL 1000  |
| Fahrer07 | mittel             | 5                    | 21    | Honda CBR 600 F         |
| Fahrer08 | mittel             | 30                   | 47    | Honda CB 1000           |
| Fahrer09 | hoch               | 37                   | 53    | Triumph Street Triple R |
| Fahrer10 | niedrig            | 10                   | 48    | Triumph Street Triple R |
| Fahrer11 | mittel             | 29                   | 49    | BMW R 1150 GS           |
| Fahrer12 | mittel             | 7                    | 30    | Honda Hornet 900        |
| Fahrer13 | mittel             | 5                    | 22    | Yamaha FZR 600 R        |
| Fahrer14 | mittel             | 7                    | 24    | Buell XB9SX 1000        |
| Fahrer15 | mittel             | 20                   | 41    | Triumph Speed Triple    |
| Fahrer16 | mittel             | 20                   | 39    | Kawasaki ZZR 600        |
| Fahrer17 | mittel             | 25                   | 45    | Triumph Street Triple   |
| Fahrer18 | mittel             | 6                    | 36    | Honda CBR 1000 RR       |
| Fahrer19 | hoch               | 1                    | 24    | Triumph Street Triple   |
| Fahrer20 | hoch               | 8                    | 47    | Yamaha FZR 1000         |
| Fahrer21 | hoch               | 37                   | 55    | Ducati Multistrada S    |
| Fahrer22 | mittel             | 5                    | 30    | Kawasaki ZXR 750        |
| Fahrer23 | niedrig            | 5                    | 52    | Honda CB 750 F          |
| Fahrer24 | mittel             | 15                   | 43    | Honda CBF 1000          |

Abb. 5-2: Probanden (Teil 1)

|          | Risikobereitschaft | Fahrpraxis in Jahren | Alter | Motorrad          |
|----------|--------------------|----------------------|-------|-------------------|
| Fahrer25 | hoch               | 6                    | 24    | Kawasaki ZX6R     |
| Fahrer26 | hoch               | 8                    | 26    | Husqvarna SMR 510 |
| Fahrer27 | mittel             | 15                   | 44    | Suzuki DR 650 SE  |
| Fahrer28 | hoch               | 34                   | 51    | Honda CBR 1000    |
| Fahrer29 | mittel             | 29                   | 47    | BMW R 1100 GS     |

Abb. 5-3: Probanden (Teil 2)

Unter den Probanden befinden sich sowohl männliche als auch weibliche Fahrer. Das Alter der Fahrer liegt zwischen 21 und 57 Jahren. Ihre Fahrerfahrung beträgt zwischen 0,75 und 37 Jahren. Abb. 5-4 und Abb. 5-5 geben jeweils eine in aufsteigender Reihenfolge sortierte Übersicht über die Verteilung dieser beiden Größen.

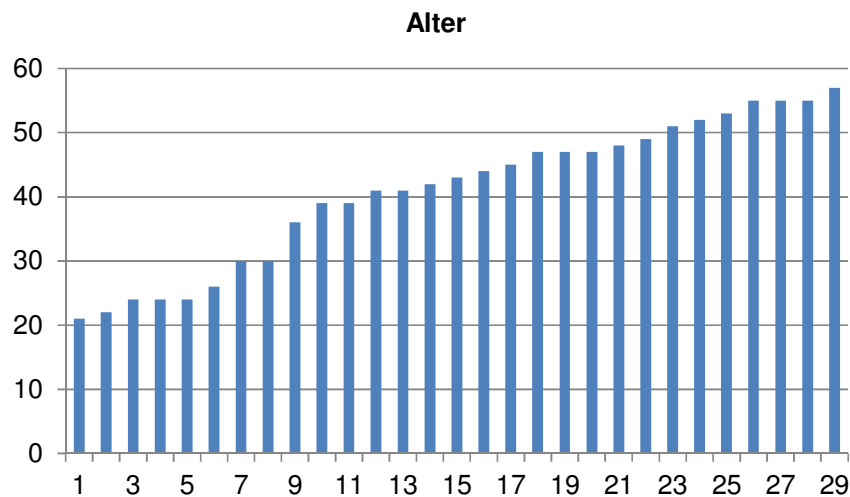


Abb. 5-4: Alter der Probanden in aufsteigender Sortierung

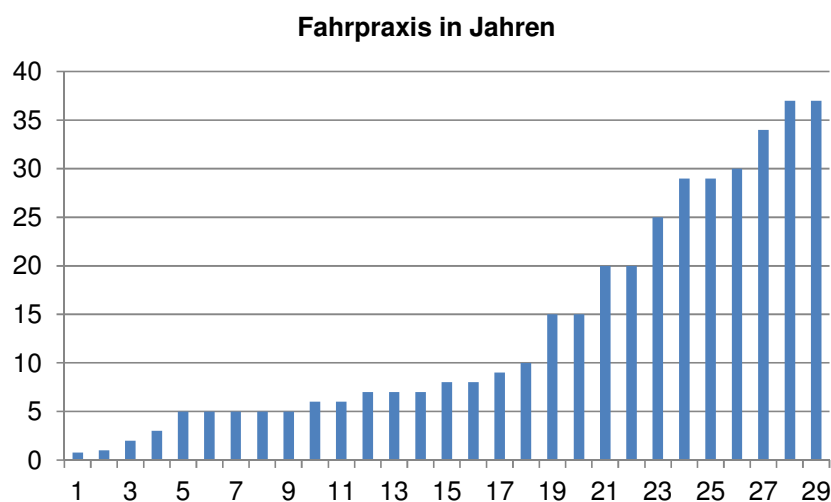


Abb. 5-5: Fahrpraxis der Probanden in aufsteigender Sortierung



### 5.3 Durchführung der Fahrversuche

Vor dem eigentlichen Fahrversuch gilt es, alle relevanten Daten des Probanden und seines Motorrads aufzunehmen. Zu diesem Zweck wird der folgende Erfassungsbogen verwendet, Abb. 5-6.

Fahrer: \_\_\_\_\_

Geburtsjahr: \_\_\_\_\_

Motorrad-FS seit: \_\_\_\_\_

Fahrpraxis aktuell: \_\_\_\_\_

Fahrpraxis diese Saison: \_\_\_\_\_

Einschätzung des Fahrverhaltens (Risikobereitschaft)

| zurück-<br>haltend       |                          | forsch                   |                          |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Maschine: \_\_\_\_\_

Baujahr: \_\_\_\_\_

Gewicht lt. Papieren: \_\_\_\_\_

Bereifung vorne: \_\_\_\_\_

Bereifung hinten: \_\_\_\_\_

Radstand: \_\_\_\_\_

ebenes Wiegen:

vorne: \_\_\_\_\_

hinten: \_\_\_\_\_

schräges Wiegen

vorne: \_\_\_\_\_

Stufenhöhe: \_\_\_\_\_

© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 5-6: Erfassungsbogen Fahrer

Mithilfe dieses Erfassungsbogens können vor Fahrtantritt alle für die Auswertung relevanten Daten notiert werden. Hierzu zählen das Geburtsjahr des Fahrers, das Jahr des Führer-

scheinerwerbs sowie die Fahrpraxis eines jeden Einzelnen. Außerdem für die Statistik von Bedeutung sind der Maschinentyp und das Alter der Maschine.

Die technischen Daten wie die Bereifung, der Radstand und die Gewichtsverteilung sind nötige Kenngrößen für die Auswertung. Aus diesen Daten lässt sich der Einfluss der Reifenbreite auf die Schräglage berechnen.

Anschließend werden die Maschinen samt Fahrer gewogen.

### 5.3.1 Ebenes Wiegen

Die im späteren Verlauf in Kapitel 6.3.2 berechnete Schräglage setzt sich, wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, aus zwei Teilen zusammen. Der erste Teil, welcher aus dem linearen Einspurmodell resultiert, ist unabhängig vom verwendeten Fahrzeug. Das Fahrzeug wird auf einen Massepunkt reduziert, sodass geometrische Daten keinen Einfluss haben. Die Fahrzeugmasse kürzt sich bei der Betrachtung des Gleichgewichtszustandes heraus. Der zweite Teil der Schräglage, der Einfluss der Reifenbreite, berücksichtigt die fahrzeugspezifischen Daten Schwerpunktlage und Radius des Reifenquerschnitts.

Um die Schwerpunktlage zu ermitteln, wird das Motorrad samt Fahrer in der Ebene und mit einem Höhenunterschied zwischen vorderem und hinterem Radaufstandspunkt gewogen. Zusätzlich werden für die Berechnung der Schwerpunktlage die Daten aus dem Erfassungsbogen, Abb. 5-6, benötigt.

Die horizontale Lage des Schwerpunktes  $l_v$  lässt sich über die Kräftebilanz im vorderen Radaufstandspunkt bestimmen, Abb. 5-7:

$$l_v = l \cdot \frac{F_{h,h}}{F_g} \quad \text{Gl. 5-1}$$

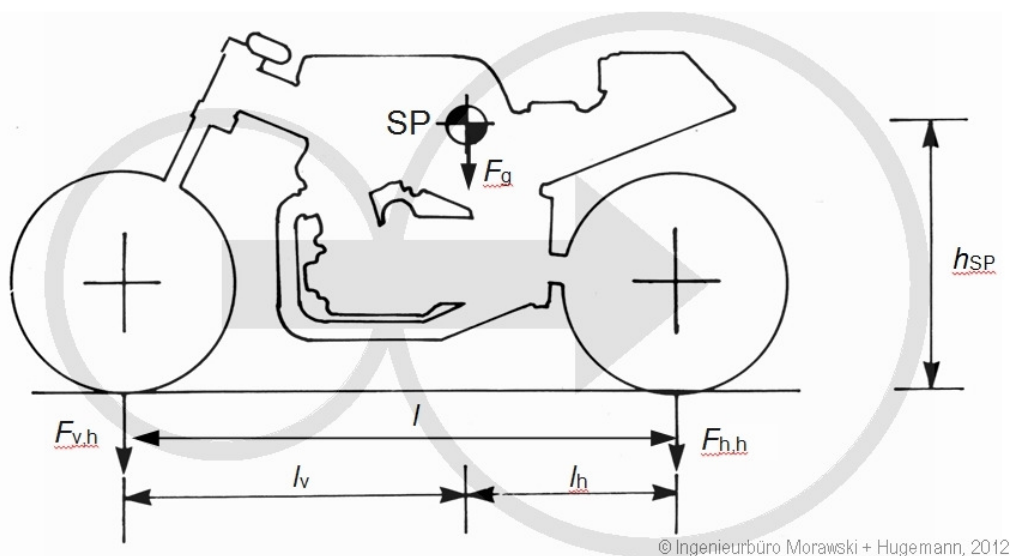


Abb. 5-7: Geometrische Zusammenhänge beim horizontalen Wiegen [ROB92]

Der Versuchsaufbau zum ebenen Wiegen der Motorräder besteht aus einer Rampe für die Auffahrt auf ein 1 m langes Kantholz mit der Querschnittsfläche 15 x 15 cm, der Plattformwaage der Firma ALLPAX mit der Grundfläche 60 x 80 cm, einer Höhe von 15 cm und einer maximalen Belastbarkeit von 300 kg bei einer Ablesbarkeit von 0,1 kg. Anschließend folgt ein weiteres Kantholz und erneut eine Rampe für die Abfahrt.

Abb. 5-8 zeigt den Aufbau für das Wiegen in der Ebene. Das linke Bild zeigt dabei den Wiegevorgang am Vorderrad, das rechte Bild denjenigen am Hinterrad. Der Fahrer stellt während des Wiegens beide Füße auf die Fußrasten. So wird sichergestellt, dass die exakte Achslastverteilung gemessen wird. Eine Hilfsperson stabilisiert dabei die Einheit Fahrer und Maschine in axialer Richtung auf der der Waage abgewandten Seite.

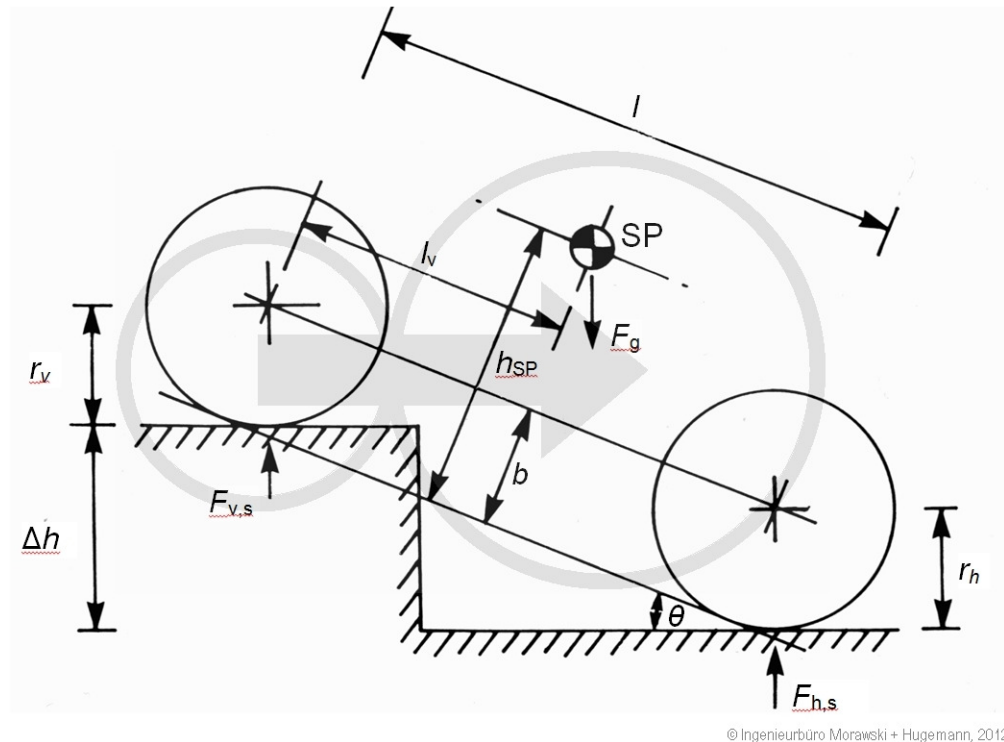


Abb. 5-8: Versuchsaufbau ebenes Wiegen

Mittels des ebenen Wiegens und somit der Achslastverteilung lässt sich bei der Auswertung der Daten der Schwerpunkt in horizontaler Richtung bestimmen.

### 5.3.2 Schräges Wiegen

Eine Möglichkeit zur Berechnung der Schwerpunkthöhe der Einheit Fahrer und Maschine ist das Wiegen bei angehobenem Vorderrad. Aus diesem Grund wird der in Abb. 5-8 dargestellte Versuchsaufbau modifiziert. Die geometrischen Beziehungen für das schräge Wiegen sind in Abb. 5-9 dargestellt.



© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 5-9: Geometrische Zusammenhänge beim schrägen Wiegen [ROB92]

Aus den abgebildeten geometrischen Zusammenhängen lassen sich die Höhe des Schwerpunktes  $h_{SP}$  und die Winkelfunktion  $\theta$  berechnen:

$$h_{SP} = \frac{F_{h,s} \cdot \Delta h}{F_g \cdot \tan(\theta) \cdot \sin(\theta)} - \frac{l_v}{\tan(\theta)} + \frac{l_v}{l} \cdot (r_h - r_v) + r_v \quad \text{Gl. 5-2}$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta h}{l}\right) \quad \text{Gl. 5-3}$$

Die erste Rampe wird mit der Stufenseite nach oben vor die Waage gelegt, die zweite Rampe analog dazu auf die Waage. Die beiden Kanthölzer werden für das schräge Wiegen nicht benötigt. Unter Verwendung der beiden Rampen wird so ein Höhenunterschied der Motorräder je nach Achsabstand von  $l = 0,215 \text{ m}$  bzw.  $0,235 \text{ m}$  geschaffen, Abb. 5-10.





Abb. 5-10: Versuchsaufbau schräges Wiegen

Das schräge Wiegen wird nur für das Vorderrad durchgeführt. Die Fahrer setzen erneut beide Füße auf den Fußrasten auf. Eine Hilfsperson sichert die Maschine am Hinterrad in axialer Richtung gegen Umkippen. Beim schrägen Wiegen ist darauf zu achten, dass der Reifenlatsch beider Räder mit seiner vollen Fläche auf einer der beiden Stufen steht. Nur so ist es möglich, einen exakten Höhenunterschied zwischen den beiden Radaufstandspunkten zu bestimmen.

Nach dem Wiegen der Motorräder werden die Fahrer mit der in Kapitel 4 beschriebenen Messtechnik ausgestattet und die Versuchsfahrt durchgeführt. Abb. 5-11 zeigt den Screenshot eines der Helmvideos von der Strecke.



