

# Oberflächenbeurteilung von Radverkehrsanlagen mittels GPS und Beschleunigungssensoren

**Verfasser:**

Uwe Kothgasser

Masterarbeit für das Fachgebiet  
VERKEHRSWESEN

**Betreuung:**

Gerd Sammer

o. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.

Michael Meschik

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn.



  
Institut für Verkehrswesen  
Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur  
Universität für Bodenkultur Wien

## Danksagung

Besonderen Dank möchte ich an dieser Stelle meinen geduldsamen Betreuern aussprechen die mich bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt und betreut haben.

Herr Gerd Sammer o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. stellvertretend für das Verkehrsinstitut an der Universität für Bodenkultur Wien.

Herrn Michael Meschik Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. stellvertretend für die persönliche und oft spontane Betreuung am Verkehrsinstitut an der Universität für Bodenkultur Wien.

Herrn Reinhard Hössinger, Mag. Dr. stellvertretend für die Betreuung bei statistischen Fragestellungen am Verkehrsinstitut an der Universität für Bodenkultur Wien.

Herrn Renne Wally stellvertretend für die Betreuung bei technischen Fragen bezüglich der Messgeräte und der dazugehörigen Software.

Auch dem gesamten Team des Sekretariats sei für die tatkräftige Unterstützung bei formellen Fragen herzlich gedankt.

Besonderer Dank gilt meiner noch viel geduldigeren Familie für die Unterstützung während meiner langjährigen Studienzeit.

## **Kurzfassung**

Bei der Erfassung von Wegedaten im Radverkehr stellt sich auch die Frage bezüglich der Qualität und Befahrbarkeit unterschiedlicher Oberflächen. Die qualitative Beurteilung unterschiedlicher Oberflächen ist die grundsätzliche Aufgabe der vorliegenden Arbeit um ein möglichst rasches, einfaches sowie kostengünstiges Verfahren zur qualitativen Beschreibung unterschiedlichster Radverkehrsanlagen zur Verfügung zu stellen.

Der einführende Abschnitt behandelt den praktischen Versuchsaufbau sowie den Versuchsablauf. Die Wahl der Fahrräder und die gewählte Route werden hier ebenso aufgezeigt, wie die Wichtigkeit eines Wegetagebuches. Weiters beinhaltet der einführende Abschnitt den Vergleich charakteristischer Messwerte unterschiedlicher Oberflächen. Die Daten der Messung werden sowohl als Zahlenwerte als auch graphisch in Diagrammen dargestellt. Bei den für diese Aufgabe verwendeten Messgeräten, handelt es sich um eine Kombination aus GPS und Beschleunigungssensor. Mit diesen Geräten ist es möglich, Wege und Beschleunigungsdaten während einer Messfahrt zu speichern.

Im weiterführenden Abschnitt werden die erhobenen und aufbereiteten Messdaten in ein Statistikprogramm eingelesen. Ziel ist es, mit dem statistischen Verfahren der Multinomialen logistischen Regression jene Einflussfaktoren und Kombinationen der Einflussfaktoren zu finden, welche die Qualität der Oberfläche und somit auch der Befahrbarkeit am besten beschreiben. Abschließend werden die Ergebnisse der Grundlagenforschung diskutiert. Da es sich bei der Aufgabenstellung um ein völlig neues Verfahren handelt, dienen sowohl die Ergebnisse als auch verfehlte oder nicht erreichte Ergebnisse als Optimierungsvorschläge für weiterführende Projekte.

## **Abstract**

On gathering data of bicycle tracks one has to ask for the quality and rideability of different surfaces. The basic task of this thesis is to judge the quality of different surfaces to make a procedure available which is as quick, simple and cost-saving as possible, in order to describe various bicycle facilities.

The introductory section deals with the practical organization of the experiment and its process. The choice of bicycles and the routes chosen are mentioned there as well as the importance of a diary recording the distances covered. Furthermore, this section deals with the comparison of characteristic test data of different surfaces. These data are shown in numbers as well as in diagrams.

The measuring tools which are used for this task are GPSs combined with accelerometers. With these devices ways and acceleration data during a ride can be stored.

In the following section the gathered and processed data are read in a statistics programme. It is the intention to find those factors of influence and combination of influences with the help of the statistics procedure of the multinomial logistic regression, which best describe both the quality of surface and of the rideability.

Finally the findings of the basic research are discussed. As this task deals with an entirely new procedure, the findings as well as unsuccessful or not achieved findings serve as proposals to optimize further projects.

## INHALT

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	Zielsetzung.....	1
1.2	Vorgehensweise .....	1
<b>2</b>	<b>MESSGERÄT .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>DATENERHEBUNG BEI EINER NACH UNTEN GERICHTETEN BEWEGUNG .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1</b>	<b>Theorie des freien Falls.....</b>	<b>3</b>
3.1.1	Rechenbeispiel für den freien Fall in der Atmosphäre .....	4
3.1.2	Endgeschwindigkeit.....	4
3.1.3	Fallweg .....	5
3.1.4	Geschwindigkeit und Beschleunigung .....	6
<b>3.2</b>	<b>Messgerät im freien Fall .....</b>	<b>6</b>
3.2.1	Aufbau und Ablauf des Versuches .....	7
3.2.2	Versuchsauswertung.....	8
3.2.3	Diskussion der ersten Versuchsergebnisse.....	12
<b>4</b>	<b>DATENERHEBUNG BEI EINER NACH OBEN GERICHTETEN BEWEGUNG .....</b>	<b>13</b>
<b>4.1</b>	<b>Aufbau und Ablauf des Versuches .....</b>	<b>13</b>
<b>4.2</b>	<b>Auswertung und Darstellung der Beschleunigungsdaten .....</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>DER GPS SENSOR.....</b>	<b>16</b>
<b>5.1</b>	<b>GPS (Global Positioning System).....</b>	<b>16</b>
<b>5.2</b>	<b>Nutzen der GPS Funktionen .....</b>	<b>17</b>
<b>5.3</b>	<b>Verfahren der Lagebestimmung von MobiTest GSL .....</b>	<b>19</b>

5.4	Fehler der Standalone – Navigation.....	19
5.5	Erreichbare Genauigkeiten .....	22
6	ZUSAMMENFASSUNG DER VORUNTERSUCHUNG .....	22
7	OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT UND VERTIKALBESCHLEUNIGUNG .....	22
8	DATENERHEBUNG .....	23
8.1	Vorarbeiten der Messfahrten .....	23
8.1.1	Routenwahl.....	23
8.1.2	Verwendete Fahrräder .....	26
8.1.3	Wahl der Geschwindigkeit.....	28
8.1.4	Anordnung der Messgeräte.....	28
8.2	Messfahrten .....	29
9	DARSTELLUNGSFORMEN DER MESSWERTE.....	31
9.1	Darstellungsformen der Mobitest Software.....	31
9.2	Darstellungsform als MTD und MTA Dateien .....	34
10	AUFBEREITEN DER ROHDATEN.....	36
10.1	"Null" Fehler.....	37
10.2	Ruhefehler.....	38
10.3	Auslesefehler.....	38
11	AUFBEREITETE DATENSÄTZE .....	38
11.1	T -Test.....	39
11.2	Befahrungskombinationen .....	41
12	MITTELWERT.....	42

<b>12.1</b>	<b>Gleitender Mittelwert.....</b>	<b>42</b>
<b>12.2</b>	<b>Darstellung des gleitenden Mittelwertes.....</b>	<b>43</b>
<b>12.3</b>	<b>Erkenntnisse mit Hilfe des gleitenden Mittelwertes .....</b>	<b>44</b>
<b>13</b>	<b>MULTINOMIALE LOGISTISCHE REGRESSION.....</b>	<b>45</b>
<b>13.1</b>	<b>Oberflächenbeurteilung mit Hilfe der multiplen logistischen Regression.....</b>	<b>45</b>
13.1.1	Erklärende Variablen.....	46
13.1.2	Stetige Variable.....	49
<b>14</b>	<b>MULTINOMIALES MODELL .....</b>	<b>50</b>
<b>14.1</b>	<b>Zeitfenster des Modells .....</b>	<b>52</b>
<b>14.2</b>	<b>Gewichtung der Oberflächengüteklassen .....</b>	<b>54</b>
<b>15</b>	<b>MODELLERGEBNISSE .....</b>	<b>56</b>
<b>15.1</b>	<b>Ergebnisse der Modellvarianten I und II (5 Sekunden Zeitfenster) .....</b>	<b>56</b>
	Ergebnis der Modellvariante I (Zeitfenster 5 Sekunden) .....	57
15.1.1	Ergebnis der Modellvariante II (Zeitfenster 5 Sekunden).....	60
<b>15.2</b>	<b>Ergebnisse der Modellvarianten I und II (10 Sekunden Zeitfenster) .....</b>	<b>62</b>
<b>16</b>	<b>VERBESSERTES MODELL.....</b>	<b>64</b>
<b>16.1</b>	<b>Ergebnisse der verbesserten Modellvarianten I und II (5 Sekunden Zeitfenster) .....</b>	<b>65</b>
16.1.1	Ergebnis der verbesserten Modellvariante I (Zeitfenster 5 Sekunden).....	65
16.1.2	Ergebnis der verbesserten Modellvariante II (Zeitfenster 5 Sekunden).....	66
<b>16.2</b>	<b>Ergebnisse der verbesserten Modellvarianten I und II (10 Sekunden Zeitfenster).....</b>	<b>67</b>
16.2.1	Ergebnis der verbesserten Modellvariante I (Zeitfenster 10 Sekunden).....	67
16.2.2	Ergebnis der verbesserten Modellvariante II (Zeitfenster 10 Sekunden).....	68
<b>17</b>	<b>MODELLANWENDUNG.....</b>	<b>69</b>
<b>17.1</b>	<b>Allgemein: .....</b>	<b>69</b>

<b>17.2</b>	<b>Die Wahrscheinlichkeitsrechnung:.....</b>	<b>71</b>
<b>18</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>73</b>
<b>19</b>	<b>VERBESSERUNGSVORSCHLÄGE.....</b>	<b>76</b>
<b>20</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>77</b>
<b>21</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>78</b>

## **1 EINLEITUNG**

### **1.1 ZIELSETZUNG**

Mobilitätserhebungen sind Verkehrserhebungen zur Erfassung von Personenwegedaten. Dabei stützen sich traditionelle Erhebungsverfahren auf schriftliche und telefonische Personen-Wegefragebogen. Speziell kurze Wege, darunter Wege die mit dem Fahrrad zurück gelegt werden, werden bei nachträglicher Aufzeichnung nicht als relevant angesehen oder vergessen. Der Einsatz von elektronischen Erfassungsgeräten kann eine vollständige Aufzeichnung aller Wege ermöglichen. Somit erfahren traditionelle Verfahren eine wesentliche Verbesserung. Die zur Verfügung stehenden Messgeräte sind ein GPS-Datenerfassungsgerät kombiniert mit Beschleunigungssensoren.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, zu prüfen, ob im Zuge GPS-gestützter Mobilitätserhebungen eine Oberflächenbeurteilung von Radverkehrsanlagen mittels der Beschleunigungssensoren möglich ist. Die Funktion des GPS-Empfängers sollte dabei unterstützend zum Einsatz kommen. Neben den Lagekoordinaten werden GPS-Zeit, -Datum und Wegdistanzen aufgezeichnet. Um eine Beurteilung der Oberfläche durchführen zu können, werden Daten des Beschleunigungssensores verwendet, vorwiegend Werte in vertikaler Richtung.

### **1.2 VORGEHENSWEISE**

Der erste Schritt beinhaltet die Voruntersuchungen. Die verwendeten Messgeräte wurden noch nie für eine derartige Beurteilung von Oberflächen herangezogen. Daher war es notwendig, die Funktionsweise des Messgerätes zu untersuchen, um im Anschluss eine sinnvolle Datenerhebung entsprechend der Zielsetzung zu ermöglichen. Nach dem Ausscheiden fehlerhafter Daten erfolgt die Darstellung und Auswertung der Messwerte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL. Im nächsten Schritt wurde der statistische Zusammenhang der aufbereiteten Daten und der Oberflächenqualität

mit Hilfe einer Statistik- und Analyse-Software (SPSS) gezeigt. Eine anschließende Diskussion der Ergebnisse bildet den Schlusspunkt dieser Arbeit.

## 2 MESSGERÄT

Ein etwa mobiltelefongroßes Kunststoffgehäuse beinhaltet die Messeinheiten (Abb.:2-1).



Abbildung 2-1: Mobitest GSL von MGE-Data Prag

Die grundlegende Aufgabe des Messgerätes liegt in der Mobilitätsenerhebung. Zusätzlich befinden sich an der Vorderseite fünf Eingabekнопfe. Sie können für verschiedene Aufgaben verwendet werden. Beispielsweise werden sie von den Probanden gedrückt, sobald diese das Verkehrsmittel wechseln. Damit werden Markierungen im Aufzeichnungsprotokoll gesetzt, die eine weitere Bearbeitung der ausgelesenen Daten vereinfachen. Kommt es zur Auswertung, erweist es sich als äußerst schwierig, nur mit Hilfe der GPS Daten nach einzelnen Wegpunkten zu suchen. Gesetzte Markierungen können innerhalb aufgezeichneter Messreihen rasch wiedergefunden werden.

MobiTest GSL beinhaltet zwei voneinander getrennt zu betrachtende Messeinheiten:

- GPS – Empfänger  
(MobiTest würde auch mit dem europäischen System GALILEO arbeiten)
- Beschleunigungssensoren

GPS – Koordinaten und Beschleunigungsdaten werden von den Sensoren gemessen und gespeichert. Die Werte der Beschleunigung werden mit einer 10 [HZ] Taktung aufgezeichnet. Die Erfassung der GPS – Koordinaten erfolgt mit einer 1 [Hz] Taktung.

### 3 DATENERHEBUNG BEI EINER NACH UNTEN GERICHTETEN BEWEGUNG

Um die aufgezeichneten Beschleunigungsdaten interpretieren zu können, wurden im Vorfeld Messungen unter bekannten Rahmenbedingungen durchgeführt. Dabei wurde das Messinstrument in einer Höhe von 25 [m] losgelassen. Richtung und Weg der Bewegung waren damit klar definiert. Die Frage war, ob eine vertikale Beschleunigung nach unten, durch einen positiven oder negativen Wert dargestellt wird. Um die Geräteaufzeichnungen bekannten Beschleunigungen zuordnen zu können, erfolgten zehn Versuche im freien Fall.

#### 3.1 THEORIE DES FREIEN FALLS

Vergleicht man den freien Fall von zwei gleichen Körpern im Vakuum und luftgefüllten Raum, so wird der Körper in der Atmosphäre durch den Luftwiderstand gebremst. Dieser Widerstand wird wie folgt durch die Newtonsche Widerstandsformel (Formel 1) beschrieben. Im luftleeren Raum erfährt der Versuchskörper eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung mit der Erdbeschleunigung von 9,81 [m/sec<sup>2</sup>].

Newtonsche Widerstandsformel:

$$F_w = c_w \cdot A \cdot (\rho \cdot v^2) / 2 \quad (1)$$

Widerstandsbeiwert	$c_w$
Querschnittsfläche	$A$ [m <sup>2</sup> ]
Luftdichte	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Masse	$m$ [kg]
Anfangsgeschwindigkeit	$v$ [m/s]
Anfangsbeschleunigung	$a$ [m/s]

### 3.1.1 RECHENBEISPIEL FÜR DEN FREIEN FALL IN DER ATMOSPHERE

Das folgende Rechenbeispiel sollte die grundlegenden, physikalischen Zusammenhänge des freien Falles zeigen. Die für diese Rechnung geforderten Eingangsgrößen sind frei gewählt.

$$c_w = 0,8$$

$$A = 1 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\rho = 1,3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$m = 80 \text{ [kg]}$$

$$v = 0 \text{ [m/s]}$$

$$a = 0 \text{ [m/s]}$$

### 3.1.2 ENDGESCHWINDIGKEIT

Berechnung der Endgeschwindigkeit

$$v_{\text{end}} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot m \cdot g}{c_w \cdot A \cdot \rho}\right)} = 38,85 \text{ [m/s]} \quad 139,86 \text{ [km/h]} \quad (2)$$

Die Endgeschwindigkeit  $v_{\text{end}}$  (Formel 2) unter Berücksichtigung des Luftwiderstandes beträgt 38,85 [m/s]. Mit Hilfe einer Geschwindigkeitsfunktion (Formel 3) wird der Verlauf der Geschwindigkeit graphisch dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Kurve nach  $t=10$  [s] horizontal verläuft. Bis zu diesem Zeitpunkt nimmt die Geschwindigkeit des Körpers ständig zu. Dann ist die Endgeschwindigkeit von 38,85 [m/s] (Abb.: 3-1) erreicht.

Berechnung der Geschwindigkeitsfunktion

$$v(t) = v_{\text{end}} \cdot \tanh(g/v_{\text{end}} \cdot t) \quad (3)$$

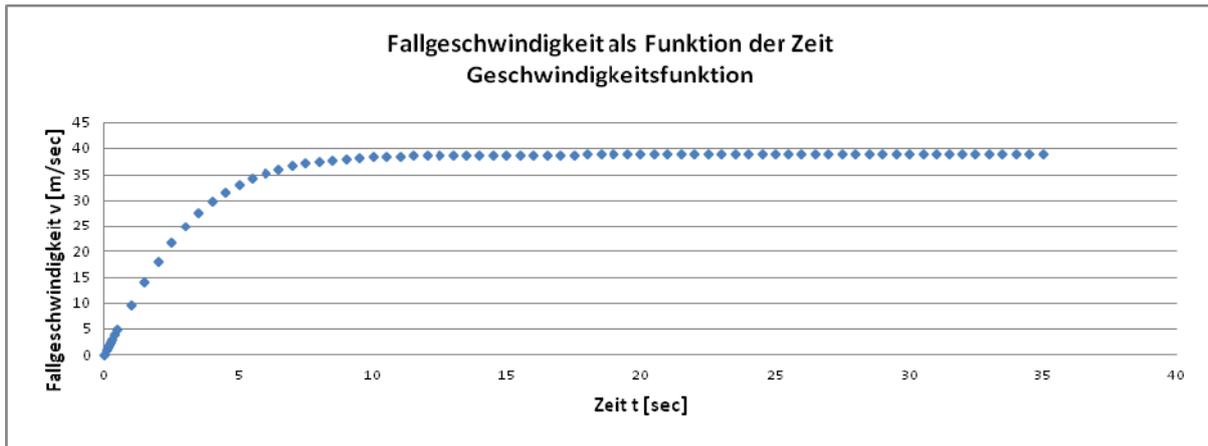


Abbildung 3-1: Endgeschwindigkeit des fiktiven Versuchskörpers

### 3.1.3 FALLWEG

Auch der Fallweg kann graphisch dargestellt werden (Abb.: 3-2). Dieser wird als Funktion der Zeit wie folgt berechnet (Formel 4).

Berechnung des Fallweges

$$s(m) = (v_{\text{end}} / g) * \ln(\cosh((g/v_{\text{end}})*t)) \quad (4)$$

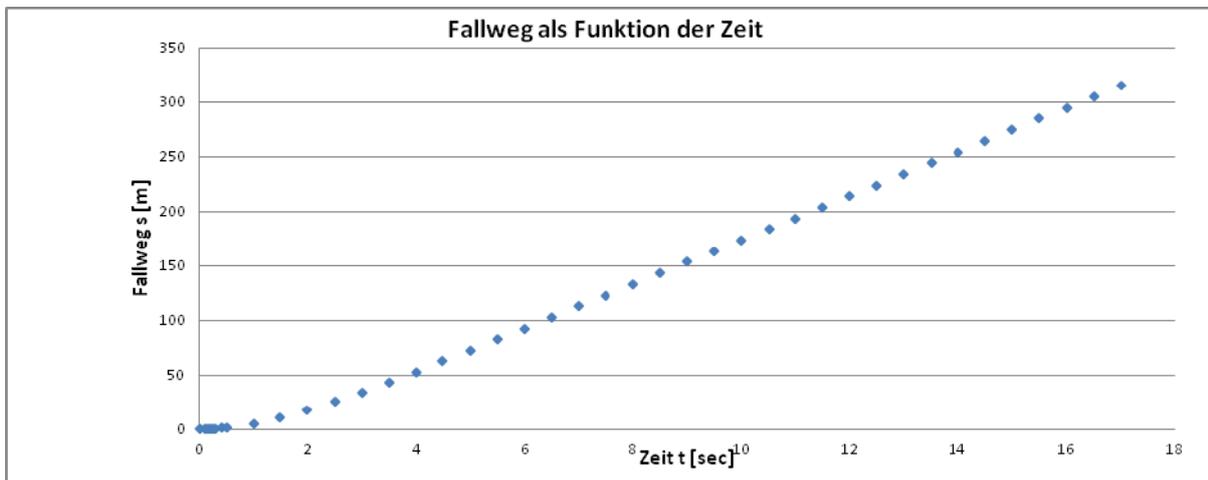


Abbildung 3-2: Darstellung des Verlaufes des Fallweges.

Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Geschwindigkeit. Ab dem Zeitpunkt von  $t=10$  [s] ist die Geschwindigkeit konstant. Die Beschleunigung ist von anfänglichen  $9,81$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] auf  $0$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] abgefallen. Somit ist auch der vom Körper im freien Fall pro Zeiteinheit zurückgelegte Weg konstant.