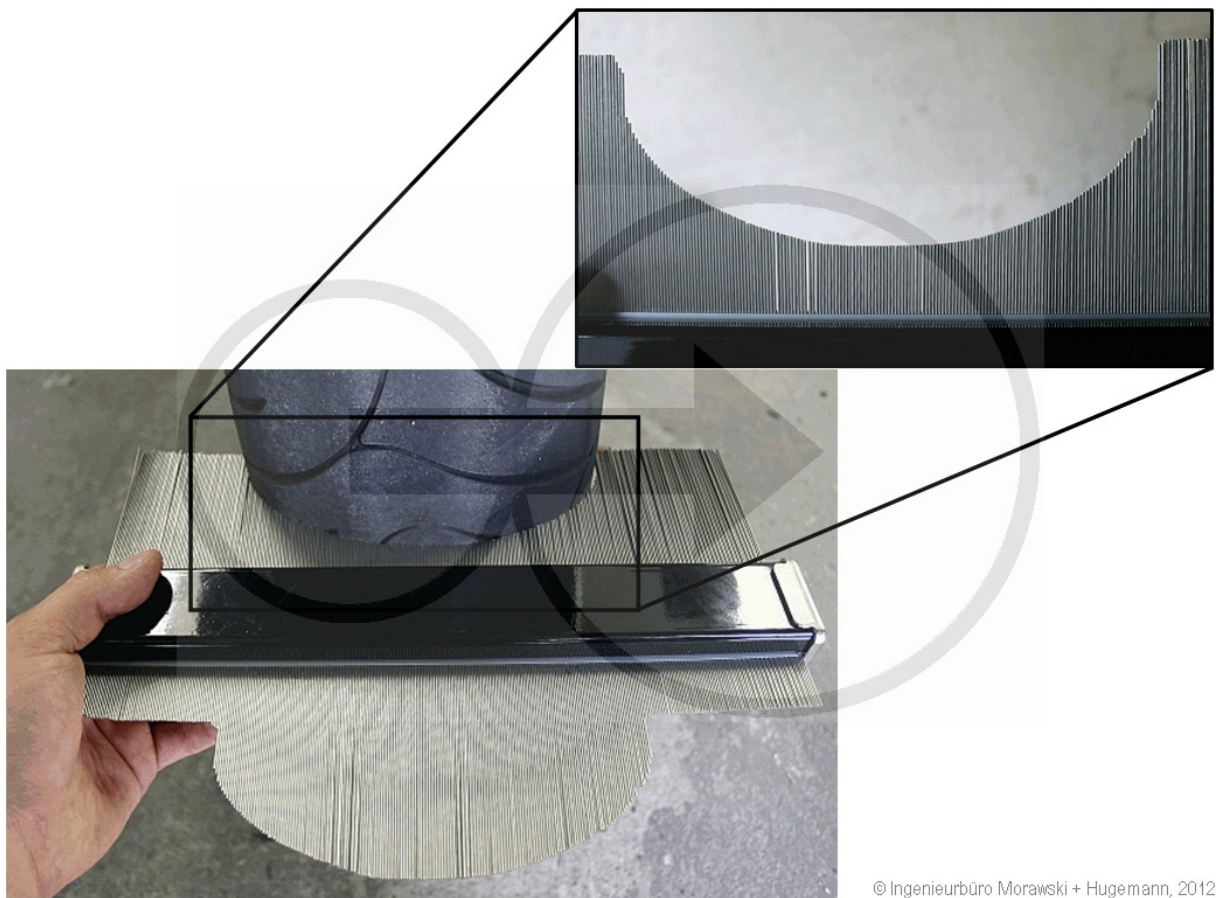
Abb. 5-11: Markierung der Strecke mit Straßensprühkreide

Einige Fahrer verfügen über ein Navigationsgerät am Motorrad. Ihnen kann die Versuchsstrecke als Datei überspielt werden. Für alle anderen Fahrer sind sämtliche Abbiegevorgänge mit orangenen bzw. roten Pfeilen auf der Straße angekündigt, Abb. 5-11. In dem Screenshot ist ein angekündigter Rechtsabbiegevorgang zu sehen, der durch Straßensprühkreide auf der Fahrbahn markiert ist.

### 5.3.3 Bestimmung des Radius des Reifenquerschnitts

Die letzte notwendige geometrische Größe für die Berechnung der Schräglage ist der Radius des Reifenquerschnitts.

Mithilfe einer Konturschablone wird der Querschnittsradius des Hinterrades bei jedem Fahrzeug abgenommen, Abb. 5-12. Anschließend wird die nachgezeichnete Kontur des Reifens eingescannt. Mit einem CAD-Programm kann die maßstabsgetreu skalierte Silhouette nachgezeichnet und ausgemessen werden.



© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 5-12: Bestimmung des Abrollradius des Reifenquerschnitts

Der mithilfe des CAD-Programms nachgezeichnete Abrollradius des Reifenquerschnitts wird so approximiert, dass der Kreisbogen primär bei mittleren und großen Schräglagen auf der Kontur der Schablone liegt, Abb. 5-13. In Abb. 5-12 und Abb. 5-13 ist die mittige Abnutzung des Reifens durch Geradeausfahrt zu erkennen.

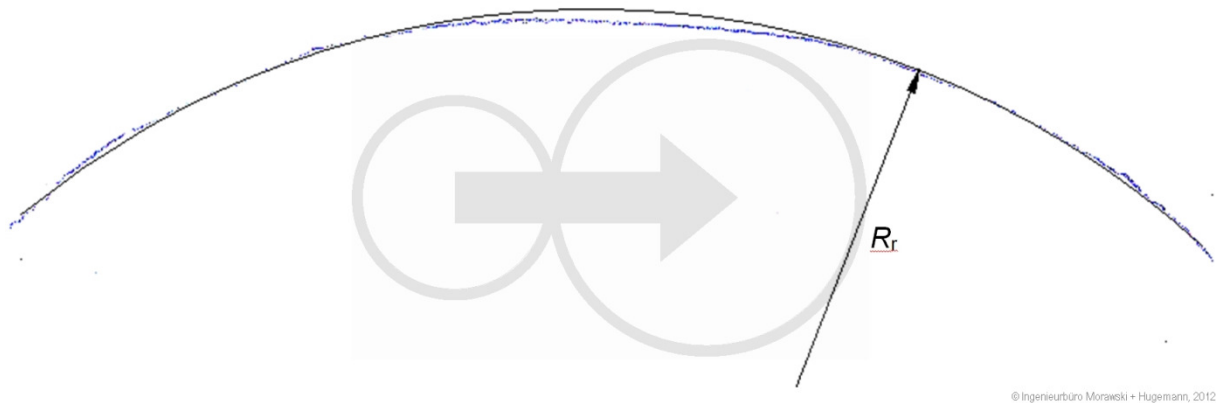


Abb. 5-13: Approximation des Reifenquerschnitts

#### 5.4 Fehlerbetrachtung

In die Berechnung der Schwerpunkthöhe, Gl. 5-2, fließen mehrere gemessene und berechnete Variablen ein. So resultieren das Gesamtgewicht und die Vorderradachslast aus den beiden Wiegevorgängen. Die horizontale Lage des Schwerpunktes stellt eine berechnete Größe aus der Gewichtsverteilung dar. Die aus den Reifendimensionen berechneten Radien der beiden Reifen wie auch der vom Hersteller angegebene Radstand wurden durch das Belasten des Motorrades mit der Gewichtskraft des Fahrers verändert. Aus diesem Grund wird im Folgenden eine Fehlerbetrachtung durchgeführt, bei der die Auswirkung eines Fehlers der genannten Größen auf die Schräglage betrachtet wird.

Für die Fehlerbetrachtung zur errechneten Schwerpunkthöhe wird Gl. 5-2 unter Verwendung der Beziehungen zwischen den Winkelfunktionen umgeformt und auf die Eingangsgrößen Reifenradien, Achsabstand und Achslastverteilung bei beiden Wiegeprozessen reduziert:

$$h_{SP} = \frac{l^2 \cdot (F_{h,s} - F_{h,h})}{\Delta h \cdot (F_{v,h} + F_{h,h})} \cdot \sqrt{1 - \frac{\Delta h^2}{l^2}} + \frac{F_{h,h}}{F_{v,h} + F_{h,h}} \cdot (r_h - r_v) + r_v \quad \text{Gl. 5-4}$$

Anschließend wird der Maximalfehler mittels der Summen der partiellen Ableitungen gebildet:

$$\Delta h_{SP} = \pm \sum_i \left| \frac{\partial h_{SP}}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right| \quad \text{Gl. 5-5}$$

Die Variable  $x_i$  beschreibt in diesem Zusammenhang alle potentiell mit Fehlern behaftete Eingangsgrößen der Gl. 5-2. Der Fehler einer jeden Variablen kann mit der Variablen  $\Delta x_i$

individuell abgeschätzt werden. Die Berechnungsgleichung des Maximalfehlers ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} \Delta h_{SP} = & \left| -\frac{l^2}{\Delta h \cdot (F_{v,h} + F_{h,h})} \cdot \sqrt{1 - \frac{\Delta h^2}{l^2}} - \frac{l^2 \cdot (F_{h,s} - F_{h,h})}{\Delta h \cdot (F_{v,h} + F_{h,h})^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{\Delta h^2}{l^2}} + \frac{r_h - r_v}{F_{v,h} + F_{h,h}} - \frac{F_{h,h} \cdot (r_h - r_v)}{(F_{v,h} + F_{h,h})^2} \right| \cdot \Delta F_{h,h} \\ & + \left| -\frac{l^2 \cdot (F_{h,s} - F_{h,h})}{\Delta h \cdot (F_{v,h} + F_{h,h})^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{\Delta h^2}{l^2}} - \frac{F_{h,h} \cdot (r_h - r_v)}{(F_{v,h} + F_{h,h})^2} \right| \cdot \Delta F_{v,h} \\ & + \left| \frac{l^2}{\Delta h \cdot (F_{v,h} + F_{h,h})} \cdot \sqrt{1 - \frac{\Delta h^2}{l^2}} \right| \cdot \Delta F_{h,s} + \left| \frac{F_{h,h}}{F_{v,h} + F_{h,h}} \right| \cdot \Delta r_h + \left| -\frac{F_{h,h}}{F_{v,h} + F_{h,h}} + 1 \right| \cdot \Delta r_v \\ & + \left| \frac{2 \cdot l \cdot (F_{h,s} - F_{h,h})}{\Delta h \cdot (F_{v,h} + F_{h,h})} \cdot \sqrt{1 - \frac{\Delta h^2}{l^2}} + \frac{\Delta h \cdot (F_{h,s} - F_{h,h})}{l \cdot (F_{v,h} + F_{h,h})} \cdot \sqrt{\frac{l^2}{l^2 - \Delta h^2}} \right| \cdot \Delta l \end{aligned} \quad \text{Gl. 5-6}$$

Neben der Schwerpunkthöhe ist der Radius des Reifenquerschnitts durch das manuelle Ausmessen ebenfalls mit einer Messunsicherheit behaftet. Beide Größen haben nach Gl. 3-4 einen direkten Einfluss auf die Berechnung des Schräglagenwinkels  $\lambda'$ . Die Abb. 5-14 gibt einen Überblick über die berechneten Größen und ihren Einfluss auf die Schräglage.

Für die Fehlerauswertung wurde eine Kurve mit mittlerem Bahnradius  $R = 100$  m und einer mittleren Geschwindigkeit  $v = 21$  m/s angenommen, sodass sich aus dem linearen Einspurmodell eine Schräglage von  $\lambda_e = 24,21^\circ$  ergibt, Abb. 5-14 oben.

Zu der Schräglage  $\lambda_e$  addiert sich nach Gl. 3-5 noch der aus der Reifenbreite resultierende Schräglagenanteil  $\lambda'$  (Gl. 3-4). Neben der für alle Fahrer konstanten Größe  $\lambda_e$  berechnet sich  $\lambda'$  aus der Schwerpunkthöhe und dem Radius der Reifenquerschnitts. Vor allem der maximale absolute Fehler bei der Berechnung der Schwerpunkthöhe soll im Folgenden näher untersucht werden.

Der zweite Tabellenteil in Abb. 5-14 zeigt alle sieben potentiell mit Fehlern behaftete Einflussgrößen bei der Berechnung der Schwerpunkthöhe, außerdem den relativen und den absoluten Fehler dieser Größen, wobei der absolute Fehler über alle 29 Fahrer gemittelt wird. Lediglich die Stufenhöhe  $\Delta h$  ist genau bekannt und bei ihr kein Fehler zu erwarten. Für die drei gemessenen Größen  $F_{h,h}$ ,  $F_{v,h}$  und  $F_{h,s}$  scheint aus den Erfahrungen beim Wiegeprozess ein Fehler von maximal  $\pm 0,85$  kg sinnvoll. Da die ausschlaggebende Größe bei der Berechnung der relative Fehler ist, wird dieser zu 0,5 % gesetzt. Der relative Fehler bei der Berechnung der Reifenradien wird zu 3,5 % gesetzt, die Veränderung des Achsabstandes  $l$  durch das Einfedern bei der Belastung der Maschine mit dem Gewicht des Fahrers wird im Mittel mit 1,5 cm abgeschätzt. Dies ergibt die Untersuchung des Motorrades von Fahrer 16. Der Fehler bei der Bestimmung des Reifenquerschnittsradius ist im Mittel mit 5 % angenom-



men. Zu diesem Ergebnis kommt man nach der Auswertung der Radien aller 29 Fahrer. Bei der Approximation des Abrollradius ist es durch die Abnutzung des Reifens teilweise möglich, Kreisbögen verschiedener Radien auf die Kontur zu legen. Die Differenz dieser Radien beträgt in der Regel nicht mehr als 5 %. Für die Berechnung gewählt wird der Radius, welcher primär bei mittleren und großen Schräglagen auf der Kontur der Schablone liegt.

| Kurve:          |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------|--|--|--|--|--|--|--|
| $v$ [m/s]       |  |  |  |  |  |  |  |
| $R$ [m]         |  |  |  |  |  |  |  |
| $\lambda_e$ [°] |  |  |  |  |  |  |  |
| 21 100 24,21    |  |  |  |  |  |  |  |

| Fehler            | $F_{h,h}$ | $F_{v,h}$ | $F_{h,s}$ | $r_h$   | $r_v$   | $l$     | $r_{QS}$ |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|----------|
| relativ           | 0,005     | 0,005     | 0,005     | 0,035   | 0,035   | 0,01    | 0,05     |
| absolut ( $\mu$ ) | 0,851 kg  | 0,705 kg  | 0,926 kg  | 0,011 m | 0,011 m | 0,014 m | 0,005 m  |