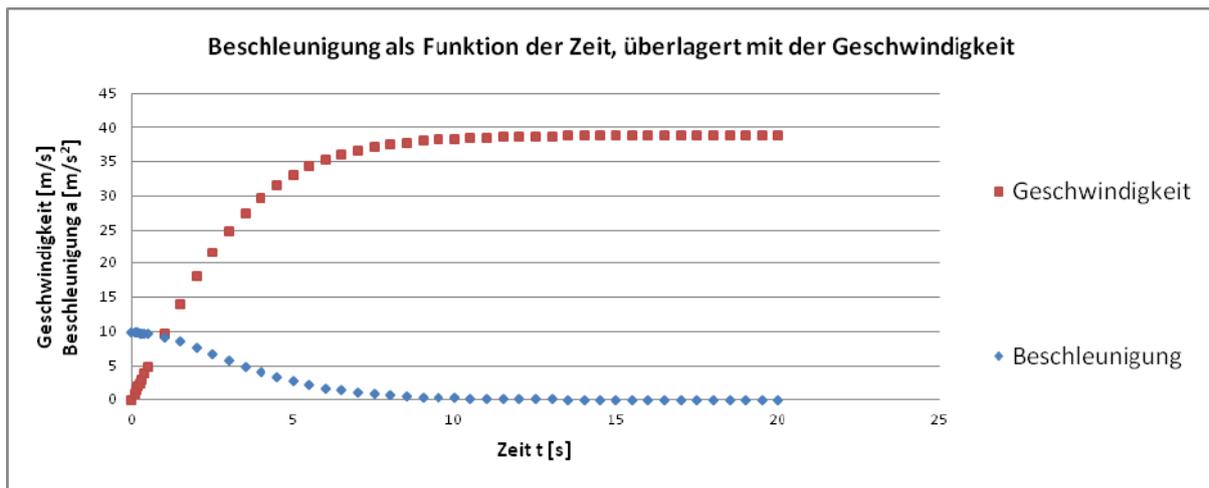
### 3.1.4 GESCHWINDIGKEIT UND BESCHLEUNIGUNG

Unmittelbar zum Zeitpunkt des Fallenlassens erfährt der Körper eine Beschleunigung von  $9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ , im Diagramm (Abb.: 3-3) an der blauen Punktlinie ersichtlich. Die rote Punktlinie beschreibt die der Beschleunigung entsprechende Geschwindigkeit. Diese nimmt bis etwa  $10 \text{ [s]}$  zu, ab dem Zeitpunkt verlaufen beide Linien horizontal.

Der dem bewegten Körper entgegenwirkende Luftwiderstand steigt mit dem Zuwachs der Geschwindigkeit. Ab der Endgeschwindigkeit halten sich Beschleunigung (Formel 5) und Luftwiderstand die Waage.

Beschleunigung als Funktion der Zeit

$$a(t) = g / (\cosh(g / v_{\text{end}} * t))^2 \quad (5)$$



**Abbildung 3-3:** Überlagerte Darstellung der theoretisch berechneten Beschleunigung und Geschwindigkeit eines Körpers im freien Fall.

## 3.2 MESSGERÄT IM FREIEN FALL

Ziel war es herauszufinden, wie das Messgerät Daten aufzeichnet und ob bzw. wie unterschiedliche Beschleunigungswerte in vertikaler Richtung zu erkennen sind. Auch war es von Interesse, auf welche Art und Weise es möglich ist, diese Daten in Diagrammen und Tabellenkalkulationsprogrammen weiterzuverarbeiten.

### 3.2.1 AUFBAU UND ABLAUF DES VERSUCHES

Für den Versuchsaufbau galt es, den Sensor einer dem freien Fall möglichst gut entsprechenden Situation auszusetzen, ohne das Gerät dabei zu Schaden kommen zu lassen. Eine möglichst lange Fallstrecke sollte bewerkstelligen, dass mehr Daten aufgezeichnet werden. Aus diesen beiden gegensätzlichen Anforderungen heraus wurde das Messgerät gut und unverschieblich in einem Behältnis fixiert. Die Lage des Gerätes im Behälter entsprach jener, wie es in weiterer Folge auch am Fahrrad befestigt werden sollte. Die Situation des freien Falles konnte durch das Loslassen des Behälters in einer Höhe von 25 [m] über Grund simuliert werden. Der Aufprall am Boden wurde durch ein am Korb befestigtes Seil verhindert. Entsprechend der angeführten Formeln für Geschwindigkeit (Formel 3) und Beschleunigung (Formel 5) wurden für den durchgeführten Praxisversuch der Verlauf von Beschleunigung und Geschwindigkeit berechnet. Eine Darstellung der Ergebnisse findet sich in Abbildung 3-4 in Abhängigkeit der Zeit.

Die für die Berechnung notwendigen Eingangsgrößen lauteten wie folgt:

$c_w$	=	0,8	
$A$	=	0,06	[m <sup>2</sup> ]
$\rho$	=	1,3	[kg/m <sup>3</sup> ]
$m$	=	1,3	[kg]
$v$	=	0	[m/s]
$a$	=	0	[m/s]

Abbildung 3-4 lässt erkennen, dass der Versuchskörper nach etwa 6 [s] seine Endgeschwindigkeit erreichte. Theoretisch würde der Korb im freien Fall bei Kombination aus Schwerkraft und entgegenwirkenden Luftwiderstand eine Endgeschwindigkeit von 20,22 [m/s] (72,78 [km/h]) erreichen.

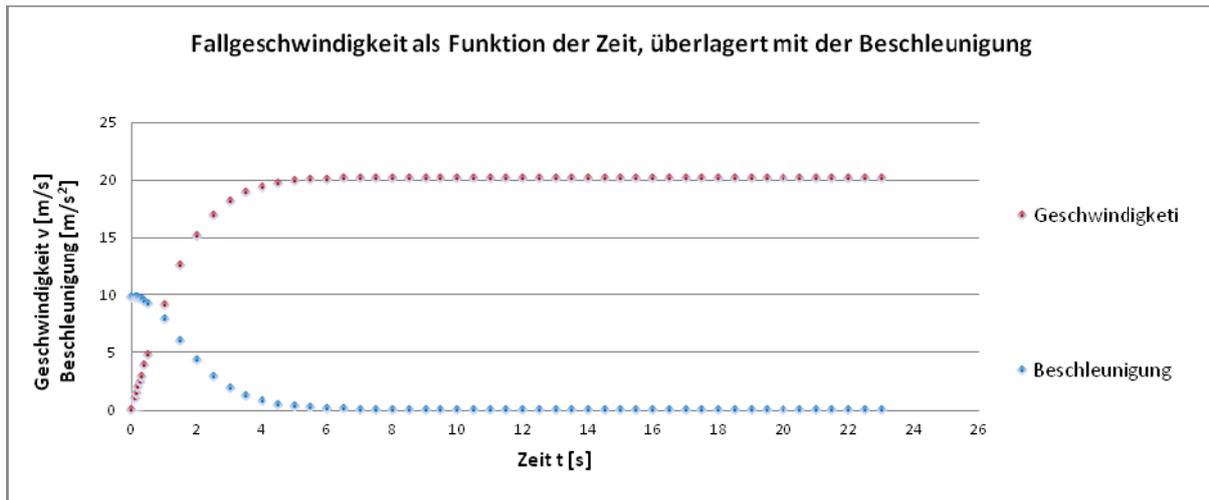


Abbildung 3-4: Überlagerung von Geschwindigkeit und Beschleunigung der Messeinheit im freien Fall. (Berechnung von Versuchsdurchführung)

Aus dem folgenden Diagramm (Abb.: 3-5) des Fallweges lässt sich erkennen, dass der Höhenunterschied von 25 [m] innerhalb von 2,5 [s] zurückgelegt wird.

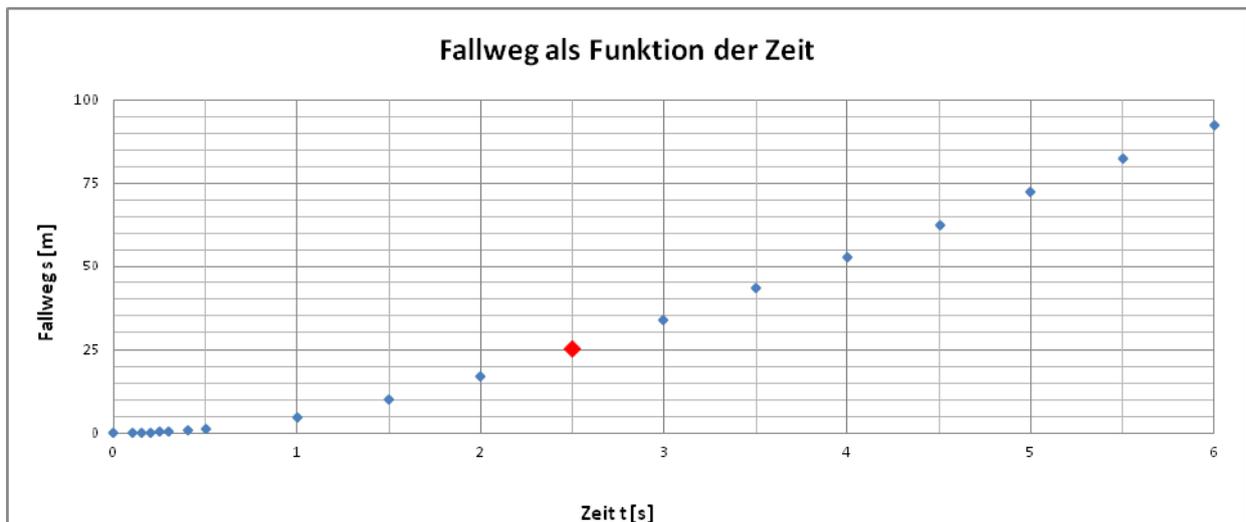


Abbildung 3-5: Fallweg der Messeinheit im freien Fall.

### 3.2.2 VERSUCHSAUSWERTUNG

Wie eingangs erwähnt liegt das Hauptaugenmerk dieses Versuches im Bereich der Datenauswertung und -darstellung. Grundsätzlich galt es abzuklären wie Beschleunigungen, speziell in vertikaler Richtung, aufgezeichnet und anschaulich dargestellt werden können.

Die folgenden Diagramme (Abb.: 3-6 und 3-7) zeigen ein und denselben Fallversuch von insgesamt 10 durchgeführten Fallexperimenten. Die Gerätemesswerte (Abb.: 3-6) wurden in Beschleunigungswerte [ $\text{m/s}^2$ ] umgerechnet (Abb.:3-7). Versuch I weist am anschaulichsten den Verlauf der vertikalen Beschleunigung aus. Zugleich traten in diesem Fall die größten positiven und negativen Beschleunigungswerte aller 10 Versuche auf.

- Maximalwert 237 [-]  
Das entspricht  $10,89 \text{ [m/s}^2\text{]}$  nach der Transformation.
- Minimalwert 101 [-]  
Das entspricht  $-14,82 \text{ [m/s}^2\text{]}$  nach der Transformation.

Der Gerätemessbereich der Vertikalbeschleunigung umfasst 0 – 260. Befand sich das Gerät in Ruhe wurde der Wert von 180 gemessen. Dieser einheitenlose Messwert entspricht der  $0 \text{ [m/s}^2\text{]}$ . Die Transformation der einheitenlosen Daten war erforderlich um Si-Einheiten konforme Messwerte zu erhalten.

Transformationsformel nach Wally (o.J.)

$$Z = [(X - 127,554) * 9,81 / 51,886] - 9,81 \quad (6)$$

X	vom Gerät ausgelesener Messwert
Z	Beschleunigungswert [ $\text{m/s}^2$ ]
51,886	ein dem Gerät entsprechender Umrechnungsfaktor
9,81	Erdbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]

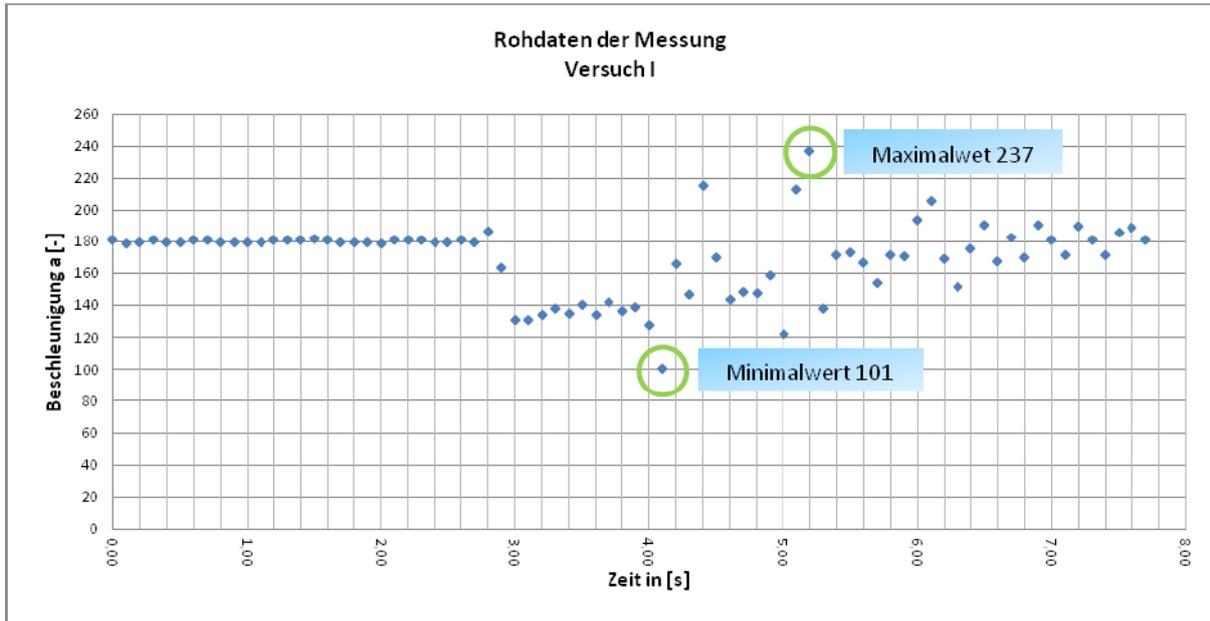


Abbildung 3-6: Verlauf der einheitenlosen Rohdaten der Vertikalbeschleunigung

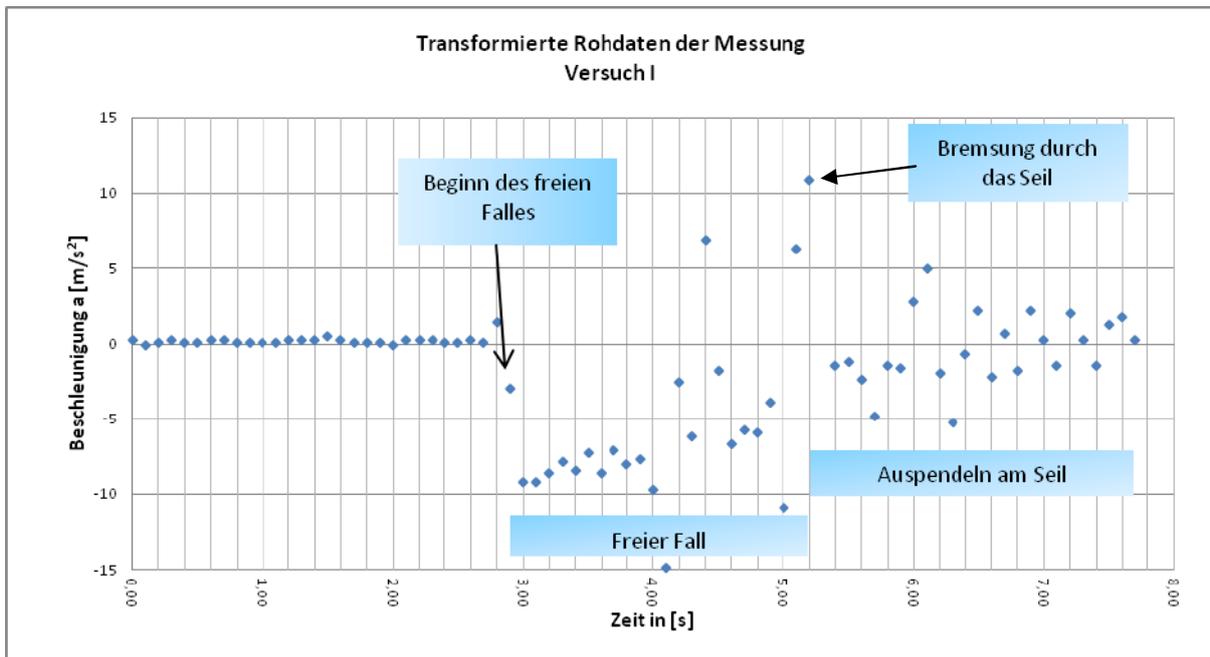
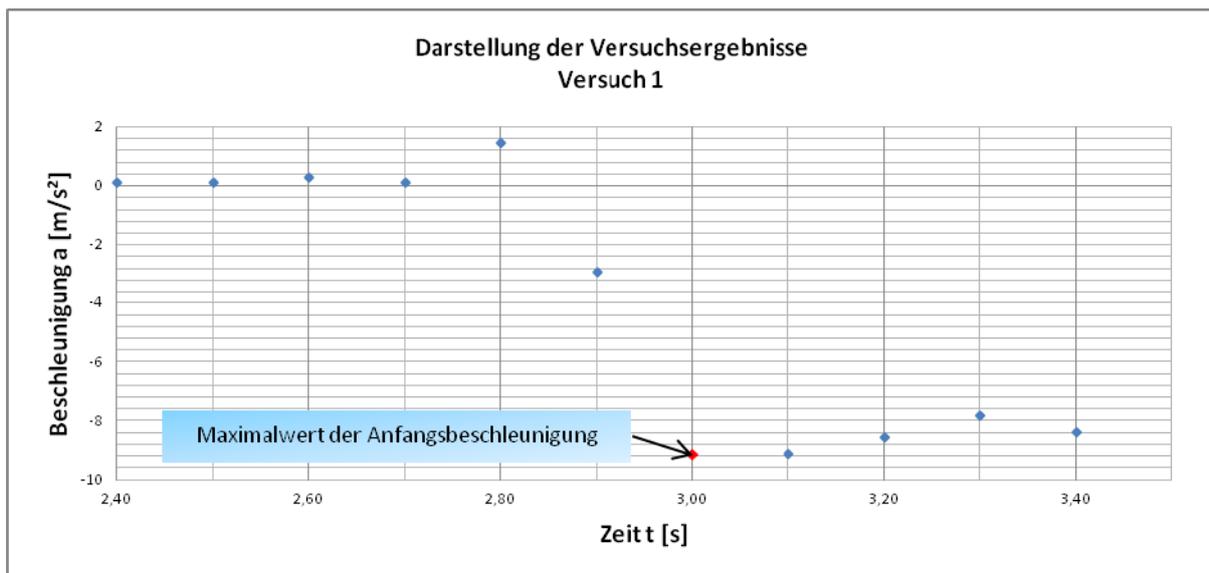


Abbildung 3-7: Darstellung der transformierten Daten der Vertikalbeschleunigung. (Messwerte des Mobitest MGL)

Das Bild der transformierten Daten änderte sich geringfügig entsprechend der Verschiebung der Beschleunigungswerte in  $\text{Si}$  - Einheiten. Bei der Betrachtung von Abbildung 3-7 können zwei Bereiche klar voneinander getrennt werden. Der linke Bereich, er wird durch das Zeitfenster von 0 bis 2,8 [s] beschrieben. Hier befand sich das Gerät in Ruhe. Daher liegen die Werte der Beschleunigung sehr nahe bei Null. Das Behältnis samt Aufzeichnungsgerät wurde per Hand über ein Gelände gehalten. Hervorgerufen durch leichte Körperbewegungen schwanken die Daten um Null und ergeben daher keine gerade Linie.

Der zweite Bereich des Datensatzes ist durch den starken Abfall gekennzeichnet. Dies spiegelt den Moment des Loslassens bzw. den Beginn des freien Falles wieder. Es ist erkennbar, dass die vertikale Beschleunigung zu diesem Zeitpunkt einen Wert von  $-9,15 \text{ [m/s}^2\text{]}$  aufweist (Abb.: 3-8).



**Abbildung 3-8:** Ausschnitt der transformierten Daten der Vertikalbeschleunigung zu Beginn des freien Falles.

Bei weiteren Versuchen traten in eben diesem Bereich, kurz nach dem Loslassen, Beschleunigungen in derselben Größenordnung auf. Um einen klaren Überblick der Ergebnisse zu erlangen, wurden alle Zahlenwerte in einer Tabelle (Tab.: 3-1) zusammengefasst. Innerhalb von 10 Versuchen traten keine auffälligen Spitzenwerte auf.

**Tabelle 3-1:** Die Versuchsergebnisse der Messeinheit im freien Fall

Versuchs Nr.	Vertikale Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
1	9,15
2	9,15
3	9,34
4	9,31
5	9,17
6	9,28
7	9,17
8	9,25
9	9,22
10	9,15

### 3.2.3 DISKUSSION DER ERSTEN VERSUCHSERGEBNISSE

Das ruckartige Absacken der Werte in den Abbildungen 3-6, 3-7 und 3-8 zeigt deutlich den Beginn des freien Falles an. Auch die damit verbundenen Zahlenwerte weisen darauf hin. Der Beschleunigungswert der Schwerkraft von 9,81 [m/s<sup>2</sup>] wurde nie erreicht. Ein Messfehler des Gerätes oder auch der Luftwiderstand des Korbes in Kombination mit dem des Seiles können dafür verantwortlich sein. Zu Beginn des Falles ist in den Abbildungen 3-7 und 3-8 eine leichte aber permanente Beschleunigungsabnahme zu erkennen. In Anlehnung an die in der theoretischen Ausführung dieses Versuches gezeigten Diagramme, kann dieser Bereich bis zur Sekunde 5 als jener Bereich ausgewiesen werden, indem die Beschleunigung auf Grund des Luftwiderstandes abnimmt. 2,4 Sekunden nach dem Loslassen des Korbes wurde dieser durch das Seil gebremst. Die gegensätzliche Beschleunigung lässt das in Abbildung 3-6 und 3-7 gut erkennen. Verglichen mit dem Diagramm des theoretischen Fallweges (Abbildung 3-5) zeigt sich eine Falldauer von 2,5 Sekunden. Dies entspricht der berechneten Zeitspanne die das Behältnis samt Messeinheit benötigen würde, um den Höhenunterschied von 25 [m] zurück zu legen. Im Versuch wird der fallende Korb durch das befestigte Seil gebremst. Damit verlängert sich die theoretisch ermittelte Fallzeit.

Zugleich verkürzt sich der Fallweg auf 24,5 [m]. Um einen Aufprall zu verhindern fällt der Korb einen halben Meter über Boden in das Seil. Es zeigt sich, dass auf Grund der nahezu identen Fallzeiten die theoretische Berechnung eine sehr gute Beschreibung der Praxis liefert. Weiters kann erkannt werden, dass vertikale Bewegungen nach unten mit einem negativen Zahlenwert ausgewiesen werden.

## **4 DATENERHEBUNG BEI EINER NACH OBEN GERICHTETEN BEWEGUNG**

Aus der Integration der Ergebnisse des "freien" Falles wurde als nächster Schritt das Verhalten des Sensors bei einer vertikalen, nach oben gerichteten Bewegung getestet. Dabei war es das Ziel, das Messgerät auch nach oben gerichteten Beschleunigungen auszusetzen.

### **4.1 AUFBAU UND ABLAUF DES VERSUCHES**

Um eine vertikale Beschleunigung nach oben zu simulieren, wurde das Messinstrument unverschieblich am Oberrohr eines Fahrrades befestigt (Abb.: 4-1). Das für die Durchführung dieses Versuches verwendete Fahrrad wird im eigentlichen Sinne ausschließlich für den Rad Trial Sport genutzt. Die speziell gegebene Rahmengenometrie ermöglicht unter anderem Sprünge aus dem Stand (Abb.: 4-2). Mit einem solchen Sprung, bei dem der Sensor am Rahmen befestigt war, wurde eine Situation simuliert, welche eine vertikale Bewegung bzw. Beschleunigung nach oben beschreibt.



Abbildung 4-1: Messeinheit am Oberrohr des Fahrrades



Abbildung 4-2: Sprung

#### 4.2 AUSWERTUNG UND DARSTELLUNG DER BESCHLEUNIGUNGSDATEN

Im folgenden Diagramm (Abb.: 4-3) wurde die erhobene vertikale Beschleunigung entlang der Ordinate aufgetragen. Die Zeit wurde entlang der Abszisse aufgetragen. Bei dieser Testreihe wurden 5 Versuche durchgeführt. Um einen Überblick der Ergebnisse zu erlangen, wurden alle Zahlenwerte in einer Tabelle (Tab.: 4-1) zusammengefasst. Die Messwerte von Sprung 2 weisen die vertikale Bewegung am anschaulichsten aus.

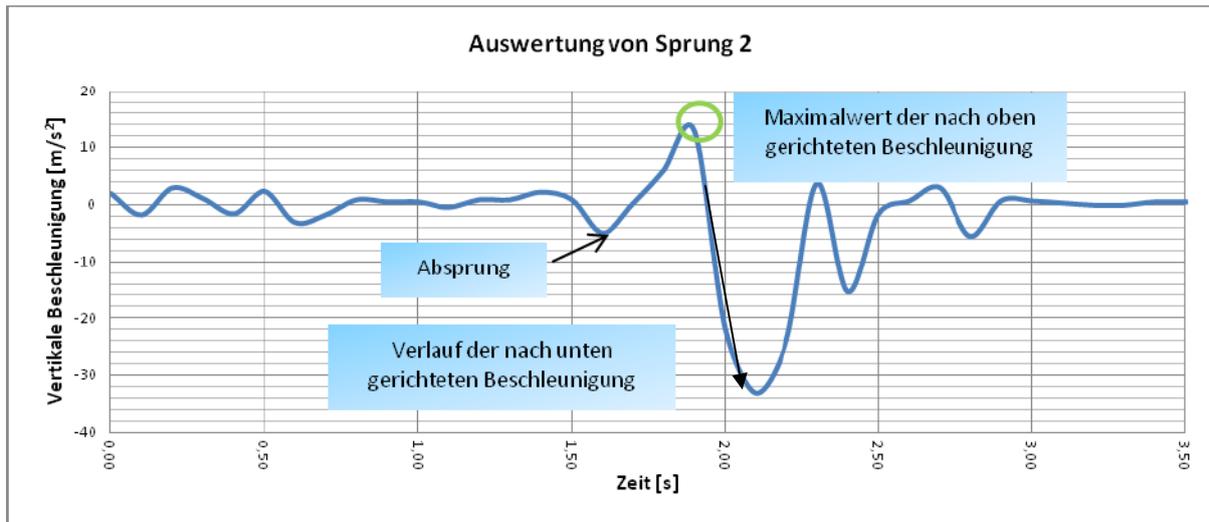


Abbildung 4-3: Vertikale Messdaten von Sprung II

Das anfängliche, kurzgehaltene Auf und Ab wurde durch Ausgleichsbewegungen hervorgerufen. Es ist notwendig vor dem Absprung völlig im Gleichgewicht zu sein, um den Bewegungsablauf des Sprunges einzuleiten. Der Absprung ist sehr gut erkennbar. Auffällig ist dabei eine kurze vertikale Beschleunigung nach unten gefolgt von einer ausgeprägten Spitze nach oben. Der ansteigende Ast beschreibt somit das Anheben des Sensors. Hat die Person samt Fahrrad den höchsten Punkt des Sprunges erreicht, ändert sich auf Grund der Schwerkraft, die Richtung der Beschleunigung.

Der weitere Verlauf der Kurve ist nicht mehr Gegenstand der Untersuchung. Es liegt jedoch der Schluss nahe, dass sich die auffällig hohe Beschleunigungsspitze (3-fache Erdbeschleunigung) nach unten, aus einer Überlagerung ergibt. Neben der Schwerkraft, kommt es aus dem Bewegungsablauf hier zu einer Beschleunigung nach unten. Beim Sprung nach oben wird das Fahrrad unter anderem durch das Anziehen der Beine nach oben gezogen. Im Gegensatz dazu werden bei der Landung die Beine wieder ausgestreckt, damit zuerst das Hinterrad den Boden berührt.

**Tabelle 4-1:** Ergebnisse der nach unten gerichteten Beschleunigung.

Versuchs Nr.	Vertikale Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
1	12,22
2	13,97
3	12,97
4	6,92
5	9,17

## 5 DER GPS SENSOR

### 5.1 GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

GPS steht für Global Positioning System und ist ein vom amerikanischen Militär entwickeltes System zur Standortbestimmung. Anfangs, kam es aus Gründen der Sicherheit, zu einer künstlich herbeigeführten Beeinträchtigung des Satellitensignals. Dieses sogenannte "selective availability" (SA) führte bei zivilen Nutzern zu einer ungenauen Positionsbestimmung von ca. 50 bis 100 [m]. Mit 2. Mai 2005 wurde diese Störfunktion bis auf weiters abgeschaltet.

Herzstück der GPS Technologie ist ein Netzwerk von weltumkreisenden Satelliten. Dabei folgen sie bekannten Bahnen und senden permanent Signale Richtung Erde. Personen die einen entsprechenden Empfänger bei sich tragen ist es möglich, das vom Satelliten ausgehende Signal zu empfangen. Mittels entsprechender Software kann aus der Distanz zwischen Standort und mindestens drei Satelliten die Lage bestimmt werden.

Dabei werden die räumlichen Überschneidungen der vom Satelliten ausgesendeten Signale genutzt. Man spricht dabei von einer Trilateration im Raum. Auch können Geschwindigkeit sowie zurückgelegte Weglängen des Empfängers berechnet werden. Dies basiert auf Positionsveränderungen des Empfängers.

MobiTest GSL nutzt das europäische Satellitennavigationssystem Galileo. Dieses im Aufbau befindliche System arbeitet mit 30 Satelliten welche die Erde in einer Bahnhöhe von 23222 [km] umkreisen.

Neben Galileo gibt es noch zwei weitere Navigationssysteme:

- GLONASS: Ein sich im Aufbau befindliches russisches System  
24 Satelliten, Bahnhöhe 19100 [km]
- NAVSTAR – GPS: Ein bereits ausgebautes amerikanisches System.  
24 Satelliten, Bahnhöhe 20200 [km]

Satellitenavigationssysteme benötigen neben den Satelliten auch Bodensegmente. Galileo arbeitet mit 38 Kontrollstationen und neun weiteren Up-Link-Stationen. Sie alle haben die Aufgabe Satelliten und ihre Signale zu kontrollieren und gegebenenfalls Korrekturen durchzuführen. Sie können aber auch praktische Informationen für den Systemnutzer bereitstellen:

- Ephemeriden:  
Sie beschreiben in mathematischer Form die wahre Umlaufbahn von Satelliten.
- Almanach:  
Im Vergleich zu den Ephemeriden sind die Almanach Daten ungenauer. Die Gültigkeit der von ihnen beschriebenen Bahndaten ist dafür von längerer Dauer. Sie sind nicht notwendig aber nützlich, da sie die Suche nach den Satelliten beim Einschalten des Empfängers beschleunigen.  
MobiTest GSL nutzt diese zusätzlichen Informationen ebenfalls. Almanachdaten werden mittels PC in die Messeinheit eingespielt. Die Daten haben eine Gültigkeit von 14 Tagen.

## 5.2 NUTZEN DER GPS FUNKTIONEN

Die MobiTest unterstützende Software kann mit Hilfe der erhobenen Lagekoordinaten die vom Empfänger zurückgelegten Weglängen berechnen. Im Zuge der Auswertung war es nötig Beschleunigungswerte in Diagrammen darzustellen. Eine anschauliche Wiedergebe dieser Daten erfolgte in Abhängigkeit des Weges (Abb.: 5-2).

Somit war es möglich die Messfahrten trotz mehrmaliger Stopps als kontinuierliche Befahrungen darzustellen. Erfolgte die Darstellung in Abhängigkeit der Zeit zeigte sich das Halten als eine dem Ruhewert entsprechende Linie (Abb.: 5-1).

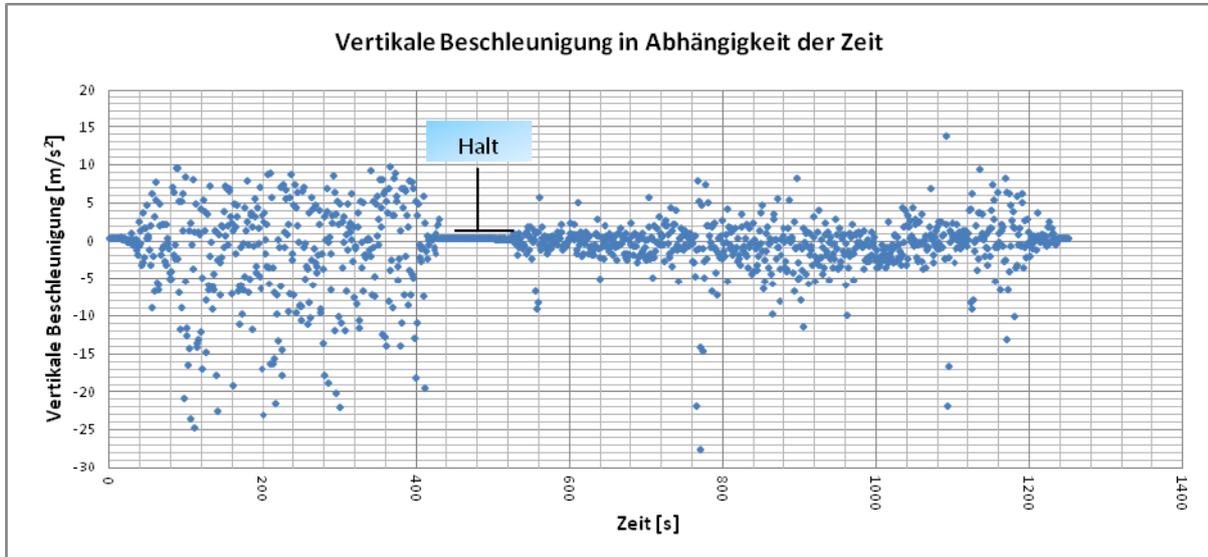


Abbildung 5-1: Darstellung der vertikalen Beschleunigung in Abhängigkeit der Zeit.

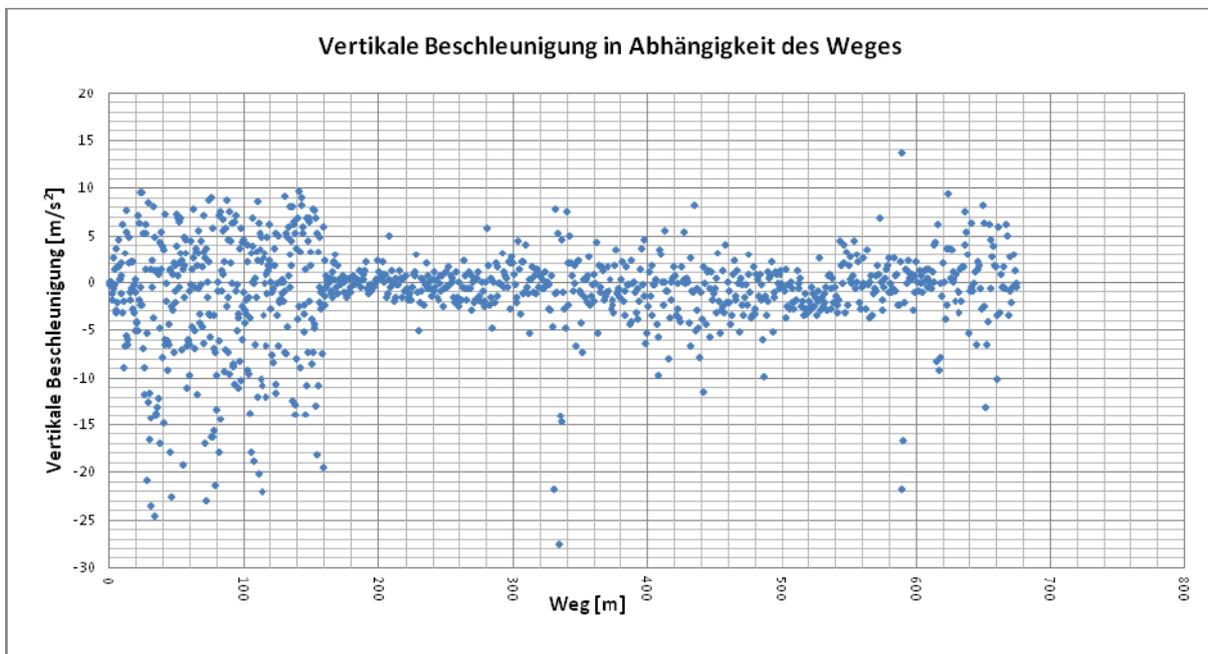


Abbildung 5-2: Darstellung der vertikalen Beschleunigung in Abhängigkeit des Weges

### 5.3 VERFAHREN DER LAGEBESTIMMUNG VON MOBITEST GSL

Im Sinne des mathematischen Modelles der Lagebestimmung handelt es sich bei den MobiTest GSL Messeinheiten um eine sogenannte Einzelpunktbestimmung bzw. Absolutpositionierung, auch Standalone – Navigation genannt. Lagekoordinaten sowie Wegdistanzen der Absolutpositionierung erfahren keine Korrektur. Sie unterliegen weder im Postprocessing, der Nachbearbeitung, noch in der Echtzeit einer Verbesserung durch Referenzstationen oder durch deren Daten. Daher auch der Begriff Absolutpositionierung.

Bei einer Messfahrt wurden pro Fahrt zwei Geräte mitgeführt. Somit konnten Beschleunigungsdaten der beiden Laufräder bei einer Messfahrt aufgenommen werden. Eine Messeinheit wurde jeweils über dem Vorderrad, eine weitere über dem Hinterrad montiert. Dabei ist es wichtig zu verstehen, dass jeder Empfänger für sich, nach dem Prinzip der Absolutpositionierung arbeitete.

### 5.4 FEHLER DER STANDALONE – NAVIGATION

- Satelliten- Empfängeruhrfehler  
Satellitenuhrfehler beeinflussen direkt die Position.  
Empfangsuhrfehler werden im mathematischen Modell mitbestimmt.
- Satellitenbahnfehler  
Sie beeinflussen direkt die Position.
- Ionosphärische Refraktion  
Beeinflusst vorwiegend die Höhenkomponente. Die Fehler können im Meterbereich zu liegen kommen.
- Troposphärische Refraktion  
Je nach Eingliederung eines Troposphärenmodells kann der Fehler von 0,2-2 [m] reichen.

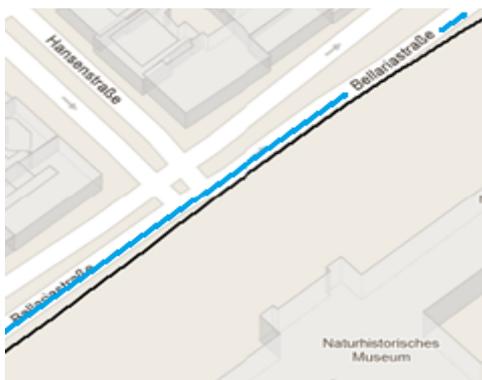
- Mehrwegeffekt  
Signal gelangt über Umwege zum Empfänger (Reflexion).  
Fehler kann bis in den Meterbereich führen.
- Abschattung  
Kein Satellitenempfang möglich. Gebäude oder Bäume stehen zwischen Empfänger und Satellit.

Alle der oben angeführten Fehler können bei der Lagebestimmung mittels Absolutpositionierung auftreten. Die Fehler die in jeder der Messfahrten zu erkennen waren, wurden durch den Effekt der Abschattung verursacht. Das Auftreten anderer Messfehler war im Ausleseprotokoll nicht ersichtlich.

Die Abschattung trat dann ein, wenn sich der Empfänger unter Bäumen oder in engen Straßenschluchten befand. Abbildungen 5-3 und 5-4 zeigen Ergebnisse der Lagebestimmung entlang unterschiedlich gestalteter Straßenabschnitte.

In Abbildung 5-3 verlief die tatsächliche Messfahrt entlang der Bellariastraße. Die schwarze Linie zeigt dabei den vom Messgerät aufgezeichneten Verlauf. Die erhobenen Daten liegen wenige Meter neben der tatsächlichen Befahrungslinie.

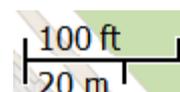
Entlang des von Bäumen gesäumten Radweges (Abb.: 5-4) liegen 15 [m] zwischen den erhobenen Daten und dem wahren Verlauf der Messfahrt.



**Abbildung 5-3:** Offener Straßenzug, Bellariastraße  
Quelle der Kartendarstellung: Google Maps

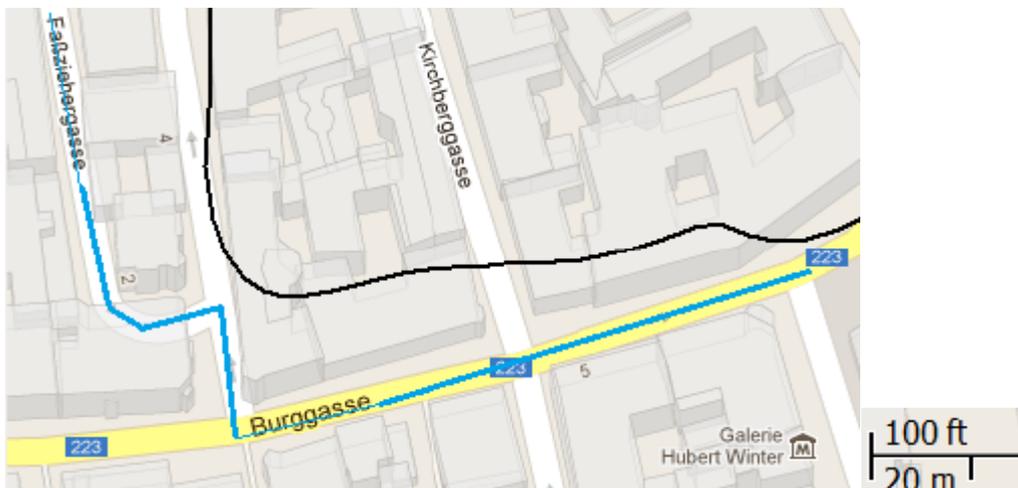


**Abbildung 5-4:** Von Bäumen gesäumter Radweg



- Verlauf der erhobenen Daten
- Verlauf der tatsächlichen Messfahrt

War die automatische Berechnung der Distanzen wegen des Abschattungseffektes nicht möglich, musste auf die Routingfunktion von Google Maps zurückgegriffen werden. Damit waren Distanzmessungen in nicht erfassten Streckenabschnitten möglich. Ein weiteres Problem in Verbindung mit der Abschattung ergab sich an Streckenpunkten, an denen sich die Oberflächenbeschaffenheit änderte. In Abbildung 5-5 ist die Einmündung der gepflasterten Faßziehergasse in die asphaltierte Burggasse zu sehen. Aufgrund der dort vorhandenen engen Straßen kam es entlang der Faßziehergasse sowie abschnittsweise in der Burggasse zur Abschattung des Empfängers. Die räumliche Verschiebung des Verlaufes der erhobenen Daten zu der tatsächlichen Messfahrt betrug in diesem Bereich 30 [m].