|                 | $h_{sp}$ [m] | $\Delta h_{sp}$ [m] | $R_r$ [m]      | $\Delta R_r$ [m] | $\lambda'$ [°] | $\Delta \lambda'$ [°] | $\Delta \lambda$ (rel.) |
|-----------------|--------------|---------------------|----------------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| Fahrer14        | 0,648        | 0,061               | 0,10405        | 0,00520          | 4,50           | 0,88                  | 0,030                   |
| Fahrer01        | 0,649        | 0,074               | 0,08790        | 0,00440          | 3,68           | 0,82                  | 0,028                   |
| Fahrer29        | 0,653        | 0,074               | 0,10109        | 0,00505          | 4,31           | 0,97                  | 0,033                   |
| Fahrer03        | 0,678        | 0,069               | 0,10012        | 0,00501          | 4,07           | 0,83                  | 0,029                   |
| <b>Fahrer10</b> | <b>0,686</b> | <b>0,068</b>        | <b>0,10650</b> | <b>0,00532</b>   | <b>4,32</b>    | <b>0,88</b>           | <b>0,030</b>            |
| Fahrer16        | 0,691        | 0,071               | 0,10972        | 0,00549          | 4,44           | 0,93                  | 0,031                   |
| Fahrer22        | 0,704        | 0,072               | 0,11320        | 0,00566          | 4,50           | 0,95                  | 0,032                   |
| Fahrer12        | 0,706        | 0,074               | 0,10647        | 0,00532          | 4,17           | 0,87                  | 0,030                   |
| <b>Fahrer19</b> | <b>0,709</b> | <b>0,068</b>        | <b>0,10033</b> | <b>0,00502</b>   | <b>3,88</b>    | <b>0,75</b>           | <b>0,026</b>            |
| Fahrer28        | 0,715        | 0,073               | 0,10024        | 0,00501          | 3,83           | 0,77                  | 0,027                   |
| Fahrer18        | 0,715        | 0,068               | 0,11409        | 0,00570          | 4,46           | 0,88                  | 0,030                   |
| Fahrer23        | 0,718        | 0,076               | 0,09047        | 0,00452          | 3,39           | 0,70                  | 0,025                   |
| <b>Fahrer05</b> | <b>0,735</b> | <b>0,068</b>        | <b>0,10650</b> | <b>0,00532</b>   | <b>3,98</b>    | <b>0,75</b>           | <b>0,026</b>            |
| Fahrer25        | 0,749        | 0,069               | 0,10307        | 0,00515          | 3,75           | 0,70                  | 0,024                   |
| Fahrer15        | 0,750        | 0,074               | 0,11445        | 0,00572          | 4,23           | 0,85                  | 0,029                   |
| Fahrer04        | 0,755        | 0,068               | 0,10361        | 0,00518          | 3,74           | 0,68                  | 0,024                   |
| Fahrer13        | 0,757        | 0,074               | 0,09054        | 0,00453          | 3,20           | 0,61                  | 0,022                   |
| Fahrer06        | 0,785        | 0,085               | 0,09037        | 0,00452          | 3,06           | 0,63                  | 0,023                   |
| <b>Fahrer09</b> | <b>0,792</b> | <b>0,070</b>        | <b>0,10650</b> | <b>0,00532</b>   | <b>3,65</b>    | <b>0,66</b>           | <b>0,023</b>            |
| Fahrer21        | 0,796        | 0,076               | 0,11756        | 0,00588          | 4,07           | 0,79                  | 0,027                   |
| Fahrer24        | 0,799        | 0,072               | 0,10583        | 0,00529          | 3,59           | 0,65                  | 0,023                   |
| Fahrer20        | 0,818        | 0,072               | 0,10712        | 0,00536          | 3,54           | 0,63                  | 0,022                   |
| Fahrer26        | 0,838        | 0,078               | 0,09548        | 0,00477          | 3,02           | 0,55                  | 0,020                   |
| Fahrer07        | 0,839        | 0,072               | 0,08449        | 0,00422          | 2,63           | 0,44                  | 0,016                   |
| Fahrer08        | 0,843        | 0,081               | 0,09506        | 0,00475          | 2,99           | 0,55                  | 0,020                   |
| <b>Fahrer02</b> | <b>0,856</b> | <b>0,072</b>        | <b>0,10390</b> | <b>0,00520</b>   | <b>3,25</b>    | <b>0,55</b>           | <b>0,020</b>            |
| Fahrer11        | 0,858        | 0,077               | 0,09524        | 0,00476          | 2,93           | 0,52                  | 0,019                   |
| Fahrer27        | 0,863        | 0,079               | 0,07712        | 0,00386          | 2,30           | 0,40                  | 0,015                   |
| <b>Fahrer17</b> | <b>0,866</b> | <b>0,071</b>        | <b>0,10650</b> | <b>0,00532</b>   | <b>3,30</b>    | <b>0,55</b>           | <b>0,020</b>            |

Abb. 5-14: Ergebnisse der Fehlerauswertung



Der dritte Teil der Abb. 5-14 zeigt die Ergebnisse der Fehlerbetrachtung für alle Fahrer. In den einzelnen Spalten von links nach rechts sind die errechnete Schwerpunkthöhe, der maximale absolute Fehler der Schwerpunkthöhe, der gemessene Radius des Reifenquerschnitts, der maximale absolute Fehler des Radius, die Schräglage resultierend aus der Reifenbreite nach Gl. 3-5, der maximalen absoluten Fehler der Schräglage und der maximalen relative Fehler bezogen auf die Gesamtschräglage aufgetragen. Die Tabellenzeilen sind nach der errechneten Schwerpunkthöhe  $h_{SP}$  aufsteigend sortiert.

Die maximalen absoluten Fehler bei der Berechnung des Schwerpunktes liegen im Bereich 6,1 – 8,5 cm, der Mittelwert beträgt 7,3 cm. [COS06] gibt für die Lage des Schwerpunktes einen Bereich von 0,4 – 0,55 m ohne Fahrer an. Durch die zusätzliche Gewichtsbelastung mit dem Fahrer verschiebt sich der Schwerpunkt nach oben und liegt in einem Bereich 0,5 – 0,7 m. Demgegenüber steht ein umfangreicher Motorradtest aus dem Jahre 2010. [GLÜ10] ermittelten in ihrem Test den exakten Schwerpunkt von sieben verschiedenen Motorrädern, wobei sie mit den untersuchten Modellen ein breites Spektrum an Typen abdecken. Eines der getesteten Fahrzeuge ist die Triumph Street Triple R. Der errechnete Schwerpunkt für die Triumph liegt nach [GLÜ10] bei einer vom Boden aus gemessenen Höhe  $h_{SP} = 0,649$  m ohne Fahrer. Für Fahrer mit einem Gewicht von  $m_F = 50, 70$  und  $90$  kg errechnen sich demnach die Schwerpunkthöhen von Fahrer und Maschine zu  $h_{SP} = 0,718, 0,738$  und  $0,755$  m. Dabei wurde der Schwerpunkt des Fahrers 15 cm über der Sitzfläche angenommen. Die Triumph Street Triple R ist in den Fahrversuchen dieser Arbeit sechs Mal vertreten. In Abb. 5-14 sind diese rot markiert. Die errechneten Schwerpunkthöhen in Abb. 5-14 liegen in einem deutlich größeren Bereich. Diese Schwankung resultiert aus der geringen Stufenhöhe von  $\Delta h = 0,215$  bzw.  $0,235$  m beim schrägen Wiegen. Technisch ist es bei der Durchführung der Wiegevorgänge vor Ort unmöglich, das Motorrad samt Fahrer in einer noch größeren Schräglage zu verwiegen und dabei die Sicherheit der Fahrer zu gewährleisten.

Der absolute Fehler bei der Bestimmung des Reifenquerschnittsradius errechnet sich bei einem relativen Fehler von 5 % zu 0,4 – 0,6 cm. Beide Fehler haben einen direkten Einfluss auf die Schräglage  $\lambda'$ . Nach Gl. 5-6 beträgt die maximale absolute Abweichung der Schräglage  $\pm 0,4 - 0,97^\circ$ . Der Anteil der Schräglage aus der Reifenbreite  $\lambda'$  an der Gesamtschräglage  $\lambda$  beträgt im Mittel 13,2 %, so dass sich für die Gesamtschräglage eine maximale relative Abweichung von  $\pm 1,49 - 3,29$  % ergibt.



## 6 Versuchsauswertung

### 6.1 Erzeugung der GPS-Rohdaten

Zu Beginn der Versuchsauswertung werden die intern in einem proprietären Format gespeicherten Messdaten von den GPS-Loggern in die dazugehörige Software QSports übertragen. Hierbei ist es möglich, von der Software den GPS-Drift aus dem Signal herausrechnen zu lassen. Die Software entfernt in diesem Fall die betroffenen Messpunkte. GPS-Drift bezeichnet das langsame Wandern des GPS-Signals aufgrund möglicher Störungen wie zum Beispiel atmosphärische Störungen, Uhrenfehler der Atomuhren, Reflektionen, Rundungsfehler, etc., Abb. 6-1.

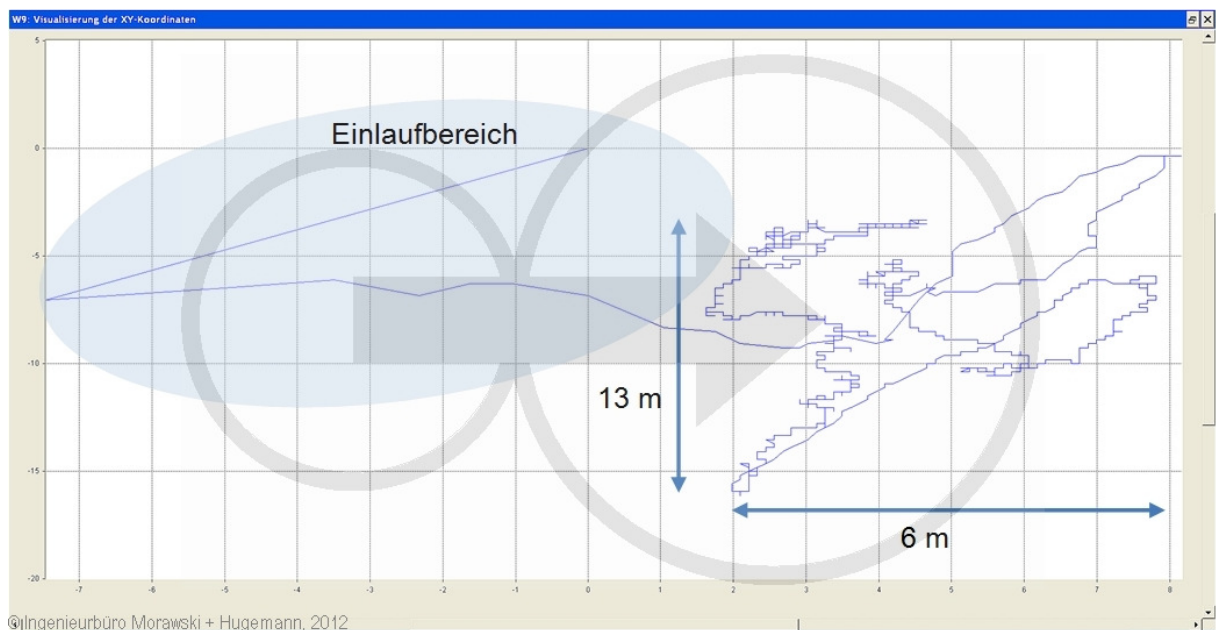


Abb. 6-1: GPS-Drift

In der Abb. 6-1 ist die Auswertung der GPS-Daten ohne die Entfernung des GPS-Drifts gezeigt. Im Test hat der GPS-Logger 5,5 Std in ruhender Position unter freiem Himmel seine Position mit einem 1-Hz-Signal geloggt. Deutlich zu sehen ist der „Einlauf“ von Position (0/0) in der Mitte des Bildes nach unten links und schließlich annäherungsweise horizontal nach rechts. Dieser zeitlich kurze Teil der Aufzeichnung spiegelt die erste Positionsbestimmung des Loggers. Anschließend fallen die meisten Werte in einen Kreis mit dem Radius  $r = 5\text{ m}$ . Dies entspricht der absoluten Genauigkeit des Loggers. Befindet sich der Logger in Bewegung, so bleibt diese absolute Ungenauigkeit zwar bestehen, die relative Ungenauigkeit der einzelnen Messpunkte zueinander ist jedoch wesentlich geringer, sodass die lokale Krümmung der Bahnkurve und daraus resultierend die Schräglage sehr genau berechnet werden kann. Der zu erkennende stufenförmige Verlauf ist ein Quantisierungsfehler. Bei den Messfahrten liegen die einzelnen Messpunkte weit genug auseinander, dass dieser Effekt dort keine Rolle spielt.



Bei bestehender Internetverbindung liefert die Übersicht in QSports eine erste Zusammenfassung der aufgenommenen Versuchsstrecke samt Fahrspur in Google Maps. Die Software bietet die Möglichkeit, die GPS-Daten direkt im NMEA-Format zu exportieren. Neben dem NMEA-Format bietet die Software eine Reihe anderer Export-Formate, wie zum Beispiel der Möglichkeit, die GPS-Daten in eine csv-Datei zu exportieren und die Daten direkt mit Excel zu verarbeiten. Aus dem Vergleichstest der verschiedenen GPS-Logger, von denen einer lediglich das NMEA-Format unterstützt hat, resultiert der hier gewählte Weg über die NMEA-Datensätze.

## 6.2 Verarbeitung der GPS-Rohdaten

Die Weiterverarbeitung der GPS-Rohdaten im NMEA-Format erfolgt mit einem selbstgeschriebenen Excel-Makro, welches die relevanten GPS-Daten direkt in Excel importiert. Bei den mit dem QStarz-Logger aufgenommenen NMEA-Datensätzen folgt immer der GGA-Datensatz auf den RMC-Datensatz, ein zeitlicher Versatz zwischen den Datensatztypen ist ausgeschlossen. So ist es möglich, die Daten sequentiell einzulesen. Das Makro schreibt dabei folgende Daten zeilenweise in das Arbeitsblatt:

- GPS-Uhrzeit
- Fahrzeit
- GPS-Geschwindigkeit
- geografische Breite in Grad
- geografische Länge in Grad

Abb. 6-2 gibt beispielhaft den Auszug der importierten GPS-Daten einer Messfahrt wieder.

| Uhrzeit GPS | Zeit [s] | v_GPS [km/h] | geogr. Breite [°] | geogr. Länge [°] |
|-------------|----------|--------------|-------------------|------------------|
| 124310,6    | 718,4    | 86,15509158  | 51,00299333       | 7,32502          |
| 124310,7    | 718,5    | 86,1722874   | 51,002985         | 7,324988333      |
| 124310,8    | 718,6    | 86,39853692  | 51,00297667       | 7,324956667      |
| 124310,9    | 718,7    | 86,53224202  | 51,00296833       | 7,324926667      |
| 124311      | 718,8    | 86,50418053  | 51,00296          | 7,324895         |
| 124311,1    | 718,9    | 86,65231271  | 51,00295167       | 7,324863333      |
| 124311,2    | 719      | 86,8664483   | 51,00294333       | 7,324831667      |
| 124311,3    | 719,1    | 86,88882416  | 51,002935         | 7,3248           |
| 124311,4    | 719,2    | 87,2346647   | 51,00292833       | 7,324766667      |
| 124311,5    | 719,3    | 87,11965182  | 51,00292          | 7,324735         |

Abb. 6-2: Auszug der importierten GPS-Daten einer Messfahrt

Das Ziel der Verarbeitung in Excel ist es, neben der Zeit und der Geschwindigkeit für jeden Datenpunkt eine XY-Koordinate zu erhalten. In der Regel werden Positionen auf der Erde in Kugelkoordinaten in Längen- und Breitengrad angegeben. Dabei wird die Erde in 360 senkrecht verlaufende Längen- und 180 waagrecht verlaufende Breitengrade unterteilt. Um die Kugelkoordinaten auf einer zweidimensionalen Karte darzustellen, gibt es verschiedene Kartenbezugssysteme, welche u.a. die elliptische Form der Erde berücksichtigen. Je größer das

abzubildende Gebiet in einer Karte ist, desto wichtiger ist der Einsatz eines geodätischen Koordinatensystems. Die maximalen Maße der Teststrecke betragen entlang des 51,02. Breitengrades 6,5 km und entlang des 7,3. Längengrades 3,5 km. Die abzubildende Fläche auf der Erde ist demnach so klein, dass auf ein ausgefeiltes Kartenbezugssystem verzichtet werden kann. Die GPS-Positionen werden daher als Kugelkoordinaten angenommen und in kartesische Koordinaten umgewandelt.

### 6.2.1 Umwandlung der Kugelkoordinaten in kartesische Koordinaten

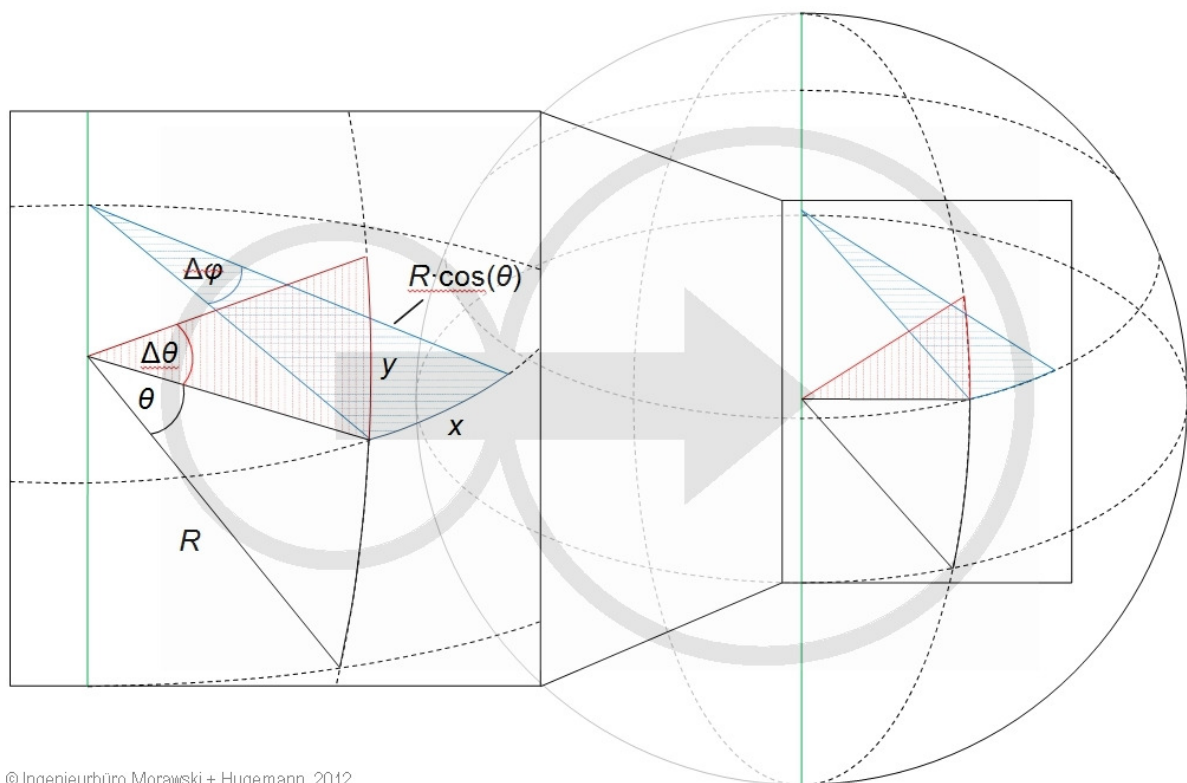
Bei der Umwandlung der Koordinaten ist zu beachten, dass zur Vereinfachung die Erde als Kugel mit einem Radius von  $R = 6371$  km angenommen wird.