**Abbildung 5-5:** Übergang der Faßziehergasse in die Burggasse.  
Quelle der Kartendarstellung: Google Maps

Mit den Daten der GPS - Messung war es nicht möglich den Übergang der Faßziehergasse in die Burggasse zu bestimmen. Diese Problemstellung konnte mit den Beschleunigungsdaten gelöst werden. Ansatz dieser Lösung war es einen Halt am Ende der Faßziehergasse einzulegen. Die Beschleunigungssensoren verzeichneten in Folge dessen den Ruhewert. Damit war es möglich Übergänge von Oberflächenstrukturen mit Hilfe der Nullwerte auszuweisen.

## 5.5 ERREICHBARE GENAUIGKEITEN

Die aufgezeichneten Daten werden in einen Computer eingelesen. Mit einer von MGE-Data bereitgestellten Software ist es möglich die aufgezeichnete Route mit einer Google Maps Karte zu hinterlegen und abzugleichen. In Testfahrten zeigte sich eine sehr gute Abbildungsgenauigkeit der mit dem Fahrrad zurückgelegten Wege. Bei dem verwendeten GPS Empfänger kann mit einer minimalen Genauigkeit von plus / minus 12 [m] gerechnet werden. Dabei kommen 50 % der Daten in einem Quadrat mit der Seitenlänge von 12 [m] mal 12 [m] zu liegen.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG DER VORUNTERSUCHUNG

Für eine anschaulichere Darstellung sowie zum leichteren Verständnis der Messwerte war eine Transformation der ausgelesenen Daten in die SI-Einheit der Beschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ] notwendig. Die dafür vorhandene Transformationsgleichung (Formel 6) wurde von Wally (o.J.) zur Verfügung gestellt. Werte der vertikalen Beschleunigungen nach unten erhalten dadurch ein negatives Vorzeichen, während Beschleunigungen nach oben als positive Werte erhalten bleiben. Aufgrund des Abschattungseffektes war es nicht möglich alle Änderungen der Oberflächenstruktur mit GPS Daten festzulegen. Die Grenzen der unterschiedlichen Strukturen wurden mit Hilfe der Ruhewerte der Beschleunigungssensoren ausgewiesen.

## 7 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT UND VERTIKALBESCHLEUNIGUNG

Unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten werden durch Beschleunigungswerte in vertikaler Richtung charakterisiert. Folgende Hypothesen sollen untersucht werden:

- Je rauer die Oberfläche ist bzw. je stärker die Erschütterungen sind, die auf den Sensor einwirken, desto größer werden die vertikale Beschleunigungen sowie die Beschleunigungsunterschiede.

- Je höher die Geschwindigkeit ist, desto stärker wirken sich Unebenheiten in der vertikalen Beschleunigung aus.
- Je höher der Reifendruck ist, desto stärker wirken sich Unebenheiten in der vertikalen Beschleunigung aus.

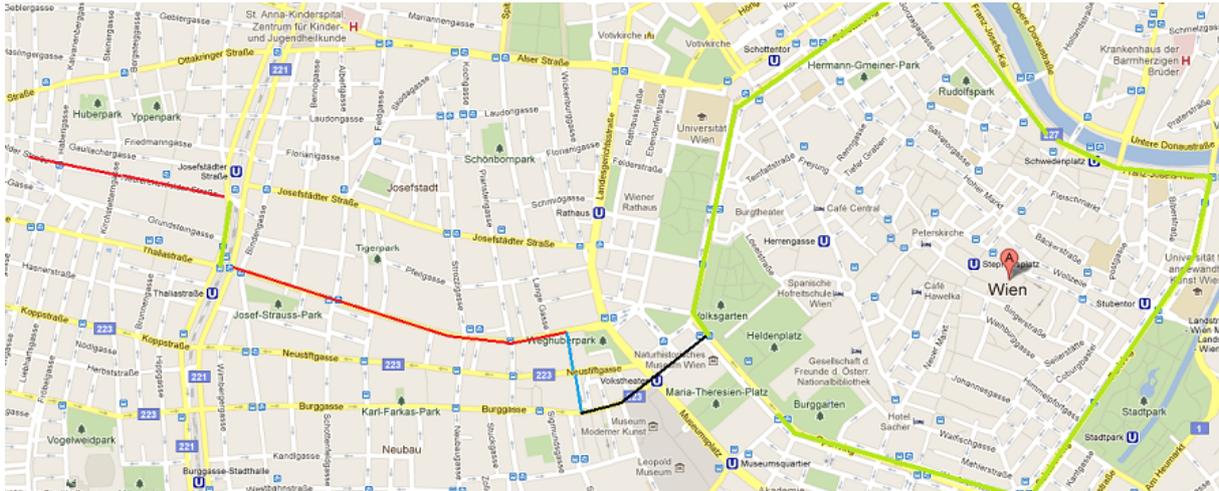
## **8 DATENERHEBUNG**

Basierend auf den Erkenntnissen der Voruntersuchung wurde eine Teststrecke ausgewählt und entsprechende Datenerhebungen durchgeführt. Im Vorfeld mussten folgende Überlegungen getroffen werden:

### **8.1 VORARBEITEN DER MESSFAHRTEN**

#### *8.1.1 ROUTENWAHL*

Hauptaugenmerk bei der Wahl der Route war es, möglichst unterschiedliche Oberflächen zu erfassen. Zugleich sollte es sich um Oberflächen mit besonders guten oder schlechten Beschaffenheiten handeln, Oberflächenabschnitte von Radverkehrsanlagen und weitere Verkehrsinfrastrukturen mit welchen Fahrradfahrer alltäglich konfrontiert sind. Alle Messfahrten wurden entlang der gewählten Route (Abb.: 8-1) durchgeführt. Dadurch können äußere Einflüsse auf die vertikalen Beschleunigungswerte einfacher mit einander verglichen werden. Die äußeren Einflüsse ergeben sich aus der Wahl unterschiedlicher Fahrradtypen sowie der Wahl unterschiedlicher Geschwindigkeiten.



**Abbildung 8-1:** Gewählte Route  
Quelle der Kartendarstellung: Google Maps

- Oberfläche**
- Fahrbahnplatten des Gleiskörpers
  - Asphalt (Straße)
  - Pflasterstein
  - Asphalt (Radweg)

Die Route beginnt in der Neulerchenfelderstraße Ecke Lindauergasse. Von hier führt sie stadteinwärts bis zum Gürtel. Dort folgt sie über einen kurzen Abschnitt dem Gürtelradweg bis zur Thaliastraße und biegt in die Lerchenfelderstraße, Richtung Zentrum ein. Kurz vor Erreichen der Museumsstraße lenkt die Route rechts von der Lerchenfelderstraße ab in die Mechitaristengasse und führt über die Neustiftgasse entlang der Faßziehergasse bis zur Burggasse hinauf. Ab hier folgt die Route der Burggasse und der Bellariastraße hinunter bis zum Volksgarten. Abgeschlossen wird die Strecke mit einer Ringrunde entlang des dort vorhandenen Radweges.

Die Länge der gesamten Strecke beträgt 7,7 [km]. Eine Beschreibung der befahrenen Straßen ist in der Übersichtstabelle (Tab.: 8-1) zu sehen. Die Abbildungen 8-2 bis 8-5 dienen zur Veranschaulichung der befahrenen Oberflächen.

**Tabelle 8-1:** Übersichtstabelle der befahrenen Straßen mit Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit.

<b>Übersichtstabelle</b>			
<b>[km]</b>	<b>Straße</b>	<b>Art der Radverkehrsanlage</b>	<b>Art der befahrenen Oberfläche und deren Beurteilung</b>
0,65	Neulerchenfelder Str.	Öffentliche Straße	Gleiskörper 3
0,25	Lerchenfelder Gürtel	Radweg	Asphalt 1
1,1	Lerchenfelder Straße	Öffentliche Straße	Gleiskörper 3
0,14	Mechitaristengasse	Öffentliche Straße	Großsteinplaster 5
0,18	Faßziehergasse	Öffentliche Straße	Großsteinplaster 5
0,26	Burggasse	Öffentliche Straße	Asphalt 2 / 3
0,26	Bellariastraße	Öffentliche Straße	Asphalt 3
4,9	Ring Radweg	Radweg	Asphalt 2 / 3



Abbildung 8-2: Gleiskörper



Abbildung 8-3: Radweg



Abbildung 8-4: Pflasterstein



Abbildung 8-5: Asphalt

Für die Auswertung wurden in einem Wegetagebuch zusätzliche Informationen protokolliert. Im späteren Verarbeitungsprozess der Daten war es sehr hilfreich zu wissen, wo ein Wechsel der Oberfläche stattfand, oder warum es an einer bestimmten Stelle zum Beispiel zu einem Stopp kam.

### 8.1.2 VERWENDETE FAHRRÄDER

Um den Einfluss des Fahrrades zu erheben, wurde die gewählte Teststrecke mit zwei unterschiedlichen Fahrrädern (Mountainbike und Rennrad) befahren. Die wesentlichen Unterschiede dieser Verkehrsmittel waren die Bereifung und der damit verbundene Reifendruck. Weiters war das Mountainbike mit einer gedämpften Vordergabel ausgestattet. Die erste Befahrungsserie wurde mit dem Rennrad durchgeführt. Der

Reifendruck betrug 7 [bar]. Die zweite Befahrungsserie wurde mit dem Mountainbike unternommen. Hier betrug der Reifendruck 3,5 [bar].

Bei einer visuellen Auswertung der Messdaten war davon auszugehen, dass sich die Darstellungen der Messwerte in ihrer Form sehr ähnlich sein werden. Der wesentliche Unterschied wurde in der Intensität der Ausschläge der vertikalen Beschleunigung erwartet. Die größten Beschleunigungsspitzen waren von der Messserie des Rennrades (Abb.: 8-6) zu erwarten. Dieses Fahrrad weist neben dem höheren Reifendruck auch eine steifere Rahmengeometrie auf. Im Gegensatz dazu bot das Mountainbike (Abb.: 8-7) ein weitaus weiches Gesamtkonzept. Dieses beruht auf der Kombination breiterer Reifen mit einem wesentlich geringeren Reifendruck. Neben den sogenannten Ballonreifen war das Mountainbike mit einem Dämpfungssystem an der vorderen Gabel ausgestattet. Es war daher zu erwarten, dass geringere Vertikalbeschleunigung gemessen werden würden. Die Vergleichstabelle der Fahrräder (Tab. 8-2) zeigt eine Gegenüberstellung der angeführten Unterschiede der Beiden Fahrradtypen.



Abbildung 8-6: Rennrad



Abbildung 8-7: Mountainbike

Tabelle 8-2: Vergleichstabelle der Fahrräder

Vergleichstabelle der Fahrräder					
	Rahmenmaterial	Laufraddimension [Zoll]	Reifendruck [bar]	Dämpfungssystem	
				vorne	hinten
Rennrad	Stahl	28	7	-	-
Mountainbike	Aluminium	28	3,5	vorhanden	-

### 8.1.3 WAHL DER GESCHWINDIGKEIT

Die Befahrung der Teststrecke erfolgte mit jedem Fahrradtyp zweimal mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die erste Befahrungsserie "28" beschreibt eine schnelle Befahrung der Strecke und steht in keinem Zusammenhang mit der Laufraddimension von 28 Zoll aus der Tabelle 8-2. Die mittlere Bewegungsgeschwindigkeit betrug 28 [km/h], sofern es der Verkehrsfluss als auch die Verkehrssicherheit zu lies. Für die zweite Befahrungsserie "20" kamen ebenfalls beide Fahrradtypen zum Einsatz. Die Geschwindigkeit war hier wesentlich geringer. Sie betrug unter Berücksichtigung aller Verkehrsregeln sowie des gegebenen Verkehrsflusses 20 [km/h]. Eine Zusammenfassung der Befahrungsserien ist in Tabelle 8-3 zu sehen.

**Tabelle 8-3:** Befahrungsserien mit zwei Fahrrädern und zwei Geschwindigkeiten

Befahrungsserien		
	Befahrungsserie 28 [km/h]	Befahrungsserie 20 [km/h]
Renntag (RR)	28 RR	20 RR
Mountainbike (MTB)	28 MTB	20 MTB

### 8.1.4 ANORDNUNG DER MESSGERÄTE

Die Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit werden durch vertikale Beschleunigungswerte beschrieben. Zur Aufzeichnung des Verlaufes der vertikalen Beschleunigungen, wurden zwei Messgeräte verwendet. Beim Renntag wurde jeweils ein Gerät auf einem Gepäckträger über dem Vorderrad (Abb. 8-8) und dem Hinterrad (Abb. 8-9) montiert. Bei dem verwendeten Mountainbike war die Montage eines Gepäckträgers über dem Vorderrad nicht möglich. Um auch hier ein zweites Messgerät fixieren zu können, wurde eine Konsole (Abb. 8-10) am Lenkervorbau angebracht. Neben den Einflüssen der Fahrräder sowie der Geschwindigkeit, galt es den Unterschied der vertikalen Beschleunigungswerte von Hinter- und Vorderrad zu analysieren. Ausschlaggebend dafür waren folgende Überlegungen.

Bei sitzender Position erfährt das Hinterrad eine weit höhere Auflast als das Vorderrad. Durch diese Belastung der Hinterachse wirkt der menschliche Körper wie ein Dämpfungselement für die vertikalen Bewegungen.

Anders sieht es bei der Vorderachse aus. Durch die geringere Belastung sollte das Vorderrad wesentlich sensibler auf Unebenheiten der Oberfläche reagieren. Um diese Überlegung zu untersuchen, war es notwendig pro Fahrrad mit zwei Messeinheiten zu arbeiten.



Abbildung 8-8: Vorderrad



Abbildung 8-9: Hinterrad



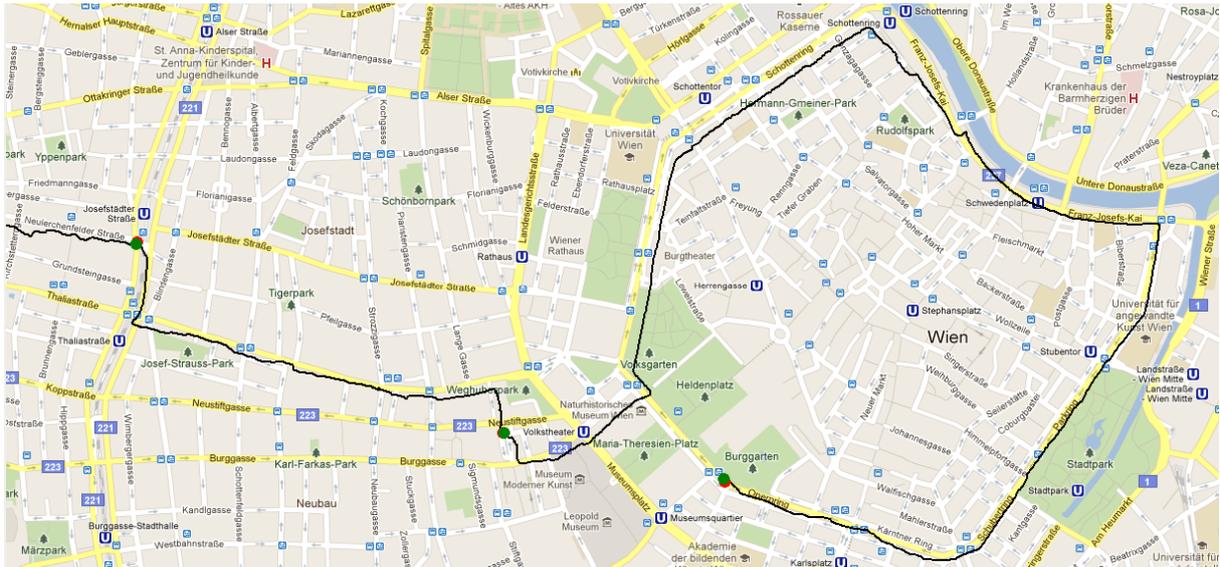
Abbildung 8-10: Konsole

## 8.2 MESSFAHRTEN

Die gewählte Route (Abb. 8.1) wurde insgesamt viermal befahren. Die Befahrungen fanden jeweils am Nachmittag statt. Dabei kamen zweimal das Rennrad und zweimal das Mountainbike zum Einsatz. Um die Datensätze bei der Auswertung von einander zu unterscheiden, wurden die Befahrungsserien mit "28" und "20" definiert. "28" beschreibt durchschnittlich höheren Geschwindigkeiten während "20" für durchschnittlich niedrigere Geschwindigkeiten steht (Tab. 8-2). Zu Beginn der Fahrt

wurde der GPS – Empfänger aktiviert. Es musste einige Minuten gewartet werden. In diesem Zeitraum suchten die Empfangsgeräte nach verfügbaren Satelliten. Die Wartezeit konnte durch das vorzeitige Hochladen der Almanachdaten wesentlich verkürzt werden. Waren genügend Satelliten zur Lagebestimmung gefunden, begann ein grünes Licht zu leuchten.

Während der Messfahrt konnte die Abschattung des Empfängers jederzeit eintreten. Um sicher zu sein in der Auswertung Änderungen von Oberflächenstrukturen ohne GPS Daten zu erkennen, wurde am Ende jeder charakteristischen Bodenbeschaffenheit Halt gemacht. Durch das Stehenbleiben fanden keine vertikalen Bewegungen statt. Der Sensor zeichnete in diesem Fall den Ruhewert der vertikalen Beschleunigung auf. Dieser war in der Datenmenge der Aufzeichnung leicht zu finden. Der Ruhewert liegt in der nicht umgerechneten Form bei 180. Eine über einen längeren Abschnitt verlaufende Reihe von Werten der Größe 180 wies eindeutig auf einen Stopp hin. Die Stehzeit wurde zugleich für Einträge in das Wegetagebuch genutzt. Neben Uhrzeit, mittlerer Bewegungsgeschwindigkeit und Art des Untergrundes des vorherigen Abschnittes, wurde auch die genaue Adresse protokolliert. Etwaige Abweichungen von der geplanten Strecke oder erzwungene Stopps wurden ebenfalls schriftlich festgehalten. Entlang der Strecke kam es auf Grund umstehender Gebäude oder Bäume abschnittsweise zu Abschattungen des Empfängers. Diese führten in weiterer Folge zu kurzzeitigen Unterbrechungen des Satellitensignales. Auf die Datenerfassung des Beschleunigungssensors hatten diese Störungen keine Einwirkung. Beide Messeinrichtungen des Gerätes sind von einander entkoppelt. Es erfolgte eine permanente Aufzeichnung der Beschleunigungswerte. Trotz der kurzzeitigen Unterbrechungen des Satellitensignals wurde die befahrene Route für die weiterführende Auswertung ausreichend gut dargestellt. Das folgende Bild (Abb. 8-11) veranschaulicht dies.



**Abbildung 8-11:** Darstellung der Route mit GPS – Daten  
Quelle der Kartendarstellung: Google Maps

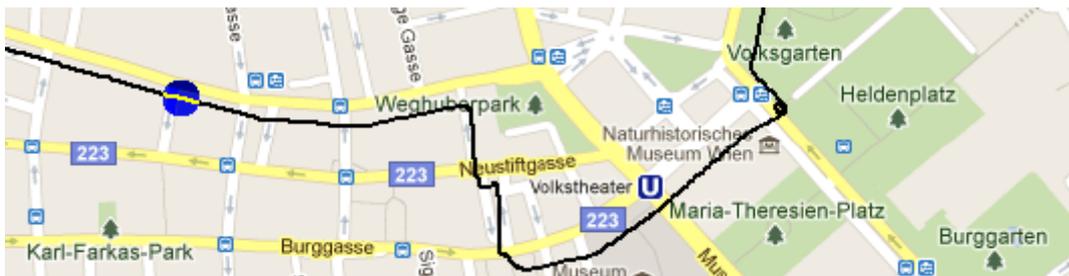
## 9 DARSTELLUNGSFORMEN DER MESSWERTE

### 9.1 DARSTELLUNGSFORMEN DER MOBITEST SOFTWARE

Die GPS – und Beschleunigungswerte sowie weitere Informationen können direkt in einen PC eingelesen werden. Vor dem Übermitteln der Daten ist das Messgerät auszuschalten. Zum Überspielen der Daten benötigt man ein USB Kabel, wie etwa das Einspielen der Almanachdaten, in das Messgerät. Mit Hilfe einer bereits am Notebook installierten Software, mit dem Namen Mobitest, können die heruntergeladenen Dateien geöffnet werden. Neben der Speicherung von Daten ist das Programm Mobitest auch in der Lage, Daten auszuwerten und darzustellen. Das Hauptfenster ist wie folgt aufgeteilt. Links findet sich ein Kalender. Hier zeigen fett gedruckte Zahlen jene Tage an, an denen gemessen wurde.

Rechts vom Kalender findet sich eine Zusammenfassung aller Tage an denen gemessen wurde. Es können nur jene Messtage angezeigt werden, die noch im Speicher vorhanden sind. Mit einem Gerät können mehrere Messfahrten protokolliert werden. Eine Zuordnung der Informationen ist an Hand des Datums möglich. Ein weiteres Fenster gibt einen statistischen Überblick für jeden gespeicherten Messtag an.

Mittels der GPS – Daten wurde der zurückgelegte Weg digitalisiert und konnte im entsprechenden Programm durch die Funktion Kartenübersicht dargestellt werden. Als Hintergrund diente dabei eine Google Maps Karte (Abb. 9-1) auf der die GPS – Daten als schwarze Linie gezeigt werden. In der Kartenansicht kann die Befahrung der Strecke simuliert werden, dabei zeigt ein blauer Punkt den Standort des Empfängers an. Zugleich werden auch elf standortbezogene Informationen angegeben. An erster Stelle dieser Informationen steht die Punkt ID. Ein Abgleich zwischen der Zahlenreihe der Messwerte aus der EXCEL Tabelle (Tab. 9-1) und der Daten der Karte (Abb. 9-2) ist an Hand der ID – Zählung möglich. Die ID – Zählung ist eine vom Messgerät selbstständig durchgeführte, fortlaufende Durchnummerierung aller aufeinanderfolgenden Messdaten.



**Abbildung 9-1:** Ausschnitt der Google Maps Karte mit Standortmarkierung (Blauer Punkt); Quelle der Kartendarstellung: Google Maps

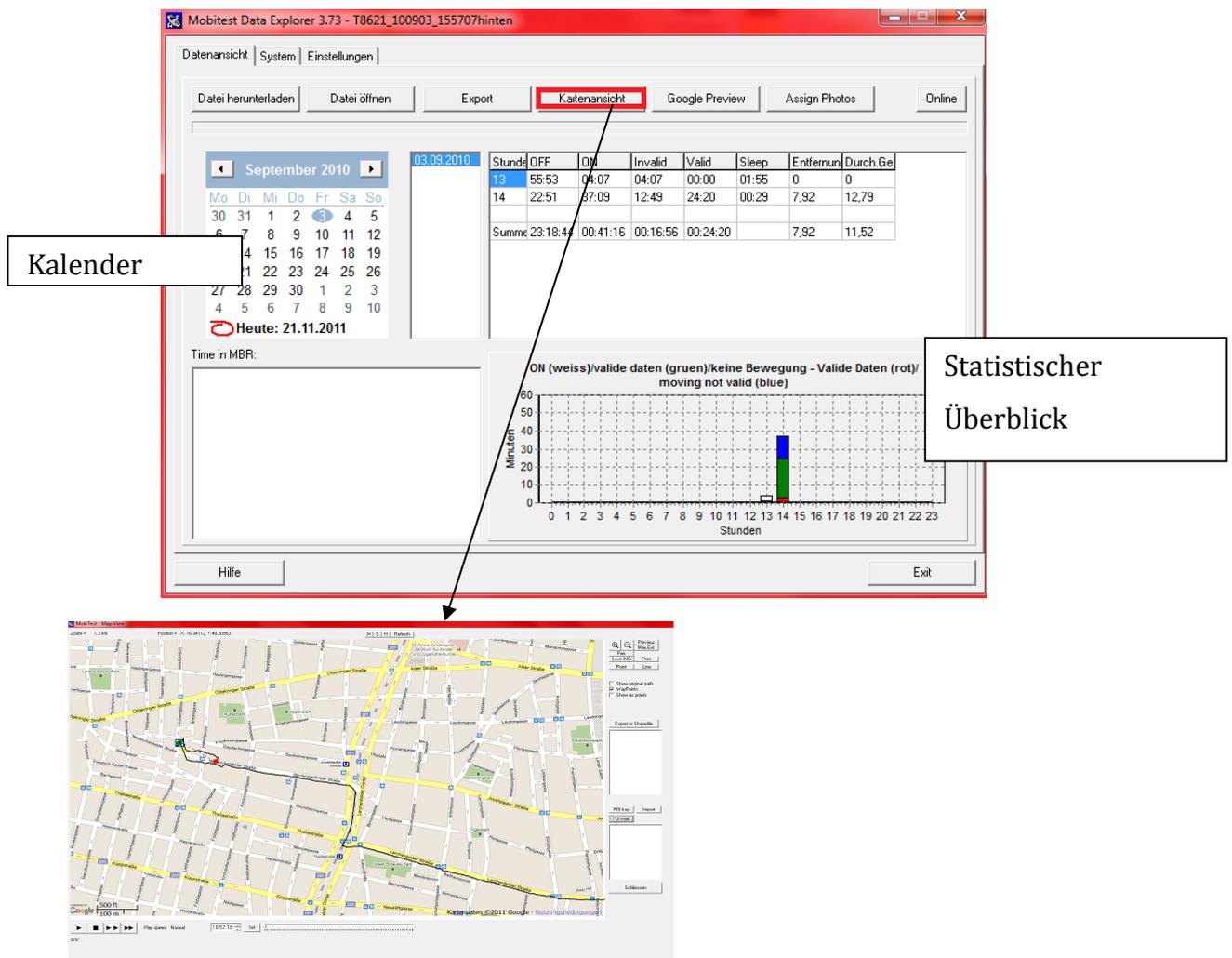


**Abbildung 9-2:** Daten der Kartenansicht  
Quelle der Kartendarstellung: Google Maps

**Tabelle 9-1:** Ausschnitt der Zahlenreihe der Messwerte

ID	TDATE	TTIME	LONG	LAT	SATS
3129	29.04.2011	08:22:09	16,3477380	48,2067024	7

Die für die Auswertung wichtigste Funktion ist die Kartenansicht. Wird im Programm Mobitest der Button Kartenansicht betätigt, wird die zurückgelegte Strecke angezeigt (Abb. 9-3). Mobitest ermöglicht in der Kartenansicht neben der simulierten Befahrung der Strecke das Verschieben der Karte sowie das Verkleinern oder Vergrößern.



**Abbildung 9-3:** Daten und Kartenansicht in Mobitest MGE Data Prag, Quelle der Kartendarstellung: Google Maps

## 9.2 DARSTELLUNGSFORM ALS MTD UND MTA DATEIEN

Der zweite Teil der ausgelesenen Informationen bestand aus den zwei Dateitypen MTD und MTA. Je nach Fragestellung können diese Dateitypen als sich ergänzende, oder für sich allein stehende Informationsträger verwendet werden. Entsprechend der Zielsetzung werden die Dateien als sich ergänzende Rohdatensätze herangezogen. Ohne weitere Vorarbeiten ist es möglich sie mit dem Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL zu öffnen. Beide Dateien beinhalten die Messwerte des Beschleunigungssensors. Dabei beinhalten die MTD Dateien (Tab. 9-2) die sekundlichen Beschleunigungswerte der 1 [Hz] Messung und zusätzlich Informationen der GPS Messung wie z.B: Koordinaten, GPS-Datum und Zeit sowie die Zeit der Empfängeruhr. Tabelle 6 beschreibt den Beginn einer Messfahrt mit dem Rennrad bis zur 21. Sekunde. Dabei befand sich der Sensor über dem Hinterrad.

**Tabelle 9-2:** Messprotokoll (MTD Datei) einer 1 [Hz] getakteten Beschleunigungsmessung

	A	B	C	D	E	J	K	M	S	U	V	W	X
1	ID	PWR	LONG	LAT	HEIGHT	GPSDATE	GPSTIME	TTIME	DIST	TIMEDIFF	XACC	YACC	ZACC
2	0	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:36	13:56:36	0,0000	0	127	145	188
3	1	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:37	13:56:37	0,0000	0	132	138	180
4	2	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:38	13:56:38	0,0000	0	134	136	179
5	3	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:39	13:56:39	0,0000	0	134	136	179
6	4	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:40	13:56:40	0,0000	0	134	136	179
7	5	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:41	13:56:41	0,0000	0	134	136	179
8	6	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:42	13:56:42	0,0000	0	134	136	179
9	7	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:43	13:56:43	0,0000	0	134	136	179
10	8	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:44	13:56:44	0,0000	0	134	136	180
11	9	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:45	13:56:45	0,0000	0			
12	10	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:46	13:56:46	0,0000	0			
13	11	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:47	13:56:47	0,0000	0			
14	12	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:48	13:56:48	0,0000	0			
15	13	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:49	13:56:49	0,0000	0			
16	14	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:50	13:56:50	0,0000	0			
17	15	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:51	13:56:51	0,0000	0			
18	16	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:52	13:56:52	0,0000	0			
19	17	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:53	13:56:53	0,0000	0			
20	18	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:54	13:56:54	0,0000	0	134	136	180
21	19	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:55	13:56:55	0,0000	0	134	136	180
22	20	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:56	13:56:56	0,0000	0	134	136	180
23	21	1	15,4535679	47,0904866	487,96	03.09.2010	11:56:57	13:56:57	0,0000	0	134	136	180

Daten der Beschleunigungssensoren  
XACC, YACC,  
ZACC

In Tabelle 9-2 beginnt die ID – Zählung bei 0 und steigt kontinuierlich an. Bei der MTD - Datei steht eine ID für eine Wertezeile, da eine Messung pro Sekunden stattfindet. Dies entspricht einer 1 [Hz] getakteten Messung. Die Koordinaten bleiben unverändert. Daher zeigt die Distanzmessung keine Änderung. Der Sensor wurde seit dem

Einschalten nicht bewegt. Die letzten drei Spalten ganz rechts beinhalten die Beschleunigungswerte der X, Y und Z nach Geräterichtung. Sie verzeichnen keine Änderungen. Wie in den Voruntersuchungen bereits besprochen liegt der Ruhewert der vertikalen Beschleunigung bei 180.

Durch die Schräglage des Fahrrades (Abb. 9-4) messen die mit dem Fahrrad verbundenen Sensoren nicht Beschleunigungen in Vertikal- und Horizontalrichtung. Es muss von "Hoch", "Quer" und Längsbeschleunigungen (Tab. 9-3) gesprochen werden.

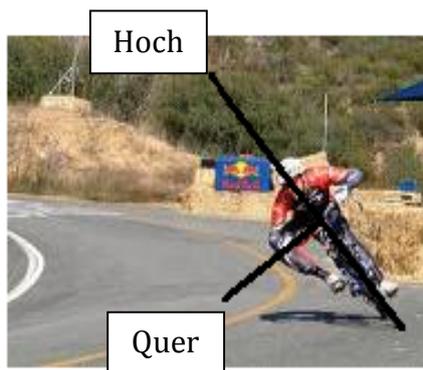


Abbildung 9-4: Raumrichtungen

Tabelle 9-3: Definitionen der Raumrichtungen

Geräterichtungen	Raumrichtung in der Auswertung
XACC	Längs
YACC	Quer
ZACC	Hoch

In Tabelle 9-4 ist ein Auszug der MTA – Dateien zu sehen. Hier werden die ersten drei Sekunden einer Messfahrt betrachtet. Die Messtaktung entspricht 10 [Hz]. Außer der ID-Zählung und den Beschleunigungswerten in alle drei Raumrichtungen des Messgerätes werden keine weiteren Informationen wiedergegeben. Der wesentliche Unterschied beider Dateitypen ist bei der Aufzählung der ID zu finden. Bei der MTA – Datei gilt eine ID für 10 Wertezeilen, da 10 Messungen pro Sekunden stattfinden. Dies entspricht einer 10 [Hz] getakteten Messung. Um in weiterer Folge die Oberflächen beurteilen zu können, liegt das Hauptaugenmerk bei den Beschleunigungswerten der Hochrichtung (ZACC) der MTA - Dateien. Für alle weiteren statistischen Rechenschritte wurden die Daten der 10 [Hz] Taktung herangezogen.

**Tabelle 9-4:** Messprotokoll (MTA Datei) einer 10 [Hz] getakteten Beschleunigungsmessung

	A	B	C	D
1	ID	XACC	YACC	ZACC
2	1	114	124	174
3	1	111	125	171
4	1	111	123	180
5	1	117	125	182
6	1	127	119	171
7	1	125	117	178
8	1	114	135	166
9	1	115	134	171
10	1	120	137	181
11	1	127	145	188
12	2	125	154	192
13	2	130	141	186
14	2	136	145	178
15	2	131	137	181
16	2	131	137	179
17	2	130	139	180
18	2	132	139	179
19	2	132	138	180
20	2	132	138	180
21	2	132	138	180
22	3	137	140	179
23	3	135	136	179
24	3	134	135	179
25	3	134	136	179
26	3	134	137	179
27	3	134	136	179
28	3	134	136	179
29	3	134	136	179
30	3	134	136	179
31	3	134	136	179

## 10 AUFBEREITEN DER ROHDATEN

Für die Auswertung wurden nur die Beschleunigungswerte der Hochrichtung (ZACC) herangezogen und auch aufbereitet. Die Beschleunigungswerte der X und Y-Richtung waren für die Oberflächenbeurteilung nicht von Interesse.

Die Hauptaufgabe der Aufbereitung lag in der Plausibilitätskontrolle der Rohdaten. Es war zu überprüfen ob der Beschleunigungssensor auch wirklich richtig gearbeitet hat. Es zeigten sich folgende Fehler:

- 0 Fehler
- Ruhefehler
- Auslesefehler

Die zweite Aufgabe der Datenaufbereitung lag in der Transformation (Formel 6).

Für alle weiteren statistischen Berechnungen und Darstellungen wurden ausschließlich die transformierten Daten herangezogen.

### 10.1 "NULL" FEHLER

Der offensichtlich falsche Messwert "0" ist aus den Messdaten aus zu filtern.

Er stellte sich häufig kurz nach der Aktivierung des Gerätes ein, war aber auch während längeren Stopps und vereinzelt während der Fahrten in den Aufzeichnungen zu finden.

Befindet sich das Gerät in Ruhe, liegt bei senkrecht stehendem Fahrrad der dementsprechende Ruhewert der z – Richtung bei 180. Der Null Fehler ist dadurch gekennzeichnet, dass ohne weiters Zutun der Wert von 180 auf 0 abfällt. Für wenige Zehntelsekunden wird 0 gespeichert. Nach dieser kurzen Zeitspanne springt der Messwert wieder auf den Ruhewert zurück. Während der Fahrt trat der 0 Fehler selten auf. Im Vergleich zur Ruhephase trat er hier nur jeweils für eine Zehntelsekunde auf. Es ist für die Nullwerte bei Stopps und während der Fahrt auszuschließen, dass es sich bei den aufgezeichneten Werten um tatsächliche Messwerte, bedingt durch die Oberflächenbeschaffenheit, handelt. Das würde einer Vertikalbeschleunigung nach unten von  $-33,9 \text{ [m/s}^2\text{]}$  entsprechen.

Um eine sinnvolle statistische Auswertung zu ermöglichen, mussten diese Fehler korrigiert werden. Fehler während der Ruhephase benötigten keine Korrektur. Diese Abschnitte tragen nicht zur Oberflächenbeurteilung bei. Die Korrektur betraf die Nullwerte während der Fahrt.

Es wurden fehlerhafte Werte durch den Mittelwert des vorhergehenden und des nachfolgenden Messwertes ersetzt (Tab. 10-1).

Berechnung des arithmetischen Mittels:

$$(217 + 181) / 2 = 199$$

Tabelle 10-1: Korrekturmaßnahme

ID	XACC	YACC	ZACC		ID	XACC	YACC	ZACC	
248	123	125	134		248	123	125	134	
248	126	123	200		248	126	123	200	
248	118	152	119		248	118	152	119	
248	137	107	217		248	137	107	217	
248	137	107	0	Fehler	248	137	107	199	ergänzt
248	123	124	181		248	123	124	181	
248	129	129	185		248	129	129	185	
248	113	142	161		248	113	142	161	
248	135	129	159		248	135	129	159	
248	124	100	180		248	124	100	180	

## **10.2 RUHEFEHLER**

Dieser Fehler trat während aller Erhebungsfahrten nur einmal auf. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass im bewegten Zustand der Ruhewert von 180 über mehrere Minuten hinweg aufgezeichnet wurde. Vor und nach dieser Störung arbeitete der Sensor einwandfrei. Die fehlerfreien Daten konnten für die weitere Berechnungen herangezogen werden. Die Korrektur des fehlerhaften Abschnittes erfolgte durch eine Neubefahrung. Weshalb der Fehler auftrat konnte nicht geklärt werden. Da es sich um ein einmaliges Ereignis handelte ist davon auszugehen das es sich dabei um einen gerätespezifischen Ausfall der Datenerfassung handelte.

## **10.3 AUSLESEFEHLER**

Beim Versuch, die Daten einer Messfahrt auf das Notebook zu überspielen, war es nicht möglich auf diese zuzugreifen. Somit waren sämtliche Daten dieser Messfahrt verloren. Die Korrektur bestand darin diese Messfahrt mit einer anderen Messeinheit zu wiederholen. Das defekte Gerät musste zum Hersteller zurückgesendet werden. Der Auslesefehler trat während der gesamten Erhebungen einmal auf.

## **11 AUFBEREITETE DATENSÄTZE**

Mit den aufbereiteten Datensätzen konnten statistische Analysen durchgeführt werden. Dank der Voruntersuchungen war es an diesem Punkt auch möglich, zwischen vertikalen Aufwärts- und Abwärtsbeschleunigungen zu unterscheiden. Entsprechend der abschnittweisen Datenaufnahme erfolgte auch eine abschnittsweise Auswertung der Daten. Wie unter dem Punkt 8.1.1 Routenwahl Abbildung 8-1 zu erkennen ist, beinhaltet die Strecke vier grundsätzlich unterschiedliche Oberflächenstrukturen. Die mehrfach vorkommenden Abschnitte mit der Strukturbenennung " Fahrplatten des Gleiskörpers" und "Asphalt" wurden nicht zusammengefasst. Somit erfolgte eine Unterteilung der Datensätze in fünf Abschnitte:

- Neulerchenfelderstrasse, Fahrplatten des Gleiskörpers
- Gürtelradweg, Asphalt
- Lerchenfelderstrasse, Fahrplatten des Gleiskörpers
- Mechitaristengasse und Faßziehergasse, Pflasterstein
- Burggasse, Asphalt

### 11.1 T-TEST

Die unter 8.1.4 angeführte Überlegung, das Vorderrad würde auf Oberflächenunebenheiten sensibler reagieren, wurde mit den Daten der Hochbeschleunigung untersucht. Dabei erfolgte ein Vergleich der aus den Messeinheiten ausgelesenen Beschleunigungswerte. Als statistisches Werkzeug wurde der T-Test verwendet. Bei den Fahrten mit dem Fahrrad kann davon ausgegangen werden, dass die Beschleunigungssensoren in der Nähe des Vorder- und Hinterrades die gleichen Untergrundverhältnisse aufgezeichnet haben, allerdings zeitversetzt. Dementsprechend wäre es vordergründig, den T-Test mit gepaarten Variablen durchzuführen. Die Variablen wurden wegen des räumlichen und zugleich zeitlichen Versatzes als unabhängig betrachtet. Grund dafür war die Montage der Messeinheiten am Fahrrad. Somit waren sie etwa 1,1 [m] räumlich voneinander getrennt (Vorderrad / Hinterrad). Daher mussten die Variablen als unabhängig betrachtet werden. Eingangsgrößen dieses statistischen Verfahrens waren die bereits aufbereiteten Messwerte der Hochbeschleunigung aller Streckenabschnitte von Vorderrad und Hinterrad beider Fahrradtypen. Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten war es nötig sämtliche Messwerte in Form von Absolutwerten anzugeben. Ziel des T-Testes war es zu belegen, ob die beider Messreihen, die von Hinterrad und Vorderrad stammen, signifikant unterschiedliche Ergebnisse gebracht haben.

Aufstellen der Hypothesen:

$$H_0 \dots \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 \dots \mu_1 \neq \mu_2 (\mu_1 < \mu_2 \text{ oder } \mu_1 > \mu_2)$$

$\mu_1$  = Mittelwerte des Vorderrades

$\mu_2$  = Mittelwerte des Hinterrades

Die Durchführung des T-Testes erfolgte mit dem statistischen Rechenprogramme SPSS. Tabelle 11-1 zeigt die Gruppenstatistik. Gruppe 1 steht für die Messwerte des Vorderrades und Gruppe 2 repräsentiert die Messwerte des Hinterrades. Bei der Betrachtung der Mittelwerte und Standardabweichungen kann von einer Differenz der beiden Verteilungen ausgegangen werden. Eine Aussage über die Größe dieses Unterschiedes kann hier noch nicht getroffen werden. Dies ermöglicht Tabelle 11-2.

**Tabelle 11-1:** Gruppenstatistik

Gruppe	Anzahl der Variablen	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
1	264	-1,7290	2,45943	,15137
2	260	-1,3090	2,10419	,13050

Tabelle 11-2 beinhaltet die Ergebnisse zweier Tests. Der Levene-Test prüft ob die Varianzen der Messreihen gleich oder ungleich sind. Bei einer Signifikanz  $< 0,005$  wird von einer Ungleichheit der Varianzen gesprochen. In diesem Fall ergab sich eine Signifikanz von 0,006. Dieser Zahlenwert spricht nicht für ein eindeutiges Ergebnis und muss daher in Kombination mit dem Ergebnis des T-Testes Sig. (2-seitig) betrachtet werden. Der Sig. (2-seitig)-Wert ist hier sowohl für gleiche als auch ungleiche Varianzen mit einem Zahlenwert von 0,017 vertreten. Dieses Ergebnis zeigt, dass wenn davon ausgegangen wird das sich die Varianzen der Messreihen unterscheiden, die Wahrscheinlichkeit eines Irrtums 1,7 [%] beträgt. Das bedeutet die Wahrscheinlichkeit eines Unterschiedes beträgt 98,3 [%]. Somit konnte ein signifikanter Unterschied der Hochwerte der über den Vorderrad und Hinterrad montierten Messsensoren festgestellt werden. In Tabelle 11-1 sind bei der Betrachtung von Mittelwert und Standardabweichung in Gruppe 1 betragsmäßig höhere Werte anzutreffen als in

Gruppe 2. Dies weist darauf hin, dass das Vorderrad sensibler auf die Oberflächenbeschaffenheit reagierte als das Hinterrad. Auf Grund des etwas gedämpfteren Verhaltens des Hinterrades wurde für die weitere Untersuchung, statistische Berechnung und Gestaltung eines Modells nur das Hinterrad betrachtet.