Als erstes muss bei der Umwandlung der Nullpunkt des kartesischen Koordinatensystems gesetzt werden. Dies ist in allen Fällen die erste aufgezeichnete Koordinate der GPS-Koordinaten. Anschließend wird die Differenz der jeweiligen Längen- ( $\Delta\varphi$ ) und Breitengrade ( $\Delta\theta$ ) zur Nullpunktcoordinate ( $\varphi_0, \theta_0$ ) berechnet:

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_0 \quad \text{Gl. 6-1}$$

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_0 \quad \text{Gl. 6-2}$$

In Abb. 6-3 sind die geometrischen Zusammenhänge für die Umrechnung der Kugelkoordinaten in kartesischen Koordinaten dargestellt.



© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 6-3: Berechnung der kartesischen Koordinaten

Die Berechnung der kartesischen Koordinaten aus den Kugelkoordinaten der GPS-Rohdaten ist in den folgenden zwei Gleichungen angegeben:

$$x_i = R \cdot \cos(\theta_i) \cdot \Delta\varphi_i \quad \text{Gl. 6-3}$$

$$y_i = R \cdot \Delta\theta_i \quad \text{Gl. 6-4}$$

### 6.3 Weiterverarbeitung der Daten mit DADiSP

Die berechneten XY-Koordinaten sowie die Geschwindigkeit und die Zeit sind die Grundlage für die Weiterverarbeitung der Daten mit dem Signalverarbeitungsprogramm DADiSP. Das Ziel der Auswertung in DADiSP ist es, für jeden Messpunkt den Bahnradius und die Schräglage zu errechnen.

Der große Vorteil von DADiSP bei der Weiterverarbeitung der GPS-Daten liegt in der Verwendung von nahezu identischen Datentabellen als Datengrundlage, wie sie auch in Excel zum Einsatz kommen. Die einzelnen Fenster lassen sich über Funktionen miteinander verknüpfen. Abb. 6-4 zeigt einen Screenshot der Programmoberfläche von DADiSP. Da in der Studentenversion die maximale Anzahl an Fenstern auf neun beschränkt ist, müssen insgesamt zwei Dateien mit je neun Fenstern erzeugt werden, um den Bahnradius und die Schräglage zu berechnen.

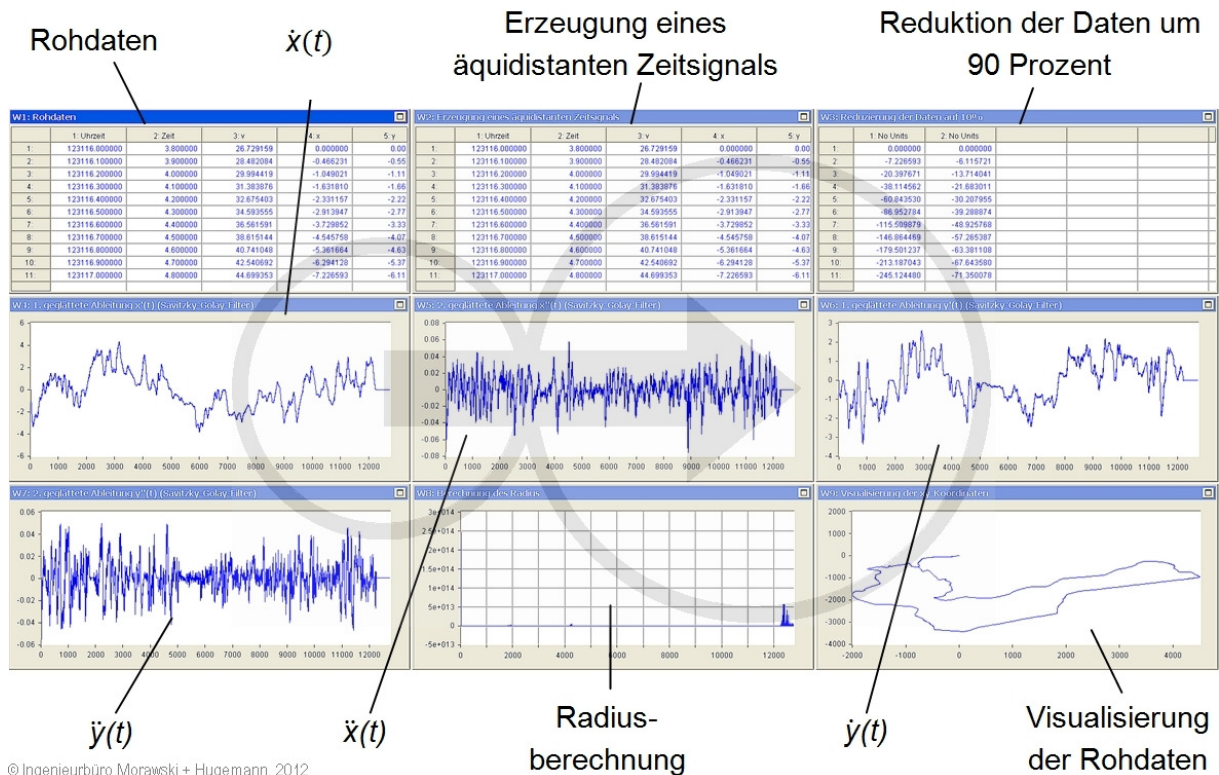
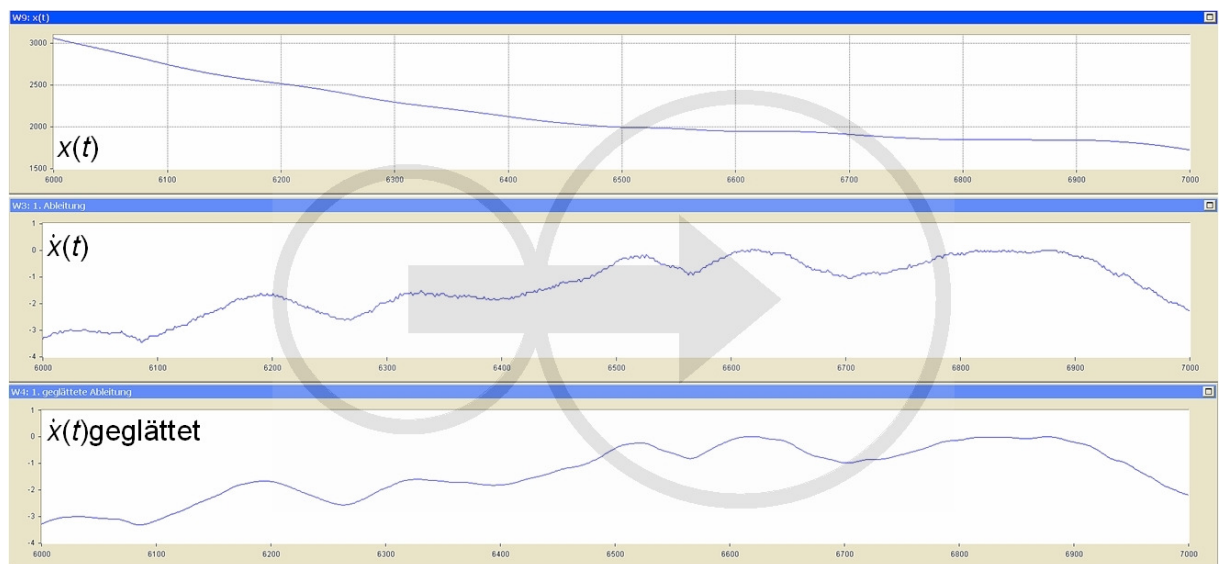


Abb. 6-4: Screenshot der Signalanalysesoftware DADiSP

### 6.3.1 Berechnung des Bahnradius

In Abb. 6-4 ist die Radiusberechnung aus den XY-Koordinaten dargestellt. Das Fenster W1 oben links enthält die Rohdaten aus Excel, welche in den folgenden acht Fenstern W2 bis W9 weiterverarbeitet werden. Als erstes muss das GPS-Signal in ein äquidistantes Zeitsignal umgewandelt werden, Fenster W2 (oben Mitte). Anderenfalls käme es zu Fehlern in der Berechnung der Ableitung in Form von Peaks im Verlauf des Signals. Dies geschieht durch Interpolation sämtlicher Aussetzer sowohl für die Zeit, als auch für die beiden Koordinaten und die Geschwindigkeit. Die Zeitachse des geloggten GPS-Signals ist zum einen aufgrund des entfernten Drifts nicht äquidistant, zum anderen hat das 10-Hz-GPS-Signal regelmäßige Aussetzer in Form von zwei fehlenden Messpunkten. Bei dem 1-Hz-Signal aus Abb. 6-1 tauchen diese Aussetzer nicht auf. Dies lässt darauf schließen, dass es sich hierbei um interne Verarbeitungsprobleme des Loggers im 10-Hz-Modus handelt. In Fenster W3 wird aus dem 10-Hz-Signal ein 1-Hz-Signal erzeugt. Dieses wird im späteren Verlauf der Auswertung benutzt, um die gefahrene Strecke mit einer Straßenkarte zu überlagern und so Fehler bei der Berechnung der Koordinaten auszuschließen. Das 10-Hz-Signal kann hier aufgrund der zu großen Datenmenge nicht verwendet werden.

Für die Berechnung des Krümmungsradius einer Kurve werden die erste und zweite Ableitung der Variablen  $x$  und  $y$  nach der Zeit benötigt. Differenzieren hat jedoch eine aufrauende Wirkung auf den Verlauf des Signals [HOC95]. Die Abb. 6-5 zeigt im oberen Teil einen Ausschnitt der Funktion  $x(t)$  sowie die Ableitung der Funktion im mittleren Fenster.



© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 6-5: Vergleich der Ableitungsfunktionen

Deutlich zu erkennen ist der raue Verlauf der Ableitungsfunktion im mittleren Fenster. Bedenkt man, dass in die Berechnung des Bahnradius nicht nur die erste, sondern ebenfalls die zweite Ableitung einfließt, so kann man sich leicht vorstellen, dass sich die aufrauende Wir-

kung nochmals verstärkt und demzufolge einige Parameter nicht korrekt ermittelt werden können [HOC95].

Eine Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen, ist das glättende Filtern des Signals nach jeder Differenzierung etwa durch gleitende Mittelwertbildung. Da diese Vorgehensweise jedoch sehr umständlich und die maximale Fensteranzahl in DADiSP SE auf neun begrenzt ist, wird nach einer alternativen Lösung gesucht.

Savitzky und Golay haben zu diesem Zweck eine Ableitungs- und Filterfunktion entwickelt, die eine Funktion in nur einem Schritt ableitet und filtert. Im unteren Fenster in Abb. 6-5 ist die geglättete Ableitung nach Savitzky und Golay für den Verlauf aus dem ersten Fenster angegeben. Ein Vergleich mit der Ableitung im mittleren Fenster macht die glättende Funktion deutlich.

Die allgemeine Berechnungsgleichung nach Savitzky und Golay [SAV64] lautet:

$$Y_j^* = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=-m}^m C_i \cdot Y_{j+i} \quad \text{Gl. 6-5}$$

Das Verhalten des Filters kann über die Koeffizienten  $C_i$  eingestellt werden. So lässt sich unter anderem eine gleitende Mittelwertbildung oder aber eine geglättete Ableitung beliebiger Ordnung erzeugen. Die Gleichung greift bei der Berechnung der Wertes  $Y_j^*$  auf insgesamt  $2m+1$  Werte zurück, gewichtet diese mithilfe der Koeffizienten  $C_i$  und normiert die Summe anschließend.

Bei der Berechnung des Bahnradius hat sich für die erste und zweite Ableitung die Verwendung von 21 Stützstellen als sinnvoll erwiesen. Das heißt neben dem Wert  $Y_j$  werden in positive und negative Zeitrichtung jeweils 10 zusätzliche Werte für die Berechnung der geglätteten Ableitungen berücksichtigt.

Für die erste geglättete Ableitung errechnen sich die von Savitzki und Golay ermittelten Koeffizienten und der Normierungsfaktor [SAV64] wie folgt:

$$C_j = i \quad \text{Gl. 6-6}$$

$$N = \sum_{i=-m}^m C_i^2 \quad \text{Gl. 6-7}$$

Der Normierungsfaktor beträgt bei 21 Stützstellen für die erste geglättete Ableitung  $N = 770$ .

Im Falle der zweiten geglätteten Ableitung haben Savitzky und Golay eine Tabelle mit Koeffizienten entwickelt, Abb. 6-6. In der obersten Zeile ist die Anzahl der verwendeten Stützstellen angegeben. Die erste Spalte entspricht dem Zähler  $i$ . Der Normierungsfaktor  $N$  ist in der letzten Zeile zu finden.

© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

| Points | 25    | 23    | 21    | 19   | 17   | 15   | 13   | 11  | 9   | 7  | 5  |
|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-----|-----|----|----|
| -12    | 92    |       |       |      |      |      |      |     |     |    |    |
| -11    | 69    | 77    |       |      |      |      |      |     |     |    |    |
| -10    | 48    | 56    | 190   |      |      |      |      |     |     |    |    |
| -9     | 29    | 37    | 133   | 51   |      |      |      |     |     |    |    |
| -8     | 12    | 20    | 82    | 34   | 40   |      |      |     |     |    |    |
| -7     | -3    | 5     | 37    | 19   | 25   | 91   |      |     |     |    |    |
| -6     | -16   | -8    | -2    | 6    | 12   | 52   | 22   |     |     |    |    |
| -5     | -27   | -19   | -35   | -5   | 1    | 19   | 11   | 15  |     |    |    |
| -4     | -36   | -28   | -62   | -14  | -8   | -8   | 2    | 6   | 28  |    |    |
| -3     | -43   | -35   | -83   | -21  | -15  | -29  | -5   | -1  | 7   | 5  |    |
| -2     | -48   | -40   | -98   | -26  | -20  | -48  | -10  | -6  | -8  | 0  | 2  |
| -1     | -51   | -43   | -107  | -29  | -23  | -53  | -13  | -9  | -17 | -3 | -1 |
| 0      | -52   | -44   | -110  | -30  | -24  | -56  | -14  | -10 | -20 | -4 | -2 |
| 1      | -51   | -43   | -107  | -29  | -23  | -53  | -13  | -9  | -17 | -3 | -1 |
| 2      | -48   | -40   | -98   | -26  | -20  | -48  | -10  | -6  | -8  | 0  | 2  |
| 3      | -43   | -35   | -83   | -21  | -15  | -29  | -5   | -1  | 7   | 5  |    |
| 4      | -36   | -28   | -62   | -14  | -8   | -8   | 2    | 6   | 28  |    |    |
| 5      | -27   | -19   | -35   | -5   | 1    | 19   | 11   | 15  |     |    |    |
| 6      | -16   | -8    | -2    | 6    | 12   | 52   | 22   |     |     |    |    |
| 7      | -3    | 5     | 37    | 19   | 25   | 91   |      |     |     |    |    |
| 8      | 12    | 20    | 82    | 34   | 40   |      |      |     |     |    |    |
| 9      | 29    | 37    | 133   | 51   |      |      |      |     |     |    |    |
| 10     | 48    | 56    | 190   |      |      |      |      |     |     |    |    |
| 11     | 69    | 77    |       |      |      |      |      |     |     |    |    |
| 12     | 92    |       |       |      |      |      |      |     |     |    |    |
| Norm   | 26910 | 17710 | 33649 | 6783 | 3876 | 6188 | 1001 | 429 | 462 | 42 | 7  |

Abb. 6-6: Koeffizienten der zweiten geglätteten Ableitung nach Savitzky und Golay [SAV64]

Für die Berechnung der zweiten geglätteten Ableitung stehen die Koeffizienten  $C_i$  in der vierten, gelb hervorgehobenen Spalte der Tabelle in Abb. 6-6. Der Normierungsfaktor beträgt  $N = 33649$ .