**Tabelle 11-2:** Ergebnisse des Testes bei unabhängigen Stichproben

	Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
	F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
								Obere	Untere
Varianzen sind gleich	7,496	,006	2,396	522	<b>,017</b>	,44313	,18494	,07981	,80645
Varianzen sind nicht gleich			2,399	512,63	<b>,017</b>	,44313	,18473	,08022	,80604

## 11.2 BEFAHRUNGSKOMBINATIONEN

Die Befahrung der fünf Streckenabschnitte erfolgte mit zwei Fahrradtypen und zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Formel 7). Tabelle 11-3 zeigt die Befahrungskombinationen.

Befahrungskombination

$$5 \text{ (Abschnitte)} \times 2 \text{ (Geschwindigkeiten)} \times 2 \text{ (Fahrradtypen)} \times 1 \text{ (Sensor)} = 20 \text{ Datensätze} \quad (7)$$

**Tabelle 11-3:** Befahrungskombinationen; RR Rennrad; MTB Mountainbike; H Hinterrad (28 und 20 km/h)

Befahrungskombinationen	
28 RR H	20 RR H
28 MTB H	20 MTB H

## 12 MITTELWERT

Ziel war es, innerhalb der 20 Datensätze eine Verknüpfung zwischen den Messwerten der Hochbeschleunigung und der befahrenen Oberfläche zu erzeugen bzw. zu finden.

Dabei sollte sich bei einer unebenen Oberfläche ein stärkerer Ausschlag der Hochbeschleunigungen ergeben als bei einer ebenen Oberfläche.

Um dies zu zeigen wurde innerhalb der Datensätze ein gleitender Mittelwert berechnet.

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse dient ein Teilstück der Route als

Beispiel (Abb. 12-1). Es handelt sich dabei um den Streckenabschnitt Faßziehergasse im Übergang zur Burggasse.

Gewählt wurde dieser Bereich, da es einen Wechsel in der Oberflächenbeschaffenheit gibt. Es kommt hier zum Übergang von Pflastersteinen auf Asphalt. Im Verlauf der gesamten Messstrecke trat hier der markanteste Strukturwechsel auf.

### 12.1 GLEITENDER MITTELWERT

Die maximale Differenz von positiven und negativen Werten der Hochbeschleunigung trat im Streckenabschnitt der Faßziehergasse auf. Die dort erreichten Beschleunigungswerte erstrecken sich über einen Bereich von  $-25 \text{ [m/s}^2\text{]}$  bis  $10 \text{ [m/s}^2\text{]}$ . Das gleitende Mittel wurde für drei unterschiedlich große Zeitfenster berechnet. Die Größe der Zeitintervalle betrug zwei, drei und fünf Sekunden. Diese Zeitspannen ergeben jeweils 20, 30 und 50 Beschleunigungswerte pro Fenster. Die Berechnungen bezogen sich auf die Datensätze der  $10 \text{ [Hz]}$  getakteten Messung. Um den Rechenvorgang leichter zu erfassen, zeigt Tabelle 12-1 einen Ausschnitt des Tabellenkalkulationsprogrammes EXCEL in dem eine Berechnung des gleitenden Mittelwertes für ein Zeitfenster von zwei Sekunden vorgenommen wurde.

Das arithmetische Mittel von  $-7,65 \text{ [m/s}^2\text{]}$  errechnet sich aus den zehn vorstehenden und den zehn nachfolgenden Beschleunigungswerten. In dem das Zeitfenster  $1/10 \text{ [s]}$  weiter nach unten verschoben wurde, ergab sich der nächste Mittelwert von  $-7,82 \text{ [m/s}^2\text{]}$ . Das Prinzip dieser Berechnung wurde auch für die Zeitfenster von drei und fünf Sekunden angewendet.

Am Beginn oder auch am Ende einer Messreihe gibt es für die ersten und letzten 10, 15 und 25 Messwerte keine assoziierten Mittelwerte.

**Tabelle 12-1:** Berechnung des gleitenden Mittelwertes für ein zwei Sekunden Zeitfenster

Zeitfenster 2sec		
Distanz [m]	Hochbeschleunigung [m/sec <sup>2</sup> ]	Mittelwert [m/s <sup>2</sup> ]
17	-3,67	-5,89
17,34	-4,61	-5,57
17,68	-12,55	-6,44
18,02	2,95	-6,46
18,36	-4,61	-6,25
18,7	-11,23	-7,30
19,04	-18,22	-6,96
19,38	-4,99	-6,59
19,72	0,31	-7,55
20,06	-1,40	-7,44
20,4	0,31	-7,01
20,74	-14,82	-7,40
21,08	-17,09	-7,65
21,42	-16,52	-7,82
21,76	-7,07	-7,95
22,1	-16,90	-7,14
22,44	2,76	-7,30
22,78	-6,50	-7,65
23,12	-18,98	-8,30
23,46	4,09	-8,66
23,8	4,84	-9,16
24,14	-12,36	-8,83
24,48	-17,66	-8,31
24,82	-0,45	-7,76
25,16	-7,07	-7,81
25,5	4,84	-7,11
25,84	-21,25	-7,94
26,18	-11,98	-8,07
26,52	-12,74	-6,97

## 12.2 DARSTELLUNG DES GLEITENDEN MITTELWERTES

Die graphische Auswertung der gleitenden Mittelwerte erlaubte eine überlagerte Darstellung der Ergebnisse der drei Zeitfenster in einem Diagramm. Abbildung 12-1 zeigt, dass mit zunehmender Größe der Zeitfenster, eine Glättung einher geht.

Die Werte des gleitenden Mittelwertes für zwei Sekunden (orange) können als Punktwolke interpretiert werden. Im Gegensatz dazu gleichen die Werte des gleitenden Mittelwertes für fünf Sekunden (violett) einer durchgehenden Linie.

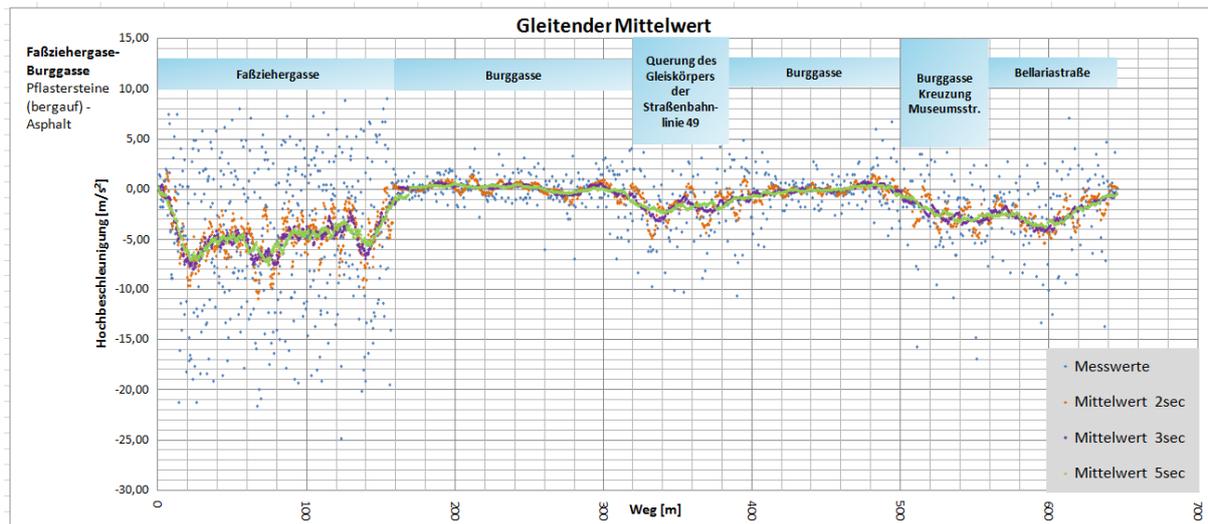


Abbildung 12-1: Darstellung der gleitenden Mittelwerte

Die weit gefächerten Werte der Hochbeschleunigung zu Beginn der ersten 150 [m] wurden durch die in der Faßziehergasse vorhandene Pflasterung der Oberfläche hervorgerufen. Entlang der Burggasse liegen die Mittelwerte aller drei Zeitfenster sehr nahe bei einander. Dies spricht für eine ebene Oberfläche. Tatsächlich handelt es sich hier um einen asphaltierten Straßenabschnitt. Nach etwas mehr als 300 [m] Fahrt kam es zur Querung des Gleiskörpers der Straßenbahnlinie 49. Die Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Mittelwerte weisen in der graphischen Darstellung darauf hin. Danach gleichen die Linien der Mittelwerte jener vor der Querung. Im Bereich der Kreuzung Burggasse und Museumsstraße führten Spurrinnen zu einer Beeinträchtigung der Oberflächenbeschaffenheit. Die dadurch verursachten Erschütterungen sind auch hier gut im Diagramm erkennbar.

### 12.3 ERKENNTNISSE MIT HILFE DES GLEITENDEN MITTELWERTES

Streckenabschnitte mit unebenen Oberflächenbeschaffenheiten weisen hohe negative als auch positive Werte der Hochbeschleunigung auf. Bei glatten Strukturen, wie etwa bei asphaltierten Oberflächen, kommen die Werte nahe unter Null zu liegen. Vereinzelt

sind auch positive Werte zu finden. Übergänge bei denen der Reifen von einer höheren auf eine niedrigere Ebene fällt haben demnach eine größere Auswirkung als umgekehrt.

## **13 MULTINOMIALE LOGISTISCHE REGRESSION**

Man spricht von einer linearen Regression, wenn ein linearer statistischer Zusammenhang zweier Variablen untersucht wird. Oft basieren die Zusammenhänge aber auf mehr denn zwei Variablen. Dann haben mehrere erklärende Variablen Einfluss auf die abhängige Variable (Zielvariable). In diesem Fall nennt man diese statistische Untersuchung multiple lineare Regression. Erklärende Variablen sind hier zum Beispiel der Reifendruck, die Geschwindigkeit oder die Anzahl der Wechsel positiver und negativer Beschleunigungswerte der Hochbewegung innerhalb eines Zeitfensters. Bei einer logistischen Regression ist die abhängige Variable eine binäre Zielvariable. Das bedeutet, sie muss die Attribute wie etwa gut / schlecht, ja / nein oder oben / unten aufweisen. Sie darf aber auch endlich viele Werte annehmen. In der vorliegenden Arbeit repräsentiert die Oberflächengüte die abhängige Variable mit insgesamt fünf Attributen ähnlich dem Schulnotensystem. In den beobachteten Abschnitten wurden nur vier unterschiedliche Oberflächengüten zugewiesen (1, 2, 3, 5).

### **13.1 OBERFLÄCHENBEURTEILUNG MIT HILFE DER MULTIPLER LOGISTISCHER REGRESSION**

Grundidee war es, herauszufinden, welche erklärenden Variablen bzw. welche Kombinationen dieser Variablen die befahrenen Oberflächenbeschaffenheiten der gewählten Route (Abb.: 8-1) am besten beschreiben können. Mit den gewählten Variablen sollte ein grundlegendes statistisches Berechnungsmodell geschaffen werden. In Zukunft sollte es möglich sein, unter Anwendung dieses Modelles, Oberflächengüten nur an Hand der Messdaten der Hochbeschleunigung zu bestimmen.

Zur Erstellung des Modells waren die Oberflächengüten aller Abschnitte bekannt. Unter Anwendung eines statistischen Rechenprogrammes (SPSS) konnte die Übereinstimmung der vorhergesagten Güte und der tatsächlich auftretenden

Oberflächengüte je Abschnitt bestimmt werden. Mit steigender Übereinstimmung der Oberflächengüten stieg auch der damit verbundene Erklärungswert des Modells.

### 13.1.1 ERKLÄRENDE VARIABLEN

Ausgehend von den Basisvariablen Geschwindigkeit, Reifendruck und Hochbeschleunigung ergaben sich in Summe 47 erklärende Variablen pro gewähltem Zeitfenster (5 und 10 Sekunden). Tabelle 13-2 zeigt die Zusammenfassung aller erklärenden Variablen für das Zeitfenster von 5 Sekunden. Darunter befinden sich Maximalwert der Hochbeschleunigung (Tab. 13-2, Nr.:9), die Differenz von Maximalwert zu Minimalwert der Hochbeschleunigung (Tab. 13-2, Nr.:22) und der Wechsel (Tab. 13-2, Nr.:35).

Aufgabe des Modells sollte es sein die Oberflächengüten zu beurteilen, und das möglichst unbeeinflusst von Geschwindigkeit und Reifendruck. Um den Effekt der Beiden Variablen zu minimieren, durften diese nicht direkt in die Modellberechnung einfließen. Geschwindigkeit und Reifendruck wurden in Form eines Multiplikators sowie eines Divisors der oben angeführten Variablen (Nr.: 9, 22 und 15) in die Modellierung mit einbezogen. Um nicht nur den linearen Einfluss zu berücksichtigen wurden die Werte der Geschwindigkeit und des Reifendrucks quadriert und logarithmiert. Tabelle 13-1 zeigt die verwendeten Kurzformen der im Modell vorkommenden Variablen.

**Tabelle 13-1:** Beschreibung der verwendeten Kurzformen.

Kurzform	Beschreibung
Oberfläche	Oberflächenqualität
InvReifendruck	Logarithmus des Reifendrucks, Reifend-ln
qrdvReifendruck	Reifendruck zum Quadrat, Reifend-qdr
InGeschwindigkeit	Logarithmus der Fahrgeschwindigkeit, Geschw-ln
qdrGeschwindigkeit	Fahrgeschwindigkeit zum Quadrat, Geschw-qdr

Tabelle 13-2: Erklärende Variablen

	Nr.	SPSS Nomenklatur	Variablenname
Erklärende Variablen	1	Beschleunigung	Hochbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ], [Beschl]
	2	Reifendruck	Reifendruck [bar], Reifend
	3	Geschwindigkeit	Fahrgeschwindigkeit [km/h], [Geschw]
	4	Frequenz	Wechsel bei Abschnittsgrenze (aus Excel)
	5	SDBeschl	Standardabweichung der Hochbeschleunigung [SD Beschl]
	6	SDBeschln	Logarithmus der Standardabweichung der Beschl [SD Beschl - ln]
	7	SDBeschlqdr	Quadrat der Standardabweichung der Beschl [SD Beschl - qdr]
	8	Gewicht	Gewichtung der Hochbeschleunigungen entsprechend der Länge der Streckenabschnitte
	9	<b>Max5sec</b>	Maximale Hochbeschleunigung im Zeitfenster von 5s [max Beschl-5s]
	10	Max5Dv	max Beschl-5s/Geschw
	11	Max5Dlnv	max Beschl-5s/Geschw-ln
	12	Max5Dqdrv	max Beschl-5s/Geschw-qdr
	13	Max5Mv	max Beschl-5s*Geschw
	14	Max5Mlnv	max Beschl-5s*Geschw-ln
	15	Max5Mqdrv	max Beschl-5s*Geschw-qdr
	16	Max5DReifend	max Beschl-5s/Reifend
	17	Max5DlnReifend	max Beschl-5s/Reifend-ln
	18	Max5DqdrReifend	max Beschl-5s/Reifend-qdr
	19	Max5MReifend	max Beschl-5s*Reifend
	20	Max5MlnReifend	max 5*Reifend-ln
	21	Max5MqdrReifend	max 5*Reifend-qdr
	22	<b>MaxMin5</b>	Maximale-Minimale Beschleunigung im Zeitfenster von 5s [max-min Beschl-5s]
	23	MM5Dv	max-min Beschl-5s/Geschw
	24	MM5Dlnv	max-min Beschl-5s/Geschw-ln
	25	MM5Dqdrv	max-min Beschl-5s/Geschw-qdr
	26	MM5Mv	max-min Beschl-5s*Geschw
	27	MM5Mlnv	max-min Beschl-5s*Geschw-ln
	28	MM5Mqdrv	max-min Beschl-5s*Geschw-qdr
	29	MM5DReifend	max-min Beschl-5s/Reifend
	30	MM5DlnReifend	max-min Beschl-5s/Reifend-ln
	31	MM5DqdrReifend	max-min Beschl-5s/Reifend-qdr
	32	MM5MReifend	max-min Beschl-5s*Reifend
	33	MM5MlnReifend	max-min Beschl-5s*Reifend-ln
	34	MM5MqdrReifend	max-min Beschl-5s*Reifend-qdr
	35	<b>Wechsel</b>	Anzahl der Wechsel[Anz Wechsel]
	36	WechselDv	Anz Wechsel/Geschw
	37	WechselDlnv	Anz Wechsel/Geschw-ln
	38	WechselDqdrv	Anz Wechsel/Geschw-qdr
	39	WechselMv	Anz Wechsel*Geschw
	40	WechselMlnv	Anz Wechsel*Geschw-ln
	41	WechselMqdrv	Anz Wechsel*Geschw-qdr
	42	WechselDReifend	Anz Wechsel/Reifend
	43	WechselDlnReifend	Anz Wechsel/Reifend-ln
	44	WechselDqdrReifend	Anz Wechsel/Reifend-qdr
	45	WechselMReifend	Anz Wechsel*Reifend
	46	WechselMlnReifend	Anz Wechsel*Reifend-ln
	47	WechselMqdrReifend	Anz Wechsel*Reifend-qdr

## 13.1.1.1 Frequenz

Die erklärende Variable Frequenz (Tab. 13-2) steht in nicht in Zusammenhang mit der 1 [Hz] oder 10 [Hz] Taktung der Messinstrumente.

Sie beschreibt die Änderung des Vorzeichens der Hochbeschleunigung. Die Frequenz kann nur den Wert Eins oder Null annehmen. Eine Null weist auf keine Änderung des Vorzeichens hin. Springt das Vorzeichen jedoch von Plus auf Minus, oder Umgekehrt, wird dies mit einer Eins gekennzeichnet (Tab.: 13-3). Damit kann gezeigt werden, wo Vorzeichen- und damit ein Richtungswechsel der Hochbewegung stattfand.

Die Frequenz darf auch nicht mit der Signum – Funktion verwechselt werden. Für diese gilt aus der Menge der reellen Zahlen:

- $x < 0$   $\text{sgn}(x) = -1$
- $x > 0$   $\text{sgn}(x) = 1$
- $x = 0$   $\text{sgn}(x) = 0$

Die in den Datensätzen angeführte erklärende Variable Frequenz kann im Gegensatz zur Signum – Funktion negative und positive Werte der Hochbewegung nur mit einer 1 oder einer 0 markieren.

**Tabelle 13-3:** Ausschnitt eines Datensatzes

Fall ID	Oberfläche	Beschleunigung	Frequenz	Reifendruck	Geschwindigkeit
1	5	-9,72	0	7,00	14,00
2	5	1,63	1	7,00	14,00
3	5	-7,07	1	7,00	14,00
4	5	-5,37	0	7,00	14,00
5	5	-18,41	0	7,00	14,00
6	5	-1,21	0	7,00	14,00
7	5	-14,25	0	7,00	14,00
8	5	-12,17	0	7,00	14,00
9	5	5,79	1	7,00	14,00
10	5	1,82	0	7,00	14,00
11	5	-0,45	1	7,00	14,00
12	5	-11,61	0	7,00	14,00
13	5	-2,91	0	7,00	14,00
14	5	2,01	1	7,00	14,00
15	5	-13,50	1	7,00	14,00
16	5	2,01	1	7,00	14,00
17	5	-18,41	1	7,00	14,00
18	5	-13,31	0	7,00	14,00
19	5	1,06	1	7,00	14,00

#### 13.1.1.2 Wechsel der Hochbewegung

Der Wechsel ist die Summe aller Richtungsänderungen innerhalb eines festgelegten Zeitintervalles. Er errechnet sich aus der Summe aller Einser der Frequenz (13.1.1.1). Eine hohe Anzahl an Wechsel kann auf eine unebene Oberflächenstruktur hindeuten, ist aber als einzige Einflussgröße nicht relevant.

#### 13.1.1.3 Maximalwert

Der Maximalwert ist der größte, in einem bestimmten Zeitintervall, auftretende Wert der Hochbeschleunigung.

#### 13.1.1.4 Differenz von Maximalwert zu Minimalwert

Hier wird die Differenz des Maximalwertes zum Minimalwert der Hochbeschleunigung innerhalb eines bestimmten Zeitintervalles gebildet.

### 13.1.2 *STETIGE VARIABLE*

Die stetige Variable oder auch Zielvariable dieses Modelles wird durch die Güte der Oberflächenbeschaffenheit beschrieben. Ähnlich dem Schulnotensystem wurden die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen bewertet.

Eins beschreibt eine ebene Oberfläche. Diese trat entlang des Gürtelradweges auf. Unebene Streckenabschnitte wurden mit einer Fünf bewertet. Diese fanden sich in der Mechitaristengasse und der Faßziehergasse. Asphaltierte Bereiche wie der Streckenabschnitt entlang der Burggasse wurden mit einer Zwei beurteilt. Jene Bereiche, in denen Betonplatten des Gleiskörpers auftraten, erhielten eine Drei. Die Note Vier wurde auf Grund des Nicht Vorhanden Seins entsprechender Strukturen auch nicht vergeben. Die folgende Abbildung 13-1 zeigt die Oberflächenbeurteilung beispielhaft.