Die Berechnung der geglätteten ersten beiden Ableitungen findet sich in Abb. 6-4 in den Fenstern W4 bis W7 in der mittleren Reihe und unten links. In dem mittleren unteren Fenster W8 wird der Bahnradius mittels Gl. 6-8 berechnet. Das letzte Fenster W9 wird für die Berechnung des Radius nicht benötigt und ist lediglich eine Visualisierung der XY-Koordinaten aus Fenster W1 oben links.

Der Krümmungsradius einer Kurve in Parameterdarstellung kann nach folgender Gleichung berechnet werden [BRO99]:

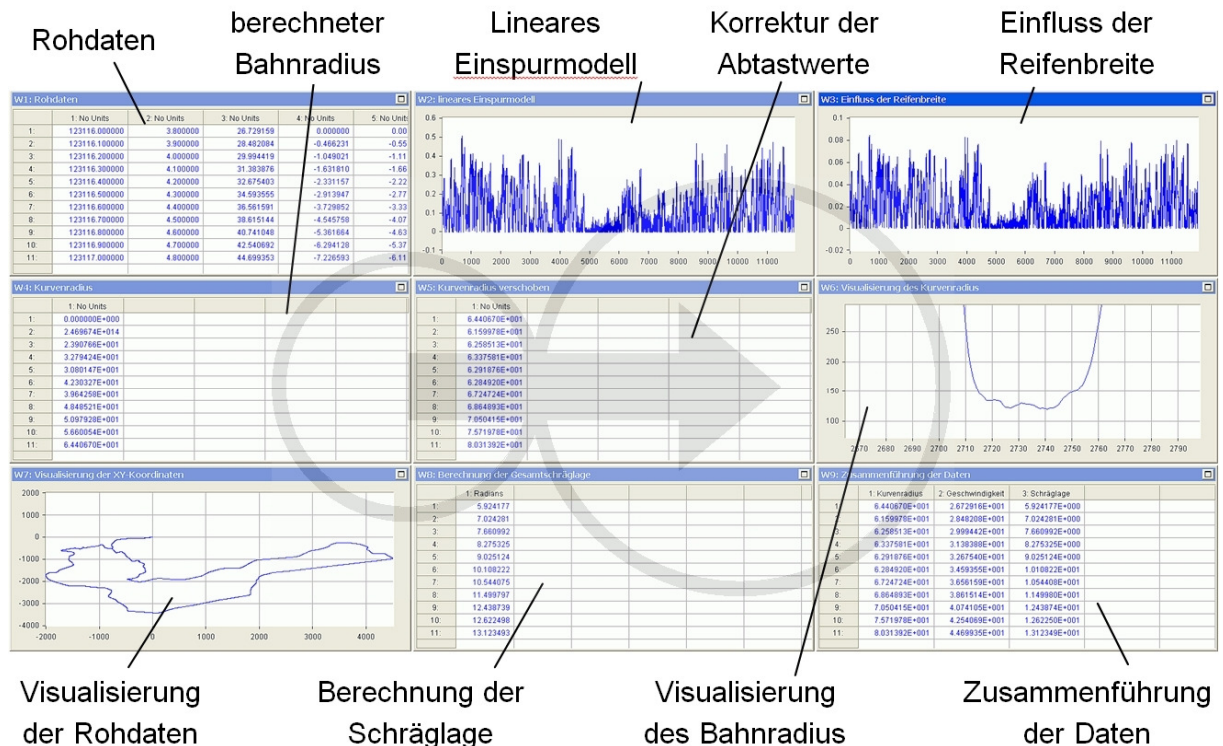
$$R = \frac{\left[ \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{dx}{dt} \cdot \frac{d^2y}{dt^2} - \frac{d^2x}{dt^2} \cdot \frac{dy}{dt}} \quad \text{Gl. 6-8}$$





### 6.3.2 Berechnung der Schräglage

Die Berechnung der Schräglage nach den Gleichungen Gl. 3-3, Gl. 3-4 und Gl. 3-5 erfolgt in DADiSP mittels der GPS-Rohdaten, den Daten aus dem Erfassungsbogen, Abb. 5-6, und dem zuvor berechneten Bahnradius. Die folgende Abbildung, Abb. 6-7, zeigt einen Screenshot der Schräglagenberechnung in DADiSP.



© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 6-7: Screenshot der Schräglagenberechnung mit DADiSP

In dem ersten Fenster W1 oben links befinden sich, wie bei der Berechnung des Bahnradius, die aus Excel importierten Rohdaten. Darunter, im Fenster W4, ist der berechnete Radius eingefügt. DADiSP kann bei der Bildung einer Differenzengleichung, wie sie in Gl. 6-5 für die Berechnung der Ableitungen verwendet wurde, nur auf zurückliegende Werte zugreifen. In dem Fenster W5 in der Mitte der Abb. 6-7 werden die Bahnradien zu den richtigen Abtastwerten verschoben. Die Fenster W2 und W3 in der oberen Reihe der Abbildung enthalten die Berechnung der Schräglage (oben Mitte) durch das lineare Einspurmodell nach Gl. 3-3 und den Einfluss der Reifenbreite (oben rechts) nach Gl. 3-4. Um diese berechnen zu können, wurden die Schwerpunkthöhe und der Radius des Reifenquerschnitts für jeden Fahrer in DADiSP hinterlegt. Die Gesamtschräglage nach Gl. 3-5 findet sich im Fenster W8 in der unteren Reihe in der Mitte wieder. Es ist zu beachten, dass mit diesem Modell nur die Schräglage für den Fahrstil „Legen“ in Abb. 3-6 berechnet werden kann. Das Fenster W9 unten rechts enthält die Zusammenfassung der Daten Bahnradius, Geschwindigkeit und Schräglage für die Ergebnisauswertung. Mit den Fenstern W7, der Visualisierung der Rohdaten, W8, Berechnung der Schräglage und W6, Visualisierung des Bahnradius, ist es möglich, den



Scheitelpunkt der 39 auszuwertenden Kurven für jeden Fahrer exakt zu bestimmen und so die drei Größen Bahnradius, Geschwindigkeit und Schräglage für alle Kurven auszuwerten.

#### 6.4 Verifizierung der Versuchsauswertung

Um die Genauigkeit der Messergebnisse und der Auswertung zu überprüfen, werden zusätzliche Versuchsfahrten durchgeführt.

##### 6.4.1 Versuchsaufbau

Bei dieser Versuchsreihe wird der Motorradfahrer während der Kurvendurchfahrt gefilmt. Die Ausrichtung der Kamera erfolgt dabei tangential im Scheitelpunkt der Kurve. Somit befindet sich der Fahrer bei Erreichen dieses Punktes exakt frontal vor der Kamera. Abb. 6-8 zeigt den skizzierten Versuchsaufbau im Luftbild.

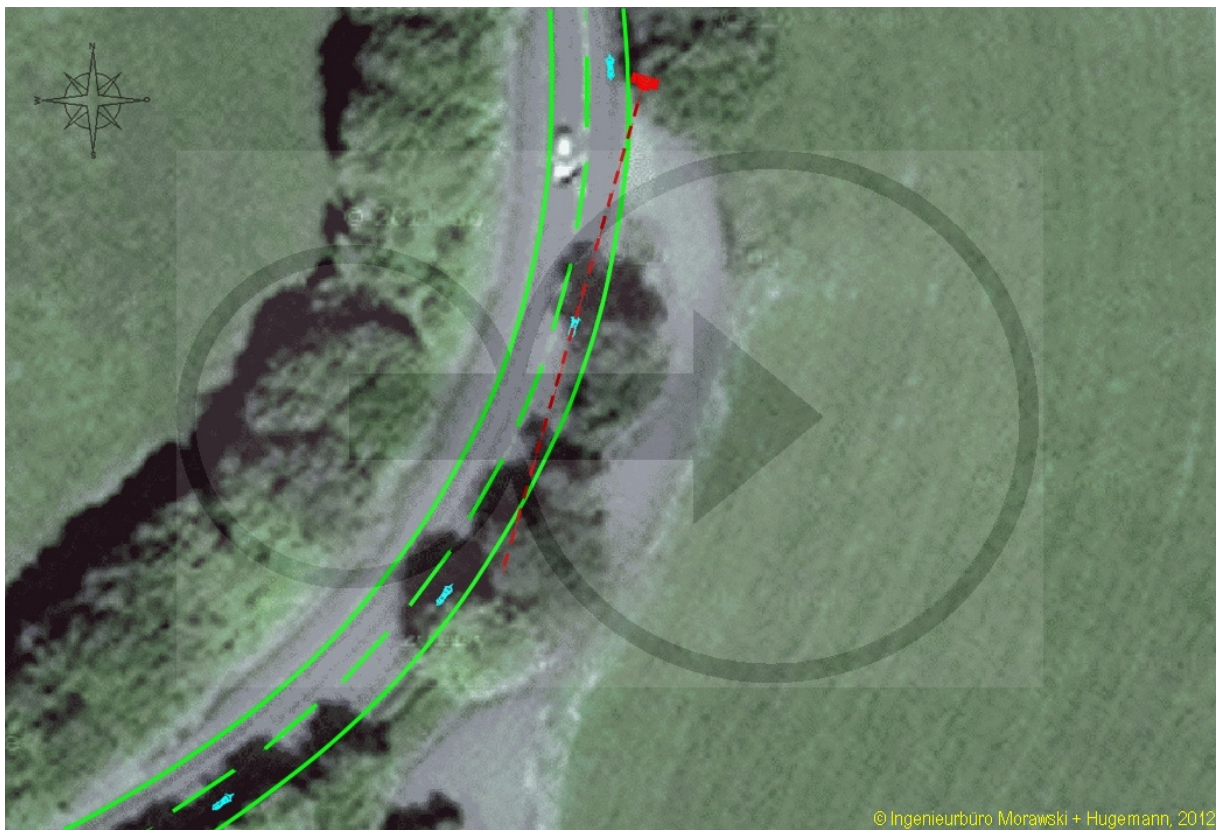


Abb. 6-8: Versuchsaufbau der Versuchsfahrt in Odenthal

Das Video der Versuchsfahrt wird im Anschluss ausgewertet und die Schräglage des Fahrers im Scheitelpunkt der Kurve ausgemessen.



Abb. 6-9 zeigt exemplarisch die Auswertung des Videos einer Kurvendurchfahrt.

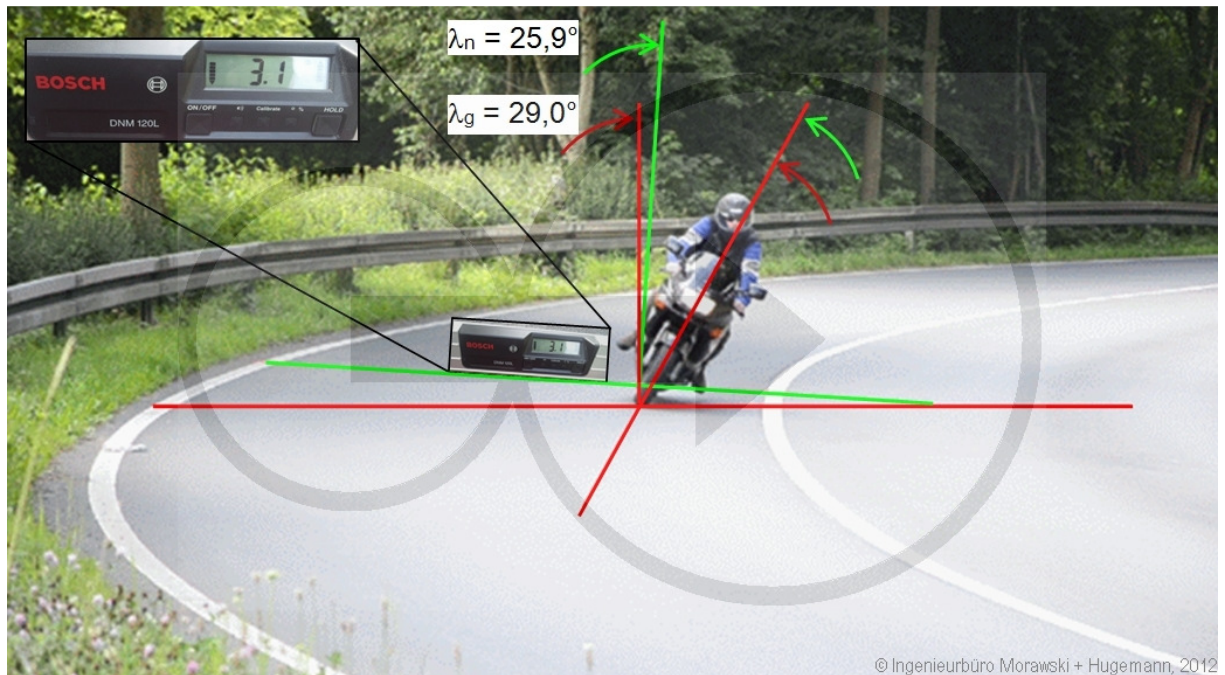


Abb. 6-9: Auswertung der Videoaufnahme

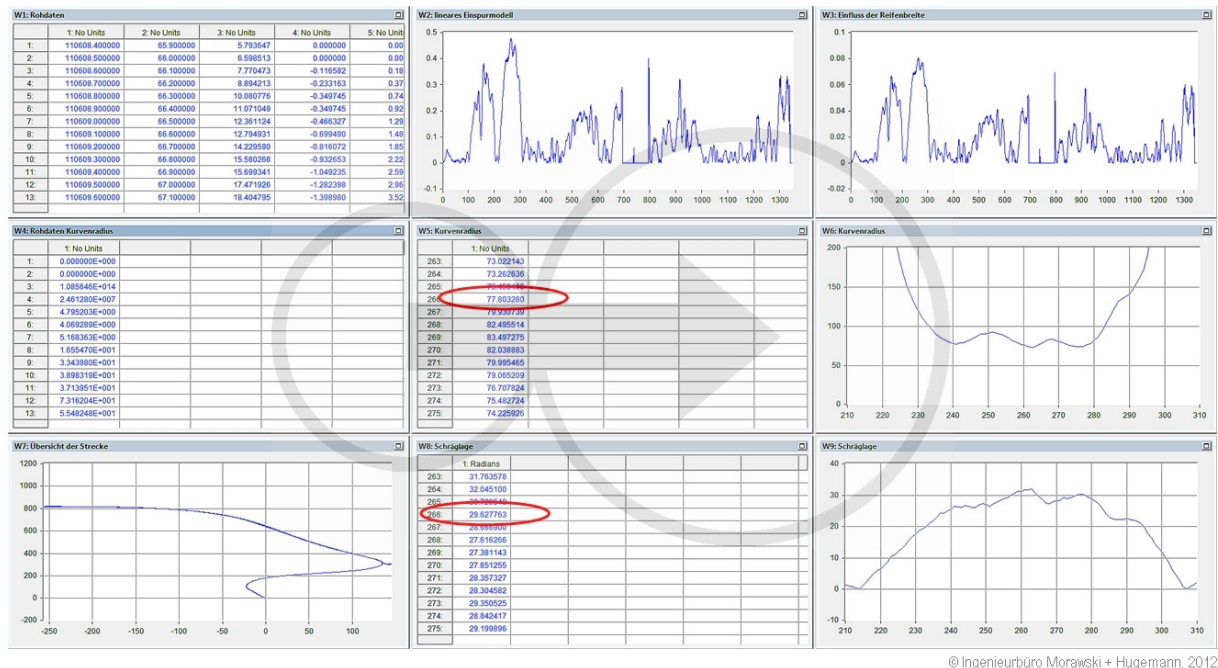
Die untersuchte Kurve befindet sich auf der Strecke Bergisch Gladbach – Odenthal. An dieser Stelle der Strecke hat die Straße eine Querneigung zum Kurvenmittelpunkt. Eine Messung des Gefälles radial zur Kurve entlang der grünen Markierung in Abb. 6-9 ergibt einen Neigungswinkel von  $\beta = 3,1^\circ$ . Bei der Auswertung des Videos ist dieser Winkel zu der Schräglage des Fahrers gegenüber der Fahrbahnnormalen hinzuzuaddieren.

#### 6.4.2 Auswertung der Ergebnisse

Bei der Kurvendurchfahrt konnte in dem Video ein Schräglagenwinkel des Motorrads gegenüber den Fahrbahnnormalen von  $\lambda_n = 25,9^\circ$  ausgemessen werden. Die Gesamtschräglage des Motorrads bezogen auf eine horizontale Straße entspricht der Summe aus der Schräglage gegenüber der Fahrbahnnormalen und der Straßenneigung in radialer Richtung. Somit ergibt sich für die Auswertung in Abb. 6-9 ein Gesamtschräglagenwinkel  $\lambda_g = 29,0^\circ$ . Deutlich zu erkennen ist der Fahrstil „Legen“ (vgl. Abb. 3-6) des Fahrers, bei dem die Schwerpunkte des Fahrers und des Motorrads in einer Ebene liegen, so dass der Gesamtschwerpunkt ebenfalls in dieser Ebene liegt.