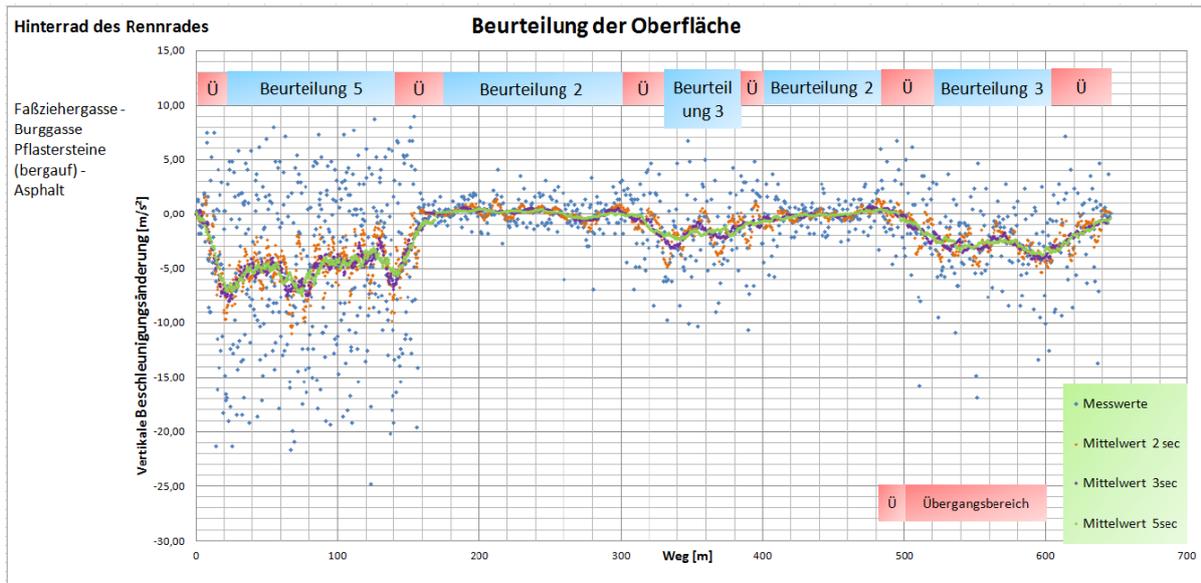


Abbildung 13-1: Oberflächenbeurteilung

Die zur Beurteilung hervorgehobenen Bereiche sind immer kürzer als der Streckenabschnitt selbst. Oft war es nötig, Streckenabschnitte in mehrere einzelne Teilstücke zu unterteilen. Wie die Abbildung 13-1 zeigt, wurden Übergangsbereiche ausgeschlossen.

## 14 MULTINOMIALES MODELL

Um in Zukunft Oberflächen von Radverkehrsanlagen an Hand der Daten der Hochbeschleunigung erkennen und beurteilen zu können, benötigt es im Vorfeld die Entwicklung eines statistischen Modells.

Prinzipiell wird von einem Modell gefordert:

- Ein hoher Erklärungswert  
zB.:  $R^2$ , Likelihoodschätzer, prozentrichtige Vorhersagewerte
- Die Einfachheit des Modells  
Mit wenigen Variablen sollten alle Zusammenhänge des Modells erklärt werden.

Das Ziel des Modells beruht auf der Gegenüberstellung von tatsächlichen und vorhergesagten Oberflächenbeurteilungen. Dabei erfolgt die Darstellung der Vergleiche in Form einer Klassifikationstabelle in der prozentrichtige Vorhersagewerte angeführt werden. Das Modell ist nicht nur von einer Variablen allein abhängig. Vielmehr ist es die Kombination der erklärenden Variablen (Tab.:13-2), die einen hohen Erklärungswert eines Modells ermöglichen.

Sinnvolle Kombinationen konnten schon an Hand der ersten Ergebnisse der nominalen Regression erkannt werden. Dabei handelte es sich um die Werte der Pseudo-Bestimmtheitsmaße. Dazu gehören:

- Cox und Snell Pseudo –  $R^2$
- Nagelkerke Pseudo –  $R^2$
- Mc Fadden Pseudo –  $R^2$

Die Pseudo – Bestimmtheitsmaße werden im Zuge der nominalen Regression ermittelt und sind dem Ergebnisprotokoll zu entnehmen. Sie liegen einer Maximum – Likelihood – Schätzung zu Grunde da es sich um eine nichtlineare Regression handelt. Die Zahlenwerte der Pseudo -  $R^2$  sind als Gütekriterium und nicht als Prozentzahl, wie im Falle einer linearen Regression, zu verstehen. Der Wertebereich der Pseudo –  $R^2$  liegt zwischen 0 und 1. Ein Wert nahe bei Eins weist auf einen hohen Erklärungswert des Modells hin. Pseudo – Bestimmtheitsmaße beschreiben das ganze Modell geben aber keinen Einblick darüber wie groß der Einfluss der einzelnen verwendeten Variablen auf das Modell selbst ist. Um ein statistisches Modell zu entwickeln mussten aus den 47 Variablen (Tab.: 13-2) jene Variablen bzw. Kombinationen dieser Variablen gefunden werden welche den größten Einfluss auf das Modell erzielten.

In der Regel werden dafür alle erklärenden Variablen in SPSS eingelesen und zur Modellberechnung herangezogen. Mit Hilfe der schrittweisen Berechnung erfolgt eine Reihung sämtliche Variablen entsprechend ihrer Wichtigkeit. Dieses Verfahren konnte hier nicht angewendet werden, da Geschwindigkeit und Reifendruck in 36 der insgesamt 47 Variablen vorkamen um trotz dieses Umstandes die für das Modell wichtigen Variablen zu finden, war es nötig sich des Likelihood-Quotienten-Tests und dessen

Teilergebnissen zu bedienen. Die Signifikanz war dabei zweitrangig. Die wesentliche Aussagekraft lag bei den Zahlenwerten des Chi-Quadrates. Für jede Variable wurde der -2 Log-Likelihood-Wert eines reduzierten Modells ausgewiesen. Die Differenz zwischen reduziertem und vollständigem Modell wurde mit den Zahlenwerten von Chi-Quadrat beschrieben. Je größer Chi-Quadrat umso größer die Erklärungsleistung dieser Variable. Von einem vollständigem Modell spricht man, wenn in der Berechnung alle gewählten Variablen berücksichtigt werden. Beim reduzierten Modell wurde jeweils eine der gewählten Variablen aus der Berechnung ausgeschlossen. Werden vollständiges und reduziertes Modell miteinander verglichen, so kann damit der Einfluss der jeweils ausgeschlossenen Variable auf das Modell ausgewertet werden. Mit anderen Worten: Je größer Chi-Quadrat umso größer der Einfluss dieser Variable auf das Modell.

Da eine Berechnung der Einflussgrößen aller Variablen mittels SPSS auf Grund des mathematischen Hintergrundes des Programmes nicht möglich war, mussten sämtliche Variablen und deren Kombinationen mit Hilfe der Zahlenwerte von Chi-Quadrat und schlussendlich der mit dem Modell ermittelten Prozentrichtigen bestimmt werden. Die erklärenden Variablen sind in drei große Gruppen zu unterteilen (Tab.:13-2). Die Ausgangswerte sind dabei Zeile 9 Max5sec, Zeile 22 MaxMin5 und Zeile 35 Wechsel. In Kombinationen mit Geschwindigkeit und Reifendruck wurden je Gruppe 12 weitere Variablen gebildet. Im Zuge der Auswertung der Variablenkombinationen zeigte sich, dass eine sinnvolle Kombination nur dann gegeben war, sofern je Gruppe Geschwindigkeit und / oder Reifendruck nur einmal zum Einsatz kamen. Wurden mehrere Variablen aus derselben Gruppe gewählt, war die Erklärungsleistung aller Variablen auf das Modell von geringerem Ausmaß.

#### **14.1 ZEITFENSTER DES MODELLS**

Es erfolgte die Aneinanderreihung der Messwerte der Befahrungskombinationen (Tab.8-3) aller Beurteilungsabschnitte. Übergangsbereiche erhielten keine Beurteilung und wurden daher nicht berücksichtigt.

Die für das Modell verwendeten Zeitfenster erstreckten sich über eine temporäre Länge von fünf und zehn Sekunden. Das ergibt jeweils einen Datenumfang von 50 und 100

Messwerten der Hochbeschleunigung pro Zeitfenster. Die Zeitfenster des Modells bezogen sich auf 50 bzw. 100 Werte nacheinander (Tab. 14-1 und 14-2), d.h. für die Modellberechnung wurden aufeinanderfolgende, nicht gleitende Zeitfenster verwendet. Aus jeweils diesen 50 (100) aufeinander folgenden Messwerten der Hochbeschleunigung wurden der

- Maximalwert der Hochbeschleunigung
- Maximalwert – Minimalwert der Hochbeschleunigung
- Wechsel der Hochbeschleunigungen

sowie die weiteren, mit diesen Daten in Zusammenhang stehenden 41 erklärende Variablen (Tab.: 13-2), berechnet. Die nachfolgenden Tabellen zeigen den schematischen Aufbau der Zeitfenster der Modelle.

**Tabelle 14-1:** Schematische Darstellung zur Ermittlung des Zeitfensters von 5 Sekunden.

Werte der Hochbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	Ermittelte erklärende Variablen
50 Werte	Maximalwert; Maximalwert minus Minimalwert; Wechsel und weitere 41 Variablen der Hochbeschleunigung
50 Werte	Maximalwert; Maximalwert minus Minimalwert; Wechsel und weitere 41 Variablen der Hochbeschleunigung
50 Werte	Maximalwert; Maximalwert minus Minimalwert; Wechsel und weitere 41 Variablen der Hochbeschleunigung
50 Werte	Maximalwert; Maximalwert minus Minimalwert; Wechsel und weitere 41 Variablen der Hochbeschleunigung

**Tabelle 14-2:** Schematische Darstellung zur Ermittlung des Zeitfensters von 10 Sekunden.

Werte der Hochbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	Ermittelte erklärende Variablen
100 Werte	Maximalwert; Maximalwert minus Minimalwert; Wechsel und weitere 41 Variablen der Hochbeschleunigung
100 Werte	Maximalwert; Maximalwert minus Minimalwert; Wechsel und weitere 41 Variablen der Hochbeschleunigung

Ein Beispiel sollte zu einem leichteren Verständnis führen. Betrachtet wird dabei ein Zeitfenster von fünf Sekunden (50 Messwerte). Beispielsweise besteht ein durchgehender Beurteilungsabschnitt aus 3500 Messdaten der Hochbeschleunigung. Somit findet das Zeitfenster von fünf Sekunden 70-mal darin Platz. Damit ergeben sich in weiterer Folge:

- 70 Maximalwert der Hochbeschleunigung
- 70 Maximalwert – Minimalwert der Hochbeschleunigung
- 70 Wechsel der Hochbeschleunigung

Das bedeutet, die Datenmenge wurde entsprechend des temporären Umfanges des Zeitfensters komprimiert. An Stelle der 3500 Messwerte gab es somit nur noch 70 mal 41 erklärende Variablen.

Wird das Zeitfenster auf zehn Sekunden ausgedehnt, ergibt das 35 mal 41 erklärende Variablen. Mit größerem Zeitfenster sinkt die zur Verarbeitung zur Verfügung stehende Datenmenge.

## **14.2 GEWICHTUNG DER OBERFLÄCHENGÜTEKLASSEN**

Die einzelnen Streckenabschnitte weisen verschiedene Weglängen auf (Tab. 8-1). Eine gleichmäßige Verteilung der vier Oberflächenbeurteilungsklassen entlang der Erhebungsstrecke war nicht gegeben. Weiters verloren Oberflächenbeurteilung von kurzen Streckenabschnitten mit zunehmender Größe des Zeitfensters an Einfluss im Modell. Somit war eine Gewichtung der einzelnen Streckenabschnitte notwendig. Tabellen 14-3 und 14-4 zeigen die Häufigkeit von Abschnitten mit Oberflächengüten in Abhängigkeit des Zeitfensters.

**Tabelle 14-3:** Häufigkeiten von Abschnitten mit unterschiedlichen Oberflächengüten in Abhängigkeit des Zeitintervalles für fünf Sekunden.

Zeitfenster 5 Sekunden	
Oberflächengüte	Häufigkeit der auftretenden Oberflächengüte
1	58
2	16
3	109
5	22
$\Sigma$	<b>205</b>

**Tabelle 14-4:** Häufigkeiten von Abschnitten mit unterschiedlichen Oberflächengüten in Abhängigkeit des Zeitintervalles für zehn Sekunden.

Zeitfenster 10 Sekunden	
Oberflächengüte	Häufigkeit der auftretenden Oberflächengüte
1	31
2	9
3	57
5	12
$\Sigma$	<b>109</b>

Betrachtet man das Zeitintervall von fünf Sekunden, so ist zu erkennen, dass die Oberflächengüte Drei am stärksten vertreten war. Für das Modell und dessen sinnvolle Funktion war es aber nötig, dass alle Oberflächenbeurteilungen gleich stark vertreten waren. Um das zu erreichen, erfolgte die Gewichtung der Oberflächenbeurteilungen in Abhängigkeit der Häufigkeit ihres Auftretens. Dies geschah für jedes der beiden Zeitintervalle. Dem Datenumfang entsprechend ergaben sich die in Tabelle 14-5 und 14-6 errechneten Gewichtungen. Im statistischen Berechnungsprogramm SPSS konnten die Parameter der Gewichtung in einem Unterpunkt des Hauptmenüs ähnlich einer erklärenden Variable eingefügt werden. Somit wurden sie automatisch in die Berechnung einbezogen.

**Tabelle 14-5:** Datenmenge des Zeitintervalles für 5 Sekunden

Zeitfenster 5 Sekunden	
Oberflächengüte	Gewicht
1	0,88
2	3,20
3	0,47
5	2,33

**Tabelle 14-6:** Datenmenge des Zeitintervalles für 10 Sekunden

Zeitfenster 10 Sekunden	
Oberflächengüte	Gewicht
1	0,89
2	2,52
3	0,50
5	2,02

## 15 MODELLERGEBNISSE

Die erarbeiteten "Prozent Richtigen" zeigen einen Einblick in Bezug auf die Möglichkeit, mit Hilfe vertikaler Beschleunigungswerte, Oberflächen zu beurteilen.

Die Ergebnisse sind entsprechend der zwei gewählten Zeitfenster (5 und 10 Sekunden) getrennt voneinander zu betrachten. Ziel war es, pro Zeitfenster, zwei Modellansätze zu schaffen. Zwei unterschiedliche Kombinationen an Variablen sollten zeigen, dass es nicht nur einen Ansatz für das Modell gibt. Alternativen sind nicht als Widerspruch zu sehen. Vielmehr können sie als Entwicklungsschritt in Richtung eines optimalen Modells betrachtet werden. Damit ergaben sich insgesamt vier Modelle (Tab.15-1).

**Tabelle 15-1:** Modellvarianten

	Zeitfenster	
	5 [s]	10 [s]
Modellvariante	I	I
Modellvariante	II	II

### 15.1 ERGEBNISSE DER MODELLVARIANTEN I UND II (5 SEKUNDEN ZEITFENSTER)

Zur Berechnung konnten entsprechend des Zeitfensters von 5 Sekunden 205 (Tab. 14-3) mal 47 erklärende Variablen herangezogen werden. Die Gewichtungen wurden nach Tabelle 14-5 berücksichtigt.

*ERGEBNIS DER MODELLVARIANTE I (ZEITFENSTER 5 SEKUNDEN)*

Das Ergebnis I beruht auf der Kombination folgender Variablen

- Standardabweichung des Logarithmus der Beschleunigung  
SDBeschlln
- Standardabweichung des Quadrates der Beschleunigung  
SDBeschlqdr
- Maximalwert minus Minimalwert dividiert durch das Quadrat des Reifendrucks  
MM5DqdrReifend
- Wechsel dividiert durch den Logarithmus des Reifendrucks  
WechselDlnReifend

➤ Pseudo – Bestimmtheitsmaße

**Tabelle 15-2:** Pseudo - Bestimmtheitsmaße von Modell I (5Sekunden)

**Pseudo-R-Quadrat**

Cox und Snell	,695
Nagelkerke	,741
McFadden	,428

Tabelle 15-2 zeigt die Pseudo – Bestimmtheitsmaße von Modell I mit dem Zeitfenster von 5 [s]. Die Zahlenwerte sind reine Gütekriterien. Sie dienen als erste Kontrollwerte bezüglich einer sinnvollen Kombination der erklärenden Variablen. Je näher sie bei Eins zu liegen kommen umso besser ist der Erklärungswert des Modells. Eine bessere Beschreibung des Modells liefert die Klassifikation.

➤ Klassifikation

Die Klassifikation stellt die tatsächlichen Beobachtungen gegenüber den vorhergesagten Beobachtungen dar. Dabei wurde im ersten Modell eine Prozentrichtigkeit von 63,60 % erreicht (Tab. 15-3). Die Oberflächenbeurteilung 5 wurde mit diesem Modell gut beschrieben (48,92 Beobachtungen). 3 wurde wie 5 ebenfalls gut durch dieses Modell ausgewiesen (24,92 Beobachtungen). Anders hingegen ist es bei 1 und 2. 1 wird auch zum Teil als eine 2 vorhergesagt (12,81 Beobachtungen). Besonders bei der Oberflächenbeurteilung 2 zeigt sich, dass diese nahezu gleich stark von 1 und 3 beschrieben wird (16,79 und 16,93 Beobachtungen).

**Tabelle 15-3:** Klassifikationstabelle der Modellvariante I (5 Sekunden), Einheit der hinterlegten Zahlenwerte entspricht Beobachtungen.

<b>Klassifikation</b>					
Beobachtet Oberflächengüte	Vom Modell ausgewiesene Oberflächengüte				
	1	2	3	5	Prozent richtig
1	22,97	16,79	8,84	2,65	44,8%
2	12,81	32,03	6,41	0	62,5%
3	8,93	16,93	24,92	0,47	48,6%
5	0	0	0	48,92	100,0%
Prozent insgesamt	22,1%	32,4%	19,8%	25,7%	<b>63,6%</b>

Die Klassifikationstabelle (Tab. 15-3) ist wie folgt zu lesen. Die gelb hinterlegten Zahlenwerte repräsentieren die Anzahl der Beobachtungen von vorhergesagten und tatsächlich vorkommenden Oberflächengüten. Im Gegensatz dazu weisen die grau hinterlegten Zahlenwerte die Anzahl der beobachteten Fehleinschätzungen aus. Die Oberflächengüte Eins dient als Fallbeispiel.

22,97 Beobachtungen wurden als eine Oberflächengüte 1 vorhergesagt, die auch tatsächlich eine 1 waren. 12,81 Beobachtungen wurden als eine 1 vorhergesagt. Tatsächlich war es jedoch eine Oberflächengüte von 2.

"Prozent insgesamt" beschreibt den Anteil der Summe der vorhergesagten Beobachtungen jeder einzelnen Oberflächenklasse in Bezug auf die Gesamtheit aller vorhergesagten Beobachtungen. Das bedeutet für die Oberflächenklasse Eins:

22,10% aller vorhergesagten Beobachtungen wurden der Güteklasse 1 zugewiesen. Die Summe der Einzelwerte der "Prozent insgesamt" ergibt 100 %.

Tabelle 15-4 zeigt für die Spalte der vorhergesagten Oberflächengüte 1 die Berechnungsschritte der "Prozent insgesamt".

**Tabelle 15-4:** Berechnungsschritte der "Prozent insgesamt"

		Klassifikation				
Beobachtet Oberflächengüte		Vorhergesagt Oberflächengüte				
		1	2	3	5	
1		22,97	16,79	8,84	2,65	
2		12,81	32,03	6,41	0	
3		8,93	16,93	24,92	0,47	
5		0	0	0	48,92	
		<b>44,71</b>	<b>65,75</b>	<b>40,17</b>	<b>52,04</b>	Σ 202,67
Prozent insgesamt		22,10%	32,40%	19,80%	25,70%	

$(44,71/202,67) * 100 = 22,10 \%$

Die Prozentrichtigen der einzelnen Oberflächenklassen errechnen sich mit dem Rechenschritt der Division. Die Anzahl der Beobachtungen der tatsächlichen Oberflächengüte je Güteklasse bilden den Dividend. Der Divisor wird aus der Summe aller vorhergesagten Beobachtungen je Güteklasse gebildet. Der Rechenweg ist in Tabelle 15-5 ersichtlich. Die Prozentrichtigkeit von 63,60 % des Modells errechnet sich aus dem Mittelwert der vier Einzelwerte der Prozentrichtigen (Formel 8).