Die aufgenommenen GPS-Daten der Versuchsfahrten werden analog zu den vorangegangenen Kapiteln ausgewertet. Die Auswertung der GPS-Daten berechnet die Schräglage des Motorrads bezogen auf eine ebene Straße, da die Querschleunigung immer in horizontaler Richtung radial zur Kurvenaußenseite wirkt.

Das Ergebnis der Auswertung ist in Abb. 6-10 dargestellt.



© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 6-10: Versuchsauswertung der Videofahrt mit DADiSP

Die exakte Position des Fahrers im Scheitelpunkt der Kurve wird direkt in DADiSP abgelesen. In Fenster „W7: Übersicht der Strecke“ (unten links in Abb. 6-10) kann die Strecke mit dem Cursor abgefahren und der Messwert Nr. 266 als zugehöriger Messwert zu der Momentaufnahme in Abb. 6-9 identifiziert werden. Auf diese Weise wurde unter Verwendung der GPS-Daten eine Schräglage  $\lambda_{\text{GPS}} = 29,6^\circ$  berechnet.

### 6.4.3 Vergleich der Ergebnisse

Vergleicht man die Schräglage aus der Auswertung des Videos  $\lambda_g$  mit der, aus der Auswertung der GPS-Daten resultierenden Schräglage  $\lambda_{\text{GPS}}$ , so stellt man fest, dass die Differenz der beiden Schräglagen  $\Delta\lambda = 0,6^\circ$  beträgt. Insgesamt werden vier Versuchsfahrten dieser Art durchgeführt und die Differenz zwischen der Videoauswertung und den GPS-Daten liegt immer im Bereich  $\Delta\lambda < 0,8^\circ$ . Die prozentuale Differenz zwischen Videoauswertung und den Ergebnissen aus den GPS-Daten beträgt maximal  $\Delta\lambda = 2,8\%$ .

Die Versuche dieses Kapitels lassen den Schluss zu, dass die Auswertung der GPS-Daten mittels der in Kapitel 6 vorgestellten Auswertung eine gute Annäherung an die tatsächliche Schräglage ist.



## 7 Versuchsergebnisse

Die untersuchten 39 Kurven der Teststrecke werden anhand der Luftbildauswertung in sechs Kategorien nach dem Kurvenradius so unterteilt, dass in jeder Kategorie ähnlich viele Kurven enthalten sind. Die Kategorien sind 10 – 35 m, 35 – 55 m, 55 – 80 m, 80 – 125 m, 125 – 200 m und 200 – 300 m. Von den aufgenommenen Ergebnissen konnten aufgrund der Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr und der damit teilweise verbundenen Behinderung der freien Fahrt durch andere Verkehrsteilnehmer nicht alle Kurven eines jeden Probanden verwendet werden. Daher streut die Anzahl der ausgewerteten Kurvenfahrten pro Kurvenkategorie.

### 7.1 Schräglage über alle Fahrer

In Abb. 7-1 sind die Schräglagen aller 29 Probanden über dem kategorisierten Kurvenradius aufgetragen. Zu sehen sind neben dem Median die 10-, 25-, 75- und 90 %-Perzentile. Der Vorteil des Medians gegenüber dem Mittelwert liegt in seiner Stabilität bei Ausreißern in den Messwerten. Der Vergleich mit dem Mittelwert ergibt vorliegend jedoch nahezu Deckungsgleichheit. Die Zahlen über den Datenpunkten des Medians geben die Anzahl der ausgewerteten Kurvenfahrten für jede Kategorie an.

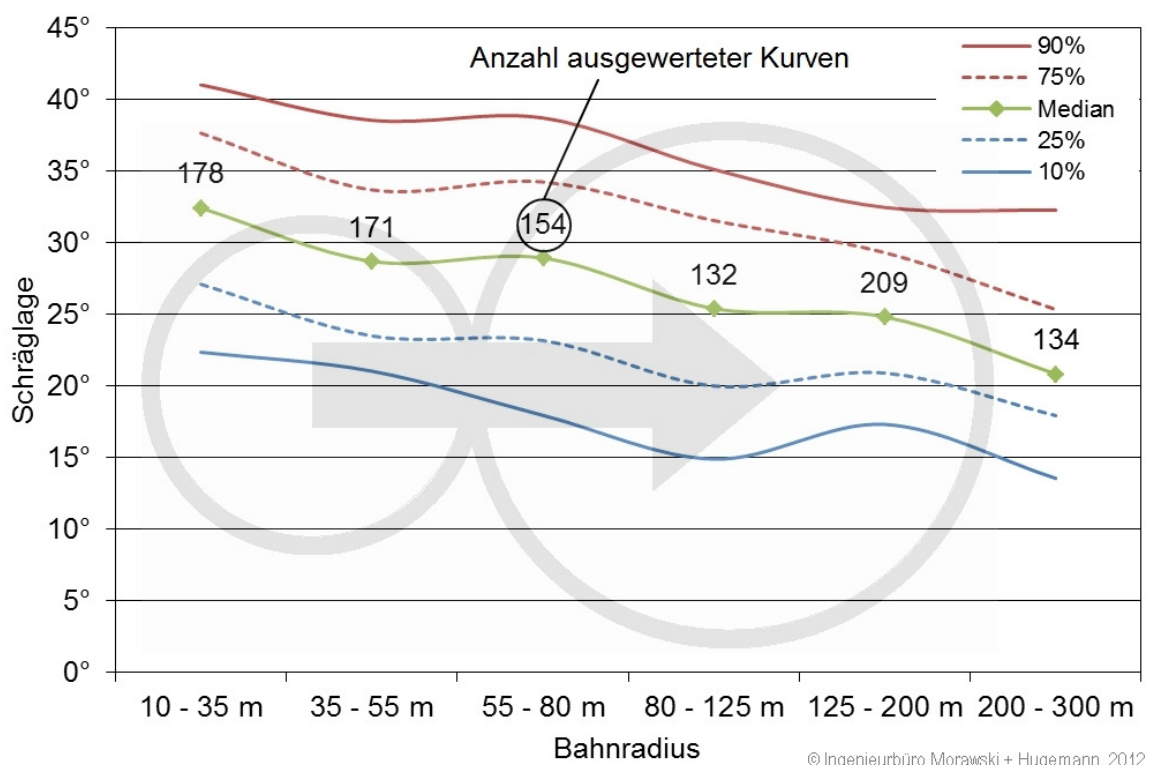


Abb. 7-1: Schräglage über alle Fahrer in Kurvenkategorien 1

Deutlich zu erkennen ist die abfallende Tendenz der Schräglage mit zunehmendem Bahnradius. Der Median fällt von  $\lambda = 32,5^\circ$  Schräglage bei einem Bahnradius von  $R = 10 - 35$  m auf einen Schräglagenwinkel von  $\lambda = 20,9^\circ$  in der Kurvenkategorie  $R = 200 - 300$  m. Die katego-

risierten Kurven und die daraus resultierende nichtlineare Skalierung der x-Achse verhindert die Berechnung einer Ausgleichsgeraden.

Die Differenz der 25- und 75 %-Perzentile vom Median beträgt im Mittel für die ersten vier Kurvenkategorien  $\Delta\lambda = 5,4^\circ$ . Erst im Bereich  $R = 125 - 200$  m nimmt die Differenz leicht ab. Für das 25 %-Perzentil beträgt die Differenz in der größten Kurvenkategorie nur noch  $2,9^\circ$  das 75 % Perzentil liegt mit  $\lambda = 25,3^\circ$  noch immer  $4,5^\circ$  über dem Median. Die Tabelle in Abb. 7-2 gibt die exakten Schräglagenwerte für die Abb. 7-1 an.

|        | 10 - 35 m | 35 - 55 m | 55 - 80 m | 80 - 125 m | 125 - 200 m | 200 - 300 m |
|--------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|
| 10%    | 22,4°     | 21,0°     | 18,0°     | 14,9°      | 17,3°       | 13,6°       |
| 25%    | 27,1°     | 23,5°     | 23,2°     | 20,0°      | 20,9°       | 17,9°       |
| Median | 32,4°     | 28,7°     | 28,9°     | 25,4°      | 24,8°       | 20,8°       |
| 75%    | 37,6°     | 33,7°     | 34,2°     | 31,6°      | 29,3°       | 25,3°       |
| 90%    | 41,0°     | 38,5°     | 38,7°     | 35,1°      | 32,5°       | 32,3°       |

© Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, 2012

Abb. 7-2: Schräglage über alle Fahrer in Kurvenkategorien 2

## 7.2 Einfluss der persönlichen Risikobereitschaft auf die Schräglage

Bei der Untersuchung der Schräglage ist es sinnvoll, die Fahrer anhand verschiedener Merkmale in Gruppen zusammenzufassen. Ein erstes Unterscheidungsmerkmal ist die persönliche Risikobereitschaft, nach welcher die Fahrer vor Fahrtantritt gefragt werden.

Das Merkmal Risikobereitschaft ist eine Eigenschaft des Motorradfahrers, die für den Sachverständigen bei der Rekonstruktion eines Unfalls schwer einzugrenzen ist. Dennoch zeigen sich hier signifikante Unterschiede im Fahrverhalten, die im Folgenden beschrieben werden.

Von den 29 Probanden schätzen sich drei Fahrer als zurückhaltend und vorsichtig ein. Die geringe Anzahl Probanden in dieser Risikoklasse führt zu der niedrigen Anzahl an auszuwertenden Kurvenfahrten von 11 – 22 pro Kurvenkategorie. Die deutliche Mehrheit der Fahrer gibt an, weder zurückhaltend noch besonders risikofreudig am Straßenverkehr teilzunehmen. In dieser Kategorie können pro Kurvenklasse 77 – 110 Kurvenfahrten ausgewertet werden. Rund 35 % der Fahrer stufen sich als risikobereit und forsch ein, sodass eine deutliche Auswirkung auf die Schräglage der Fahrer in den Kurven festzustellen ist. Hier können 42 – 61 Kurvenfahrten in den einzelnen Kategorien ausgewertet werden.



Die Abb. 7-3 zeigt die Auswertung der Schräglage für die bereits bekannten Kurvenkategorien aufgeteilt nach der persönlichen Risikobereitschaft als Säulendiagramm. Die Anzahl der ausgewerteten Kurven ist jeweils über den Säulen angegeben.

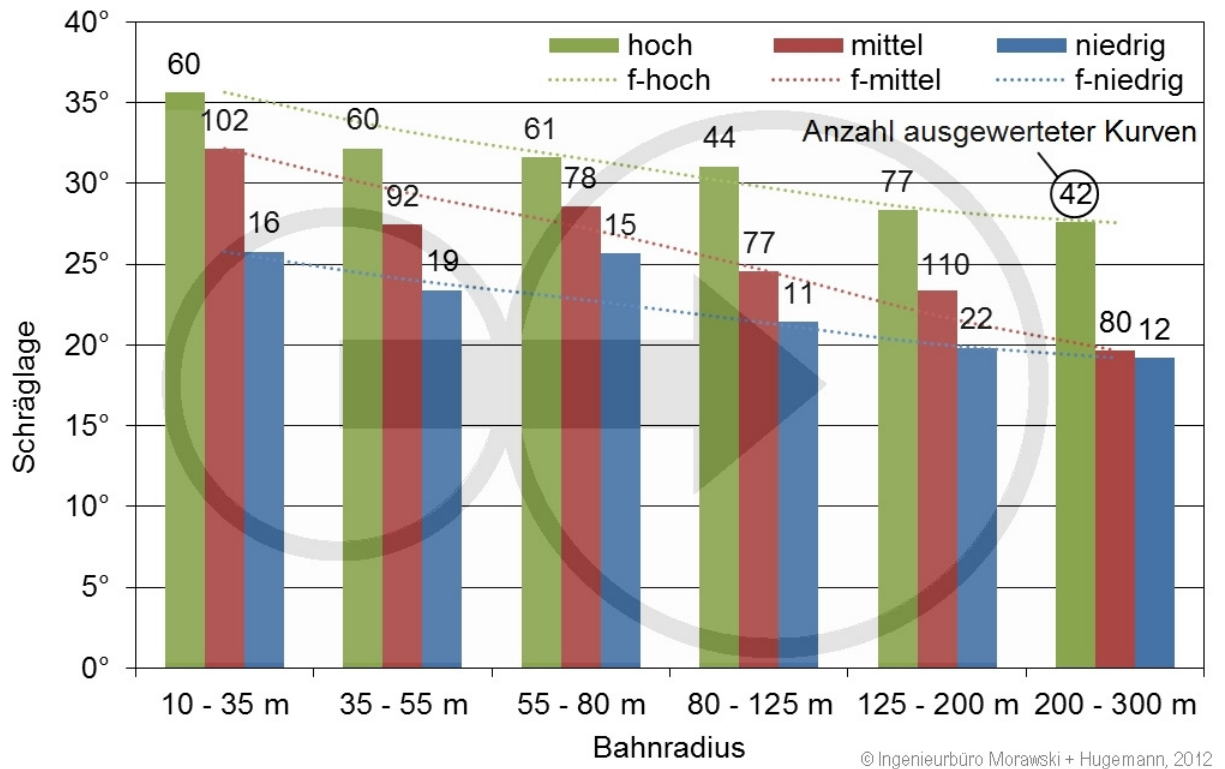


Abb. 7-3: Schräglage nach Risikobereitschaft in Kurvenkategorien

Vor allem die Gruppe der risikobereiten Fahrer setzt sich über alle Kurven deutlich von den übrigen Probanden ab. Die Differenz der Schräglagen beträgt je nach Größe des gefahrenen Bahnradius zwischen den risikoreichen und den sich im Durchschnitt befindlichen Fahrern zwischen 3° und 7,9°. Im Mittel beträgt der Unterschied 5,1°.

Vergleicht man die Gruppe mit den größten Schräglagenwinkeln mit den eher zurückhaltenden Motorradfahrern, so stellt man Unterschiede im Bereich 5,9 – 9,9° bei einem Mittelwert von 8,5° fest.

Zusätzlich zu der Auswertung der Schräglage enthält die Abb. 7-3 für alle drei Fahrergruppen eine Ausgleichsfunktion der folgenden Form, um die Schräglagedifferenzen hervorzuheben:

$$f(r) = \alpha_0 + (\alpha_{\max} - \alpha_0) \cdot e^{-r/r_0} \quad \text{Gl. 7-1}$$

In Gl. 7-1 markiert die Variable  $\alpha_{\max}$  den Schnittpunkt der Funktion mit der y-Achse, während  $\alpha_0$  für den Grenzwert steht, gegen den die Funktion für  $r \rightarrow \infty$  läuft. Die Variable  $r$  entspricht dem Mittelwert der jeweiligen Kategorie.

Die Ausgleichsfunktion wird gebildet, indem ihre freien Parameter  $\alpha_0$ ,  $\alpha_{\max}$ ,  $r_0$  so eingestellt werden, dass die Summe der absoluten Differenzen zwischen den Werten des Medians und der Funktion minimal wird:

$$\sum_{i=1}^6 |f(r_i) - \lambda_i| \doteq \text{Min!} \quad \text{Gl. 7-2}$$

In Excel kann diese Funktion mithilfe des Add-Ins „Solver“ gelöst und die Parameter automatisch angepasst werden. So ergeben sich Ausgleichsfunktionen mit optimalen Modellparametern für alle drei Risikogruppen.

### 7.3 Einfluss der Fahrerfahrung auf die Schräglage

Ein weiterer zu erwartender Einfluss auf die Schräglage der Fahrer ist ihre Fahrerfahrung. Zur Gewährleistung einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der in Abb. 5-5 dargestellten Fahrerfahrung in drei Gruppen, wurden folgende Grenzen ausgewählt:

- $a \leq 5$  Jahre
- $5 \text{ Jahre} < a \leq 10 \text{ Jahre}$
- $a > 10 \text{ Jahre}$

Die Abb. 7-4 zeigt die Auswertung der Schräglage nach der Fahrerfahrung in Jahren  $a$ .

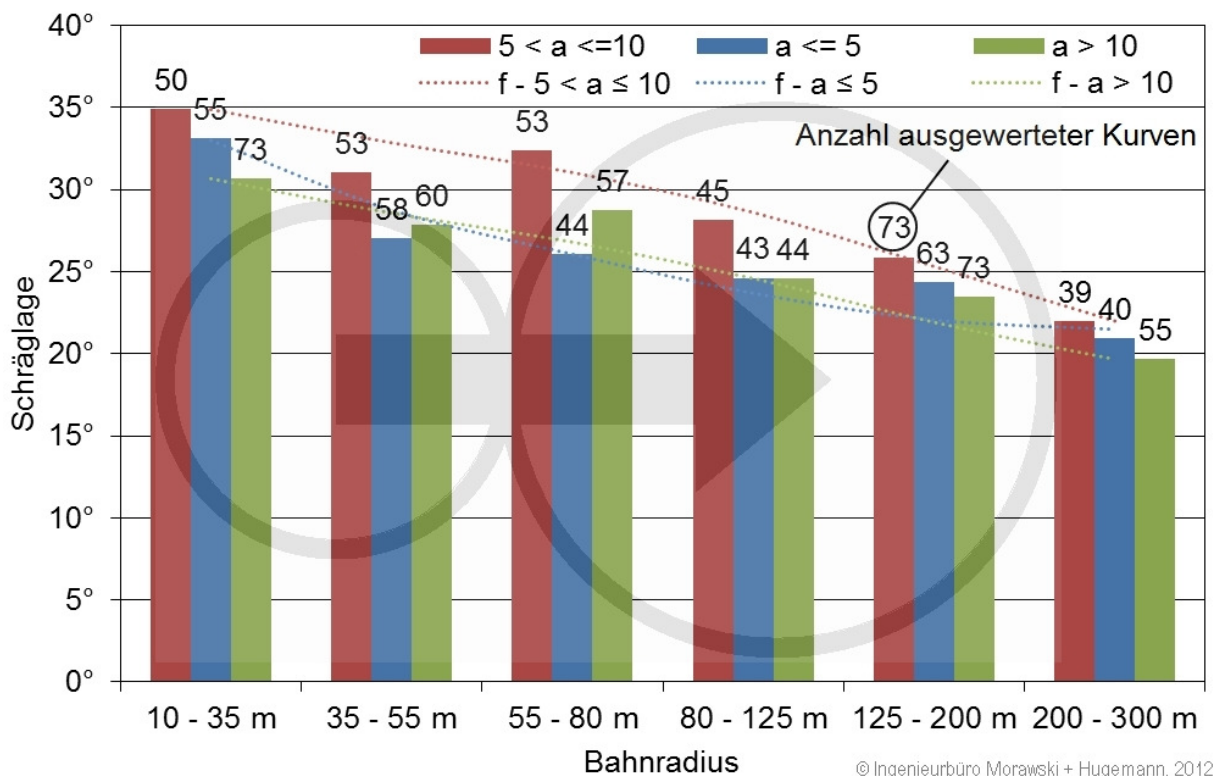


Abb. 7-4: Schräglage nach Fahrerfahrung in Kurvenkategorien

Die Anzahl der Kurvenfahrten liegt in den einzelnen Unterkategorien zwischen 39 und 73.

Zusätzlich zu den Säulen enthält die Abb. 7-4 die Ausgleichsfunktion nach Gl. 7-1, wie im vorangegangenen Kapitel 7.2 bereits beschrieben.

Der Verlauf der Schräglagen ist bei allen drei Gruppen ähnlich. Mit zunehmendem Kurvenradius nimmt die Schräglage der Fahrer deutlich ab. Über alle sechs Kurvenkategorien hinweg durchfahren die Fahrer mit einer Fahrerfahrung zwischen fünf und zehn Jahren die Kurven mit den größten Schräglagen. Der Unterschied zu den beiden anderen Gruppen beträgt im Mittel  $\Delta\lambda = 3,1^\circ$ .

Bei den Gruppen  $a \leq 5$  Jahre und  $a \geq 10$  Jahre gibt es keine klaren Tendenzen. Beide Gruppen liegen dicht beieinander, was durch die Visualisierung der Ausgleichsfunktionen deutlich hervorgehoben wird. Die beiden Graphen sind bei den drei mittleren Kurvenkategorien nahezu deckungsgleich. Lediglich zu den Rändern hin liegt die Schräglage der Gruppe mit der Fahrerfahrung  $a \leq 5$  Jahre ca.  $2^\circ$  über der Gruppe mit der größten Fahrerfahrung.

Es finden sich keine auswertbaren Zusammenhänge oder besondere Merkmale für die drei Kategorien der Fahrerfahrung. Dies kann zum einen an der geringen Anzahl an Datenpunkten für die einzelnen Kategorien liegen. Zum zweiten ist es möglich, dass vor allem der Bereich der Fahrerfahrung  $a \leq 5$  Jahre wesentlich feiner zu unterteilen ist. Dies ist aufgrund der geringen Anzahl Fahrer in dieser Kategorie nicht möglich, vgl. Abb. 5-5.

#### 7.4 Einfluss der Fahrzeugklasse auf die Schräglage

Die 29 Probanden nehmen an der Versuchsreihe mit ihren eigenen Motorrädern teil. Demnach gibt es eine breite Bandbreite an verschiedenen Motorrädern, die sich kategorisieren lassen. Die Kategorien lehnen sich an die von [ECK10a] vorgestellten Fahrzeugklassen.

Insgesamt finden sich unter den Probanden neun Fahrer, die mit einer Sportler oder Supersportler (Kategorie: Sport) an den Tests teilnehmen. Die weitaus größte Zahl von zwölf Fahrern nehmen mit einem Straßenmotorrad an dem Versuch teil. Die Enduros bilden mit sechs Kandidaten die zweitschwächste Gruppe. Zwei Fahrer werden in einer separaten Gruppe analysiert, da sie ein Motorrad aus den frühen 80er Jahren fahren und es bis heute große Entwicklungen in der Technik gegeben hat, die bei modernen Motorrädern wesentlich höhere Schräglagen ermöglichen.

Die Auswertung wird analog zu den vorherigen Kapiteln durchgeführt, sodass die Kurven in die bereits bekannten Kategorien unterteilt werden. Bei den Sportlern finden sich so im Schnitt 51 auszuwertende Kurven in jeder Kategorie. Bei den Fahrern der Kategorie Straßenmotorrad liegt die Zahl der Kurven pro Kategorie mit 69 Kurven im Mittel deutlich höher. Da die Kurvenzahl in direktem Zusammenhang mit der Anzahl der Fahrer pro Kategorie steht, liegen die Enduros mit einem Mittelwert von 33 und die Fahrer mit den Motorrädern aus den 80er Jahren mit 11 Kurven pro Kurvenkategorie deutlich unter den ersten beiden Gruppen.

Abb. 7-5 zeigt die Auswertung der Schräglage nach den vier Fahrzeugklassen. Die Zahlen über den Säulen geben erneut die Anzahl der ausgewerteten Kurven an.

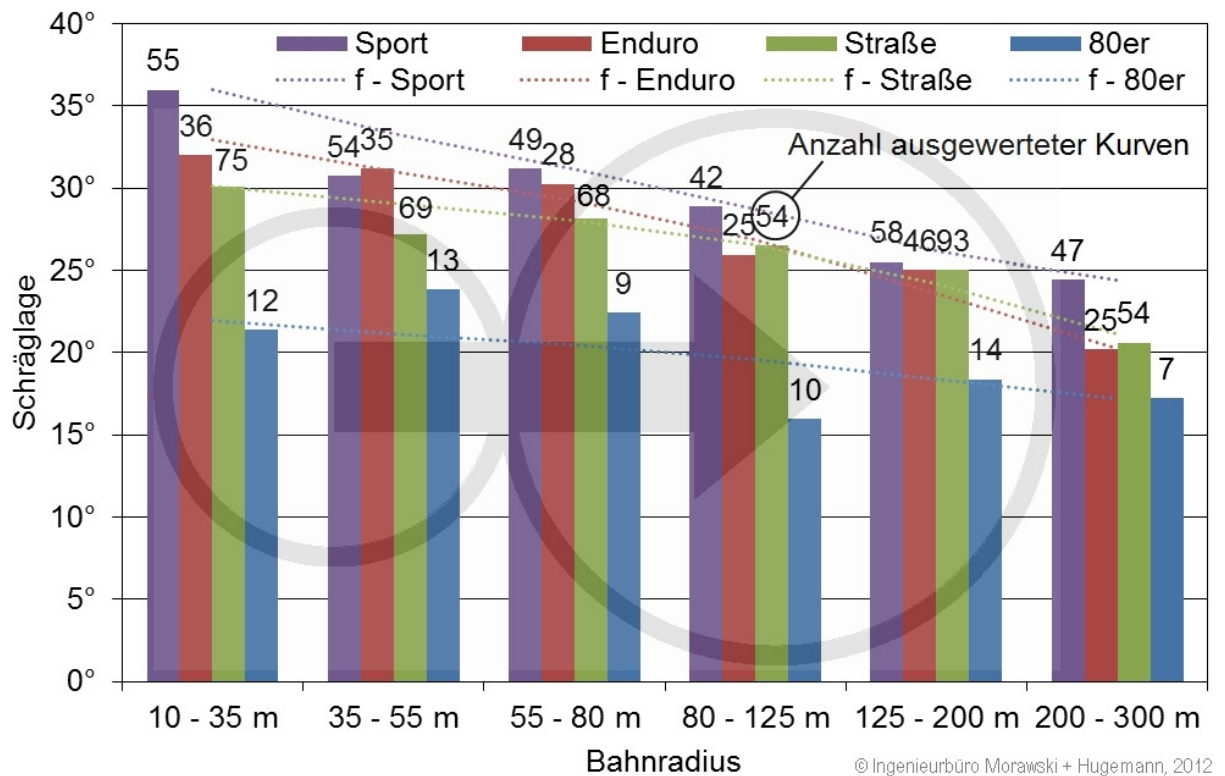


Abb. 7-5: Schräglage nach Fahrzeugklasse in Kurvenkategorien

Zur besseren Visualisierung werden analog zu den vorangegangenen Abbildungen neben den Säulen die Funktionsgraphen der Ausgleichsfunktionen nach Gl. 7-1 in Abb. 7-5 gezeigt.

Für alle vier Gruppen ergibt sich der typisch abfallende Verlauf der Schräglage mit zunehmendem Bahnradius. Die Sportmotorräder liegen dabei tendenziell mit  $\Delta\lambda = 3,2^\circ$  über den Schräglagen der Straßenmotorräder und der Enduros. Die Schräglagen dieser beiden Klassen verlaufen bei größeren Kurvenradien nahezu deckungsgleich. Im Bereich  $R \leq 55$  m liegt die Ausgleichsfunktion für die Enduros über der Ausgleichsfunktion für die Street-Maschinen. Die Motorräder aus den 80er Jahren durchfahren die Kurven unter wesentlich geringerem Schräglagenwinkel als alle modernen Fahrzeuge. Im Mittel beträgt die Differenz zwischen den Straßenmotorrädern und den über 30 Jahre alten Modellen  $\Delta\lambda = 6,4^\circ$ .

Betrachtet man die Säulen etwas detaillierter, so stellt man fest, dass sich zwischen den Enduros und den Straßenmaschinen keine klaren Tendenzen abzeichnen. Beide Kategorien liegen zwar über alle Kurvenkategorien nahe beieinander, und die Enduros erreichen bei den ersten drei Kurvenkategorien die leicht höheren Schräglagen. In den größeren drei Kurvenkategorien jedoch liegen die Straßenmotorräder über den Enduros.

Die Kategorie Chopper ist bei den Tests nicht vertreten.

### 7.5 Abhängigkeit von zwei ausgewählten Merkmalen

In den vergangenen drei Unterkapiteln 7.2 bis 7.4 werden verschiedene mögliche Einflüsse auf die Schräglage untersucht und vorgestellt. Das Problem bei der Kategorisierung der Fahrer und der Analyse der gebildeten Gruppen liegt in der Anzahl der Datenpunkte in den einzelnen Kategorien. Für die Untersuchung einzelner Parameter (persönliche Risikobereitschaft, Fahrerfahrung oder Fahrzeugklasse) reichen die ausgewerteten Kurven zum Teil noch aus. Will man jedoch die Abhängigkeit von zwei ausgewählten Merkmalen untersuchen, so sind die Ergebnisse nicht mehr aussagekräftig, da die Datengrundlage zu gering wird.

Abb. 7-6 zeigt beispielhaft die Unterteilung der Fahrer nach ihrer persönlichen Risikoeinschätzung und ihrem Fahrzeug. Auf der x-Achse ist das Risiko aufgetragen. Die vier Säulen pro Risikogruppe stellen die Fahrzeugklassen dar. Die y-Achse gibt die absolute Anzahl an Fahrern an, die in den einzelnen Gruppen vorhanden sind.

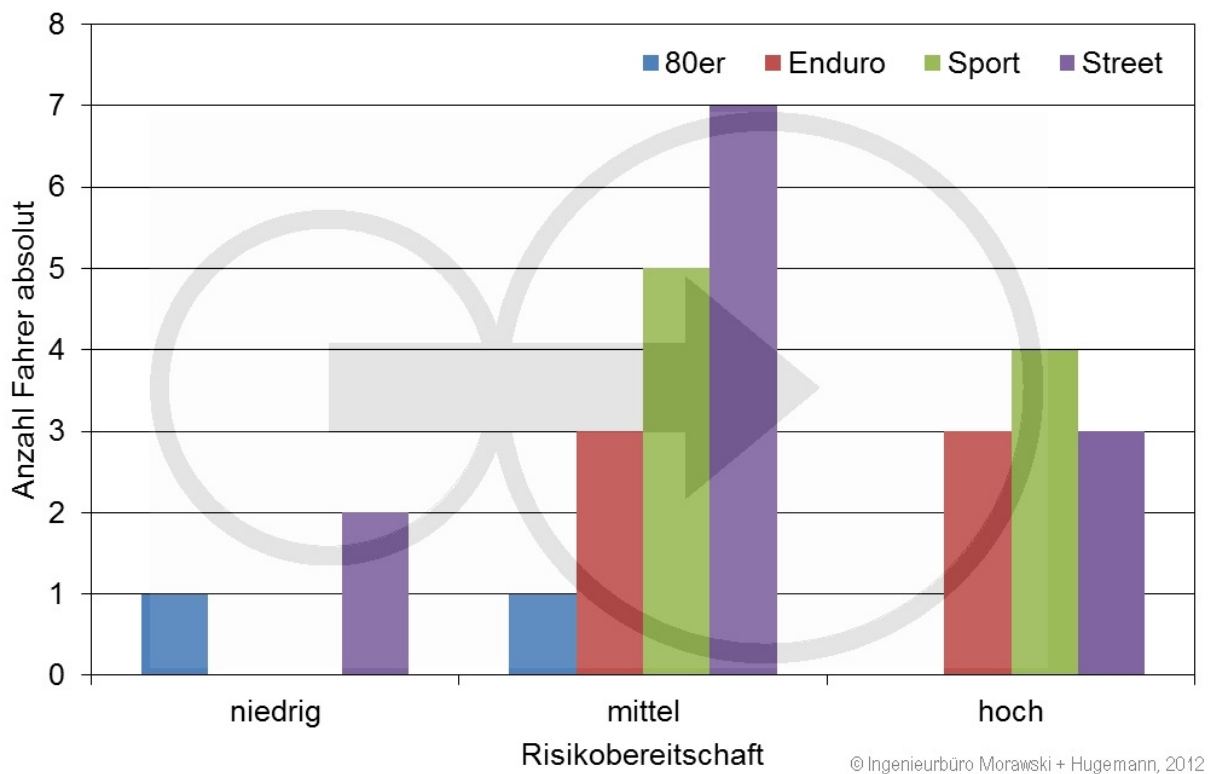


Abb. 7-6: Verteilung der Probanden bei der Abhängigkeit von zwei ausgewählten Merkmalen

Bei der Betrachtung von Abb. 7-6 wird deutlich, dass eine Untersuchung der Abhängigkeit zweier Merkmale sinnvoll ist, wenn die Anzahl der untersuchten Fahrer deutlich größer ist. Im vorliegenden Fall verteilen sich die 29 Probanden auf insgesamt 12 Gruppen, so dass einige Gruppen entweder nicht oder nur mit ein bzw. zwei Fahrern vertreten sind. Diese Ergebnisse lassen sich daher nicht verallgemeinern.

## 7.6 Bewertung der Ergebnisse

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Ergebnisse unterscheiden sich deutlich von dem Befund aus der Literatur. So wird in [DAN81] die Schräglage in Abhängigkeit der Fahrerfahrung des Fahrers kategorisiert. Eine Unterteilung der Schräglagenwerte nach der Größe des Bahnradius wird dabei nicht vorgenommen.

Die in Kapitel 7.1 gewonnenen Erkenntnisse lassen sich durchaus verallgemeinern. Die Anzahl der ausgewerteten Kurven liegt mit einer Anzahl von 132 bis 209 Kurven pro Kurvenkategorie in einem repräsentativen Bereich.

Lediglich bei der letzten Kurvenkategorie mit einem Bahnradius 200 – 300 m ergibt sich bei einer überschlagsmäßigen Rückwärtsrechnung unter Vernachlässigung der Reifenbreite für einen mittleren Bahnradius von  $R = 250$  m und dem Median  $\lambda = 20,8^\circ$  eine Geschwindigkeit von ca.  $v = 110$  km/h. Mit dieser Geschwindigkeit überschreiten die Probanden die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Landstraße um  $\Delta v = 10$  km/h. Es stellt sich die Frage, ob die Probanden bei den Versuchsfahrten vorschriftsmäßiger gefahren sind und es so eventuell zu geringen Schräglagenwerten im besagten Bereich des Bahnradius gekommen ist.

Die Ergebnisse betreffend der Einflüsse von persönlicher Risikobereitschaft, Fahrerfahrung und Fahrzeugklasse auf die Schräglage sind eine erste Empfehlung. Hier sind weitere gezielte Untersuchungen der einzelnen Kriterien mit einer größeren Probandenzahl notwendig. Gleiches gilt in einem weiteren Schritt für die Kombination zweier Merkmale. Die aufgenommene Zahl von 29 Fahrern erlaubt kein für die Gesellschaft repräsentatives Ergebnis, wenn eine Aufteilung in Gruppen vorgenommen wird. Es wird daher empfohlen, in zukünftigen Arbeiten bestimmte Merkmale gezielt zu untersuchen. Dies kann sowohl die Fahrerfahrung als auch die Fahrzeugklasse etc. sein. Gleiches gilt für die Kombination zweier Parameter.

Für die Untersuchungen haben sich keine Chopper gefunden. Chopper erreichen in der Regel geringere Schräglagen als Motorräder der vorgestellten Kategorien Straße, Sport und Enduro. Dies beruht auf der zum Teil sehr breiten Bereifung, dem niedrigen Schwerpunkt und der oft auch ruhigen Fahrweise. Eine weitere Untersuchungsreihe von Choppern sollte daher das Ziel für zukünftige Arbeiten sein.

Das schräge Wiegen während der Versuche wurde mit einem geringen Winkel durchgeführt. Die Folge waren Schwankungen in der errechneten Schwerpunkthöhe. Bei einer Weiterführung der Versuche wird empfohlen, die Höhendifferenz zwischen den beiden Radaufstandspunkten deutlich größer zu wählen.



## 8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Schräglage von Motorrädern bei der Kurvenfahrt auf der Landstraße untersucht. Auf der Landstraße finden die meisten tödlichen Unfälle von Motorradfahrern statt. Zu Beginn wurde die Relevanz dieses Unfalltyps mit aktuellen Unfallzahlen und einem Beispielunfall erläutert. So sind es häufig die sich an eine Kurve anschließenden Einmündungen, an denen Motorradfahrer übersehen werden und es zur Kollision kommt.

Für den Sachverständigen stellt sich bei diesen Motorradunfällen auf der Landstraße oft die Frage nach der Geschwindigkeit des Motorrads in der Kurve. Da diese nicht aus den Unfallspuren ermittelt werden kann, greift der Sachverständige in der Regel auf Erfahrungswerte aus der Literatur zurück. Die zu diesem Thema erhältlichen Befunde aus der Literatur sind bereits aus den 80er Jahren. Erschwerend hinzu kommt, dass die Entstehung der Daten nicht dokumentiert wurde. Aus diesem Grund wurden neue Erfahrungswerte ermittelt.

Im nächsten Arbeitsschritt wurde die Kurvenfahrt näher erläutert und in ihren Bestandteilen analysiert. Aufgrund der Komplexität der Kurvenfahrt wurde diese in mehrere Phasen aufgeteilt und für den statischen Gleichgewichtszustand eine Kräftebilanz durchgeführt. Durch die Reduktion der Einheit Fahrer und Maschine in ein lineares Einspurmodell gelang es, eine erste mathematische Beschreibung der Schräglage herzuleiten.

Anschließend konnte gezeigt werden, dass die Breite des Reifens einen Einfluss auf die Schräglage hat. So ergaben sich mit dem linearen Einspurmodell grundsätzlich zu geringe Schräglagen bei der Berechnung. Die Schräglage aus dem Einfluss der Reifenbreite ist demnach zu der Schräglage aus dem linearen Einspurmodell hinzuzuaddieren.

Die Kurvenfahrt eines Motorradfahrers ist selten stationär. In der Regel werden von dem Fahrer ständig Korrekturen vorgenommen, um das Gleichgewicht zu halten oder den Bahnradius zu verändern. Diese Korrekturen sowie die drei unterschiedlichen Fahrtechniken wurden in einem nächsten Schritt erläutert. Die unterschiedlichen Sitzhaltungen auf dem Motorrad bewirken so eine deutliche Verschiebung des gemeinsamen Schwerpunktes von Fahrer und Motorrad aus der Fahrzeuglängsebene. Dies musste bei der Interpretation der GPS-Daten berücksichtigt werden.

Die Messdaten der Versuche wurden mithilfe von GPS-Loggern aufgenommen. Neben den GPS-Loggern wurde außerdem eine Helmkamera GoPro Hero für die Versuche verwendet.

Für die Fahrversuche wurde eine ca. 23 km lange Versuchsstrecke ausgewählt, die sowohl enge Kurven als auch Kurven mit großen Radien beinhaltet. Außerdem waren die Kurvenradien vorab gut auf dem Luftbild auszuwerten. Alle Probanden sind unter Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr die Versuchsstrecke abgefahren. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Fahrer die Strecke nach Möglichkeit nicht kannten und vor allem vorab nicht üben konnten. Die Probanden wurden zufällig ausgewählt, so dass sich eine gute Verteilung beim Alter der Fahrer, aber auch in ihrer Fahrerfahrung und den Maschinen ergibt.

Vor dem eigentlichen Fahrversuch mussten die fahrer- und fahrzeugspezifischen Daten erhoben werden. Zu diesem Zweck wurde ein Fragebogen entwickelt, bei dem die Fahrer unter anderem ihre persönliche Risikobereitschaft einschätzen mussten.

Für die Berechnung der Schwerpunktlage war die genaue Achslastverteilung elementar wichtig. Der entwickelte Versuchsaufbau ermöglichte es, die Motorräder samt Fahrer sowohl in der Ebene als auch mit einem Höhenunterschied zwischen dem vorderen und hinteren Radaufstandspunkt zu wiegen.

Neben der Schwerpunktlage wurde der Radius des Reifenquerschnitts ermittelt. Beide Größen fließen unmittelbar als Variablen in die Berechnung des Einflusses der Reifenbreite auf die Schräglage ein.

Die gemessenen und berechneten Größen sind zum Teil mit Fehlern behaftet. Die Auswirkung der maximalen Fehler auf die Schwerpunkthöhe und in einem weiteren Schritt auf die Schräglage wurde in Kapitel 8 analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass die berechnete Schwerpunkthöhe aufgrund des geringen Winkels beim schrägen Wiegen selbst für baugleiche Motorräder stark schwankt. Da der Schräglagenanteil aus dem Einfluss der Reifenbreite an der Gesamtschräglage lediglich 13 % beträgt, bedeutet ein Fehler von 10 % in der Schwerpunkthöhe und ein zusätzlicher Fehler bei der Bestimmung des Querschnittsradius einen maximalen Gesamtfehler in der Schräglage von ca. 2 %.

Im Anschluss an die Fehlerbetrachtung wurde die Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung vorgestellt. Die Berechnung des Bahnradius und der Schräglage erfolgte in einem weiteren Schritt in einem Signalverarbeitungsprogramm.

In einer zusätzlichen Versuchsreihe wurde ein Motorradfahrer bei der Kurvendurchfahrt im Scheitelpunkt der Kurve frontal von vorne vom Straßenrand gefilmt. In der anschließenden Videoauswertung war es möglich, die Schräglage des Fahrers gegenüber der Fahrbahn und gegenüber der horizontalen zu ermitteln. Das Ergebnis wurde anschließend mit demjenigen aus der Auswertung der GPS-Daten verglichen. Es zeigte sich für alle Versuchsfahrten ein maximaler Fehler kleiner drei Prozent. Dies ließ die Schlussfolgerung zu, dass die Auswertung der GPS-Daten ein gutes Ergebnis für die Bestimmung der Schräglage liefert.

Zuletzt wurden die Ergebnisse der Auswertung vorgestellt. Im ersten Teil der Ergebnisvorstellung wurde die Schräglage über alle Fahrer dargestellt. Dabei wurden die durchfahrenen Kurven mit einem Bahnradius zwischen 10 und 300 m in sechs Kategorien unterteilt. Es konnte festgehalten werden, dass mit zunehmendem Bahnradius die Schräglage abnimmt. Im Mittel durchfuhren die Probanden die Kurven mit Schräglagen zwischen 32,5° in den engsten Kurven bis hin zu 20,9° bei einem Bahnradius zwischen 200 und 300 m.

Fahrer mit einer geringen Risikobereitschaft erreichten in allen Kurvenkategorien deutlich geringere Schräglagen als Fahrer mit einer durchschnittlichen oder hohen Risikobereitschaft. Auch zwischen den beiden letztgenannten Gruppen zeichneten sich deutliche Differenzen

ab. Dieses Fahrermerkmal ist allerdings für den Sachverständigen bei der Rekonstruktion eines Unfalls schwer einzugrenzen.

Ein weiteres untersuchtes Merkmal war die Fahrerfahrung der Fahrer als Einfluss auf die Schräglage. Für die gewählten drei Altersgruppen zeichneten sich keine großen Unterschiede in der Schräglage ab. Der Motorradtyp hingegen stellte sich als ein möglicher Einflussfaktor auf die Schräglage dar. Fahrer mit einer Sportler oder Supersportler erreichten die stärksten Schräglagen. Die Gruppen Enduro und Straßenmotorrad lagen sehr nah beieinander, jedoch im Mittel  $3,5^\circ$  unter den Sportlern und Supersportlern. Deutlich kleinere Schräglagen erzielten die Motorräder aus den 80er Jahren. Die durchschnittliche Differenz zur Kategorie Straßenmotorrad lag über alle sechs Kurvenkategorien bei rund  $6,0^\circ$ .

**9 Formelzeichen und Indizes**

|            |                                                                       |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $a_q$      | Querbeschleunigung                                                    |
| $c$        | Lichtgeschwindigkeit                                                  |
| $F_a$      | Flieh- / Zentrifugalkraft                                             |
| $F_g$      | Gewichtskraft                                                         |
| $F_{v,h}$  | Gewichtskraft am Vorderrad beim horizontalen Wiegen                   |
| $F_{h,h}$  | Gewichtskraft am Hinterrad beim horizontalen Wiegen                   |
| $F_{v,s}$  | Gewichtskraft am Vorderrad beim schrägen Wiegen                       |
| $F_{h,s}$  | Gewichtskraft am Hinterrad beim schrägen Wiegen                       |
| $F_{s,v}$  | Seitenkraft am Vorderrad                                              |
| $F_{s,h}$  | Seitenkraft am Hinterrad                                              |
| $g$        | Erdbeschleunigung                                                     |
| $h_{SP}$   | Schwerpunkthöhe                                                       |
| $\Delta h$ | Stufenhöhe                                                            |
| $l$        | Radstand                                                              |
| $l_v$      | horizontaler Abstand des Schwerpunktes zum vorderen Radaufstandspunkt |
| $l_h$      | horizontaler Abstand des Schwerpunktes zum hinteren Radaufstandspunkt |
| $m_F$      | Masse des Fahrers                                                     |
| $m_g$      | Gesamtmasse                                                           |
| $M_{i,s}$  | Drehmoment um den Punkt S                                             |
| $p$        | Pseudoentfernung                                                      |
| $R$        | Bahnradius                                                            |
| $r_v$      | Radius des Vorderrades                                                |
| $r_h$      | Radius des Hinterrades                                                |
| $R_r$      | Radius des Reifenquerschnitts                                         |



|             |                                                     |
|-------------|-----------------------------------------------------|
| $SP$        | Schwerpunkt                                         |
| $SP_F$      | Schwerpunkt des Fahrers                             |
| $SP_M$      | Schwerpunkt des Motorrades                          |
| $SP_g$      | Gesamtschwerpunkt                                   |
| $T$         | Laufzeit                                            |
| $v$         | Geschwindigkeit                                     |
| $v_{Str}$   | Geschwindigkeit in km/h                             |
| $v_{See}$   | Geschwindigkeit in Knoten                           |
|             |                                                     |
| $\delta$    | Lenkwinkel                                          |
| $\lambda$   | Gesamtschräglage                                    |
| $\lambda_e$ | Schräglage aus dem linearen Einspurmodell           |
| $\lambda'$  | Schräglagenanteil aus dem Einfluss der Reifenbreite |
| $\theta$    | Winkel des Motorrades beim schrägen Wiegen          |



## 10 Literatur

- [ADA09] ADAC – RESSORT VERKEHR  
Verkehrs- und Unfallstatistiken  
ADAC, München, 2009
- [BÖD02] BÖDER, V.  
Zur hochpräzisen GPS-Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen  
Dissertation, Universität Hannover, 2002
- [BRO99] BRONSTEIN, I.N.; SEMENDJAJEW, K.A.; MUSIOL, G.; MÜHLING, G.  
Taschenbuch der Mathematik  
Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1999
- [CHA07] CHALKO, T. J.  
High accuracy speed measurement using GPS (Global Positioning System)  
[nujournal.net/HighAccuracySpeed.pdf](http://nujournal.net/HighAccuracySpeed.pdf)  
Mt. Best, Australian, 2007
- [COC05] COCCO, G.  
Motorrad – Technik pur  
Funktion – Konstruktion – Fahrwerk  
Motorbuch Verlag, Stuttgart, 2005
- [COS06] COSSALTER, V.  
Motorcycle Dynamics  
2. englische Ausgabe, 2006
- [DAN81] DANNER, M., Prof. Dr.; HALM, J., Dipl.-Ing.  
Technische Analyse von Straßenverkehrsunfällen  
Kraftfahrzeugtechnischer Verlag, München, 1981
- [DES11] STATISTISCHES BUNDESAMT, WIESBADEN  
Verkehrsunfälle  
Zweiradunfälle im Straßenverkehr  
Wiesbaden, 2011
- [ECK10a] ECKSTEIN, L., Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Krafträder  
Antriebstechnik, Fahrwerkstechnik, Fahrverhalten, Sicherheit  
fka – Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, Aachen, 2010





- [ECK10b] ECHSTEIN, L., Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Fahrzeugtechnik III  
Aktive Fahrzeugsicherheit und Fahrerassistenz  
fka – Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, Aachen, 2010
- [GLÜ10] GLÜCK, R.; KOCH, W.  
Handlingtest: Konzeptvergleich  
In: PS – Das Sport-Motorrad Magazin, 08/2010, S. 19ff
- [HOC95] HOCHMUTH, O.; LEPSCHIES, G.; MEFFERT, B.  
Glättung und Differentiation mit nur einem Operator  
In: Biomedizinische Technik, Band 40, Heft 11/1995, S. 333 – 336
- [HUG07] HUGEMANN, W.  
Sonnenstand und Dämmerungshelligkeit  
in: Hugemann (Hrsg.) Unfallrekonstruktion  
Verlag autorenteam, Münster, 2007
- [IFZ10] IFZ, KOCH, W., KUTSCHERA, L.  
Motorrad fahren – Gut und sicher  
ifz – Institut für Zweiradsicherheit e.V., Essen, 2010
- [KAH06] KAHMEN, H.  
Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde  
De Gruyter, Berlin, 2006
- [KOW09] KÖHNE, A.; WÖBNER, M.  
[www.kowoma.de/gps](http://www.kowoma.de/gps)  
Schweiz, Riehen, 2009
- [KRA12] KRAFTFAHRT BUNDESAMT  
Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2012 gegenüber 1. Januar 2011  
Flensburg, 2012
- [LAN07] LANGE, F.  
Der Motorradunfall  
in: Hugemann (Hrsg.) Unfallrekonstruktion  
Verlag autorenteam, Münster, 2007
- [PNT12] National Executive Committee for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing (PNT) (a U.S. Government organization),  
<http://www.gps.gov/systems/gps/>  
Washington, D.C, USA, 2012



- [ROB92] ROBINSON, J.  
Fahrwerkstuning für Motorräder  
Motorbuch Verlag, Stuttgart, 1992
- [SAV64] SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E.  
Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures  
In: Anal. Chem. 36, 1964, S. 1627 – 1639
- [VAR12] VARIOTEK  
Bildpaket BT-Q1000ex 10Hz  
<http://variotek.de/?p=389>  
Düsseldorf, 2012
- [ZOG06] ZOGG, J.-M.  
Grundlagen der Satellitenavigation  
Schweiz, Zürich, 2006