Berechnung der modellbeschreibenden Prozentrichtigkeit.

$$(44,80\% + 62,50\% + 48,60\% + 100\%) / 4 = 63,60\% \quad (8)$$

**Tabelle 15-5:** Berechnungsschritte der Prozentrichtigen.

		Klassifikation						
B C		Vorhergesagt Oberflächengüte					Prozent richtig	
		1	2	3	5			
1		22,97	16,79	8,84	2,65	51,25	44,80%	$(22,97/51,25) * 100$
2		12,81	32,03	6,41	0	51,25	62,50%	$(32,03/51,25) * 100$
3		8,93	16,93	24,92	0,47	51,25	48,60%	$(24,92/51,25) * 100$
5		0	0	0	48,92	48,92	100,00%	$(48,92/48,92) * 100$
						Σ 207,67		
							<b>63,60%</b>	

### 15.1.1 ERGEBNIS DER MODELLVARIANTE II (ZEITFENSTER 5 SEKUNDEN)

Das Ergebnis II beruht auf der Kombination folgender Variablen:

- Standardabweichung des Logarithmus der Beschleunigung  
SDBeschln
- Standardabweichung des Quadrates der Beschleunigung  
SDBeschlqdr
- Standardabweichung der Beschleunigung  
SDBeschl
- Maximalwert weniger Minimalwert multipliziert mit der  
Geschwindigkeit  
MM5Mv
- Maximalwert weniger Minimalwert multipliziert mit dem Quadrat  
der Geschwindigkeit  
MM5Mqdrv
- Wechsel multipliziert mit dem Logarithmus des Reifendrucks  
WechselMlnReifend

➤ Pseudo – Bestimmtheitsmaße

**Tabelle 15-6:** Pseudo – Bestimmtheitsmaße von Modell II (5Sekunden)

Pseudo-R-Quadrat	
Cox und Snell	,743
Nagelkerke	,792
McFadden	,490

Tabelle 15-6 zeigt die Pseudo – Bestimmtheitsmaße von Modell II. Im Vergleich zu Modell I erreichen die Gütekriterien höhere Zahlenwerte. Ein Anstieg der Zahlenwerte

der Bestimmtheitsmaße hat auch einen Anstieg des Erklärungswertes des Modells zur Folge. Dies ist in der Klassifikation erkennbar.

➤ **Klassifikation**

Es wurde eine Prozentrichtigkeit von 68,50 % erreicht (Tab. 15-7). Der gesamte Vergleich von beobachteten und vorhergesagten Oberflächenbeurteilungen fällt hier besser aus als in Ergebnis I. Die Oberflächenbeurteilung 5 wurde nahezu vollständig korrekt vorhergesagt. Auch die Beurteilungsstufe 3 wurde durch dieses Modell besser ausgewiesen. Anders hingegen ist es bei 1 und 2. Die Zahlenwerte der Tabelle weisen darauf hin, dass 1 zum Teil als eine 2 vorhergesagt wird (12,81 Beobachtungen). Umgekehrt gilt das Selbe. Die Oberflächenbeurteilung 2 wird auch zum Teil als eine 1 vorhergesagt (15,91 Beobachtungen).

**Tabelle 15-7:** Klassifikationstabelle der Modellvariante II (5 Sekunden), Einheit der hinterlegten Zahlenwerte entspricht Beobachtungen.

<b>Klassifikation</b>					
Beobachtet Oberflächengüte	Vom Modell ausgewiesene Oberflächengüte				
	1	2	3	5	Prozent richtig
1	23,86	15,91	9,72	1,77	46,6%
2	12,81	28,83	9,61	0	56,3%
3	5,64	8,46	37,14	0	72,5%
5	0	0	0	48,92	100,0%
Prozent insgesamt	20,9%	26,2%	27,9%	25,0%	<b>68,5%</b>

## 15.2 ERGEBNISSE DER MODELLVARIANTEN I UND II (10 SEKUNDEN ZEITFENSTER)

Zur Berechnung konnten entsprechend des Zeitfensters von 10 Sekunden 109 (Tab.: 14-4) mal 47 erklärende Variable herangezogen werden. Die Gewichtungen wurden nach Tabelle 14-6 berücksichtigt. Die folgenden Tabellen 15-8 und 15-9 zeigen die Ergebnisse der Klassifikation der beiden Modellvarianten. Die damit erreichten Prozentrichtigen kamen bei beiden Modellen bei 57,40% zu liegen.

Die Modelle wurden mit angeführten Variablenkombinationen berechnet.

Modellvariante I (10 Sekunden Zeitfenster)

- Maximalwert minus Minimalwert multipliziert mit dem Logarithmus des Reifendrucks  
MM10MlnReifend
- Standardabweichung des Logarithmus der Beschleunigung  
SDBeschlln
- Standardabweichung des Quadrates der Beschleunigung  
SDBeschlqdr

**Tabelle 15-8:** Klassifikationstabelle der Modellvariante I (10 Sekunden), Einheit der hinterlegten Zahlenwerte entspricht Beobachtungen

Beobachtete Oberflächengüte	Klassifikation				
	Vom Modell ausgewiesene Oberflächengüte				
	1	2	3	5	Prozent richtig
1	10,59	10,59	5,30	,88	38,7%
2	5,65	8,48	11,30	0	33,3%
3	1,95	9,25	16,07	,49	57,9%
5	0	0	0	26,08	100,0%
Prozent insgesamt	17,1%	26,6%	30,6%	25,7%	<b>57,4%</b>

## Modellvariante II (10 Sekunden Zeitfenster)

- Standardabweichung des Logarithmus der Beschleunigung  
SDBeschlln
- Standardabweichung des Quadrates der Beschleunigung  
SDBeschlqdr
- Wechsel multipliziert dem Logarithmus des Reifendrucks  
WechselMlnReifend

### ➤ Klassifikation

Bei der statistischen Auswertung kam es bei jeder der beiden Modellvarianten (Zeitfenster 10 Sekunden) zu einer Fehlermeldung. Die statistische Berechnung wurde bis zum Ende ausgeführt. Die Richtigkeit dieser Ergebnisse ist laut Ergebnisprotokoll jedoch zweifelhaft. Der Grund der Fehlermeldung ist die geringe Anzahl der Fälle. Bei dem gewählten Zeitfenster von 10 Sekunden standen wesentlich weniger Werte zur statistischen Auswertung zur Verfügung. Insgesamt waren es 109. Speziell die Oberflächengüte der Klasse 2 war mit nur 9 Fällen unterrepräsentiert. Auf die Ergebnisse der Klassifikationstabellen 15-8 und 15-9 wurde auf Grund der vorliegenden Fehlermeldung nicht näher eingegangen.

Um den vorliegenden Fehler zu bereinigen, standen zwei Möglichkeiten zur Auswahl. Die erste Möglichkeit bestand darin, mehr Daten zu sammeln. Die Datenerhebung war aber bereits abgeschlossen. Eine weitere Möglichkeit bestand darin ein verbessertes Modell mit der vorliegenden Datenmenge zu bilden.

**Tabelle 15-9:** Klassifikationstabelle der Modellvariante II (10 Sekunden), Einheit der hinterlegten Zahlenwerte entspricht Beobachtungen.

Beobachtete Oberflächengüte	Klassifikation				
	Vom Modell ausgewiesene Oberflächengüte				
	1	2	3	5	Prozent richtig
1	10,59	10,59	5,30	,88	38,7%
2	5,65	8,48	11,30	0	33,3%
3	1,95	9,25	16,07	,49	57,9%
5	0	0	0	26,08	100,0%
Prozent insgesamt	17,1%	26,6%	30,6%	25,7%	<b>57,4%</b>

## 16 VERBESSERTES MODELL

Die Verbesserung des Modells wurde durch eine Änderung der Zielvariablen erreicht. Es wurde die Anzahl der Oberflächenbeurteilungen von vier auf drei Kategorien reduziert.

Zwei Gründe sprechen dafür.

- Es zeigte sich bei der statistischen Auswertung des 10 Sekunden Zeitfensters eine zu geringe Anzahl an Fällen der Kategorie 2.
- Die Ergebnisse der Klassifikation (Prozentrichtigen) aller gültigen Modelle weisen darauf hin, dass es keine klare Trennung der Kategorie 1 und 2 gibt.

Das verbesserte Modell arbeitet mit den Oberflächenkategorien 1, 3 und 5.

Der Rechenvorgang und die erklärende Variable erfahren keine Veränderung. Auch hier wurden vier Modelle erarbeitet (Tab. 16-1).

**Tabelle 16-1:** Verbesserte Modellvarianten

	Zeitfenster	
	5 [s]	10 [s]
Verbesserte Modellvariante	I	I
Verbesserte Modellvariante	II	II

## 16.1 ERGEBNISSE DER VERBESSERTEN MODELLVARIANTEN I UND II (5 SEKUNDEN ZEITFENSTER)

Zur Berechnung konnten entsprechend des Zeitfensters von 5 Sekunden 205 (Tab. 14-3) mal 47 erklärende Variable herangezogen werden. Die Gewichtungen wurden nach Tabelle 14-5 berücksichtigt.

### 16.1.1 ERGEBNIS DER VERBESSERTEN MODELLVARIANTE I (ZEITFENSTER 5 SEKUNDEN)

Das Ergebnis I beruht auf der Kombination folgender Variablen

- Standardabweichung des Logarithmus der Beschleunigung  
SDBeschlln
- Standardabweichung des Quadrates der Beschleunigung  
SDBeschlqdr
- Wechsel multipliziert mit dem Logarithmus des Reifendrucks  
WechselMlnReifend
- Maximalwert minus Minimalwert dividiert durch das Quadrat des Reifendrucks  
MM5DqdrReifend

#### ➤ Klassifikation

Es wurde eine Prozentrichtigkeit von 74,8 % erreicht. Die Kategorien 1 und 5 wurden sehr gut vorhergesehen. Die Tabelle 16-2 zeigt, dass die Kategorie 3 oftmals auch als eine 1 vorhergesagt wurde (11,70 Beobachtungen).

**Tabelle 16-2:** Klassifikationstabelle der verbesserten Modellvariante I (5 Sekunden), Einheit der hinterlegten Zahlenwerte entspricht Beobachtungen

Beobachtete Oberflächengüte	Klassifikation Vom Modell ausgewiesene Oberflächengüte			
	1	3	5	Prozent richtig
1	88,14	11,70	2,65	86,0%
3	35,73	14,57	,94	28,4%
5	0	0	48,92	100,0%
Prozent insgesamt	61,1%	13,0%	25,9%	<b>74,8%</b>

### 16.1.2 ERGEBNIS DER VERBESSERTEN MODELLVARIANTE II (ZEITFENSTER 5 SEKUNDEN)

Das Ergebnis II beruht auf der Kombination folgender Variablen

- Standardabweichung des Logarithmus der Beschleunigung  
SDBeschln
- Standardabweichung des Quadrates der Beschleunigung  
SDBeschlqdr
- Wechsel multipliziert mit dem Logarithmus des Reifendrucks  
WechselMlnReifend

#### ➤ Klassifikation

Die Prozentrichtigkeit erreicht hier nahezu den Wert wie unter Ergebnis I. Mit 75,7 % (Tab. 16-3) liegt sie lediglich um 0,9 % höher als bei dem vorangegangenen Ergebnis. Hier wird die Kategorie 3 aber besser vorhergesagt. Die 3 wurde weniger oft als eine 1 eingeschätzt als in Ergebnis I (9,38 Beobachtungen).

**Tabelle 16-3:** Klassifikationstabelle der verbesserten Modellvariante II (5 Sekunden), Einheit der hinterlegten Zahlenwerte entspricht Beobachtungen

**Klassifikation**

Beobachtete Oberflächengüte	Vom Modell ausgewiesene Oberflächengüte			
	1	3	5	Prozent richtig
1	90,46	9,38	2,65	88,3%
3	36,67	14,10	,47	27,5%
5	0	0	48,92	100,0%
Prozent insgesamt	62,7%	11,6%	25,7%	<b>75,7%</b>

## 16.2 ERGEBNISSE DER VERBESSERTEN MODELLVARIANTEN I UND II (10 SEKUNDEN ZEITFENSTER)

Durch die Zusammenlegung der beiden Oberflächenklassen 1 und 2 wurde ein für die statistische Auswertung ausreichend großer Datenmenge je Güteklasse geschaffen. Somit konnte auch für die Zeitspanne von 10 Sekunden eine fehlerfreie statistische Auswertung durchgeführt werden. Die Kombinationen der Variablen entspricht jener, aus dem ursprünglichen Modell (15.2), indem eine Berechnung über das Zeitfenster von 10 Sekunden nicht möglich war.

### 16.2.1 ERGEBNIS DER VERBESSERTEN MODELLVARIANTE I (ZEITFENSTER 10 SEKUNDEN)

Das Ergebnis I beruht auf der Kombination folgender Variablen

- Maximalwert weniger Minimalwert multipliziert mit dem Logarithmus des Reifendrucks  
MM10MlnReifend
- Standardabweichung des Logarithmus der Beschleunigung  
SDBeschlln
- Standardabweichung des Quadrates der Beschleunigung  
SDBeschlqdr

➤ Klassifikation

Die Prozentrichtigkeit erreicht 77,8 %. Das entspricht dem Höchstwert aller berechneten Modelle. In der Tabelle 16-4 zeigt sich, dass die Oberflächenkategorien mit keiner der bisherigen Variablenkombination so gut vorhergesagt werden konnte, wie mit dieser.

**Tabelle 16-4:** Klassifikationstabelle der verbesserten Modellvariante I (10 Sekunden), Einheit der hinterlegten Zahlenwerte entspricht Beobachtungen

Beobachtete Oberflächengüte	Klassifikation			
	Vom Modell ausgewiesene Oberflächengüte			
	1	3	5	Prozent richtig
1	45,72	6,17	,88	86,6%
3	16,07	11,20	,48	40,4%
5	0	0	26,07	100,0%
Prozent insgesamt	58,0%	16,3%	25,7%	<b>77,8%</b>

16.2.2 ERGEBNIS DER VERBESSERTEN MODELLVARIANTE II (ZEITFENSTER 10 SEKUNDEN)

Das Ergebnis II beruht auf der Kombination folgender Variablen

- Standardabweichung des Logarithmus der Beschleunigung  
SDBeschlln
- Standardabweichung des Quadrates der Beschleunigung  
SDBeschlqdr
- Wechsel multipliziert mit dem Logarithmus des Reifendrucks  
WechselMlnReifend

➤ Klassifikation

Auch mit dieser Variablenkombination wurde eine Prozentrichtigkeit von 77,8% erreicht (Tab. 16-5). Das entspricht exakt dem Ergebnis der Modellvariante I (Zeitfenster 10 Sekunden).

**Tabelle 16-5:** Klassifikationstabelle der verbesserten Modellvariante II (10 Sekunden), Einheit der hinterlegten Zahlenwerte entspricht Beobachtungen.

**Klassifikation**

Beobachtete Oberflächengüte	Vom Modell ausgewiesene Oberflächengüte			
	1	3	5	Prozent richtig
1	45,73	6,18	,88	86,6%
3	16,07	11,20	,48	40,4%
5	0	0	26,07	100,0%
Prozent insgesamt	58,0%	16,3%	25,7%	<b>77,8%</b>

## 17 MODELLANWENDUNG

Das Ziel der praktischen Anwendung ist es mit Hilfe der Modellvariablen sowie der dazugehörigen Parameterschätzer  $\beta$  die Oberflächengüte zukünftig befahrener Strecken in Form einer Wahrscheinlichkeitsrechnung zu bestimmen.

### Formel 1: Wahrscheinlichkeitsberechnung

$$P_{Ki} = e^{G_{Ki}} / \sum e^{G_{Ki}} + 1$$

#### 17.1 ALLGEMEIN:

Für die Anwendung wurden die verbesserten Modellvarianten I und II (10 Sekunden) herangezogen. Beide Varianten weisen eine Prozentrichtigkeit der Oberflächenbeurteilung von 77,8% auf. Bei der Betrachtung beider SPSS-Ergebnisprotokolle zeigen sich, unter Berücksichtigung der Änderung einer der zur Modellgestaltung herangezogenen Variable, keine weiteren Unterschiede. Auch ist eine klare Übereinstimmung der Zahlenwerte der statistischen Parameterschätzer  $\beta$  als auch Wald zu sehen. Die Parameterschätzer repräsentieren die Signifikanz der einzelnen Variablen in jeder der beiden Modellvarianten. Die Zahlenwerte der Waldstatistik zeigen den Einfluss der verwendeten unabhängigen Variablen auf. Dabei werden Skalierungen und Streuungen außer Acht gelassen. Der Waldwert ergibt sich aus dem Quadrat des t-Wertes und sollte  $> 3,84$  sein um Signifikanz zu zeigen. Tabelle 17-1 und 17-2 zeigen

eine Auflistung dieser Werte. In beiden Tabellen liegen die Zahlenwerte von Wald der Variablen "Konstanter Term" und "SDBeschlln" der Oberflächengüte 3 über 3,84. Die Werte von Wald der verbleibenden Variablen liegen unter 3,84. Würde man nur die Waldstatistik betrachten, wäre es nötig die Variablen zu ändern. Wird das Modell allerdings als Ganzes betrachtet, so ergaben sich mit diesen Variablenkombination die höchsten Prozentrichtigkeiten von 77,8 %.

Alle weiteren Ausführungen, der Anwendung betreffend, beziehen sich auf Grund der Ähnlichkeit beider Varianten ab hier nur noch auf eine der beiden Modellvarianten (Modellvariante II (10 Sek.)). Für die statistische Analyse diente die Oberflächengüte 1 als Referenzkategorie. Parameterschätzer wurden für diese Güteklasse daher nicht ermittelt.

**Tabelle 17-1:** Zusammenfassung der Parameterschätzer  $\beta$  (Wald) der Modellvariante I (10 Sek.)

Modellvariablen Mod. I 10 Sek.	$\beta$ - [Wald]- Werte	
	Oberflächen- güte 3	Oberflächen- güte 5
Konstanter Term	-2,49	-174,530
	[13,147]	[2,083]
MM10MlnReifend	0,010	-0,298
	[0,126]	[2,879]
SDBeschlln	2,219	150,578
	[4,197]	[2,095]
SDBeschlqdr	-0,038	-2,015
	[2,443]	[1,853]

**Tabelle 17-2:** Zusammenfassung der Parameterschätzer  $\beta$  (Wald) der Modellvariante II (10 Sek.)

Modellvariablen Mod. II 10 Sek.	$\beta$ - [Wald]- Werte	
	Oberflächen- güte 3	Oberflächen- güte 5
Konstanter Term	-2,49	-174,530
	[13,147]	[2,083]
WechselMlnReifend	0,010	-0,298
	[0,126]	[2,879]
SDBeschlln	2,219	150,578
	[4,197]	[2,095]
SDBeschlqdr	-0,038	-2,015
	[2,443]	[1,853]

Wie bei der Modellierung ist es bei der Anwendung ebenfalls nötig die Messdaten auf Plausibilität zu kontrollieren und entsprechend aufzubereiten. Das Ergebnis der Aufbereitung bildet die Aneinanderreihung der aus den 10 Sekundenfenstern gewonnenen Mittelwerte der Hochbeschleunigungen. Der letzte Schritt beinhaltet die Bildung der Modellvariablen. Diese werden je Zeitfenster mittels unterschiedlicher Rechenoperationen, je nach Variable, aus jedem einzelnen der aneinander gereihten Mittelwerte gebildet. Mit der angeführten Formel (Formel 8) wird für jedes der zuvor generierten Zeitfenster die Wahrscheinlichkeit der möglicherweise auftretenden Oberflächengüten 3 oder 5 berechnet. Der Zahlenwert der Wahrscheinlichkeit je Oberflächengüte kann zwischen 0 und 1 zu liegen kommen. In Summe müssen die

Wahrscheinlichkeiten der Kategorien 1 bzw. 100 [%] ergeben (17-3). Die entsprechenden Zeitfenster stehen mit den GPS-Koordinaten in direkter Verbindung. Somit ist es möglich die über die Wahrscheinlichkeitsrechnung erhaltenen Oberflächengüten direkt einem Streckenabschnitt zuzuordnen.

## 17.2 DIE WAHRSCHEINLICHKEITSRECHNUNG:

Da im Zuge dieser Arbeit keine weiteren Messdaten vorlagen wurde die Anwendung im Sinne einer Rückrechnung des Modelles II (10 Sekunden) durchgeführt. Ausgangspunkt dieser Berechnung waren die bereits aufbereiteten Messdaten der Hochbeschleunigung. In weiterer Folge wurde für jeden der aneinandergereihten Mittelwerte und der daraus gewonnenen Modellvariablen die Wahrscheinlichkeit (Formel 8) der beiden Oberflächengüten 3 und 5 bestimmt. Da die Oberflächengüte 1 im Modell als Referenz herangezogen wurde, konnte diese nur durch das Ausschlussprinzip bestimmt werden. Tabelle 17-3 zeigt einen Einblick in die Ergebnisse dieser Rückrechnung.

**Tabelle 17-3:** Auszug der Ergebnisse der gewählten Oberflächengüten im Zuge der Anwendung im Vergleich zu den tatsächlich vorkommenden Oberflächengüten

Tatsächliche Oberflächengüte	Wahrscheinlichkeit in [%]		Gewählte Oberflächengüte im Zuge der Anwendung
	Oberflächengüte 3	Oberflächengüte 5	
5	2,00	97,00	5
5	0,00	100,00	5
5	0,00	100,00	5
1	15,00	0,00	1
1	29,00	0,00	1
3	0,00	100,00	5
1	47,00	0,00	1
1	33,00	0,00	1
1	45,00	28,00	3

Die Zuordnung einer Oberflächengüte erfolgte entsprechend der größten ermittelten Wahrscheinlichkeit. Ein Beispiel dafür sowie die Bestimmung der Oberflächengüte 1 (Ausschlussprinzip) ist in Tabelle 17-3 zu sehen. Die grau unterlegten Zeilen zeigen beispielhaft die möglichen Fehleinschätzungen in der Anwendung auf.

Weiters kann in der angeführten Tabelle gut erkannt werden wie die Oberflächengüte 1 bestimmt wurde. Die prozentuellen Anteile der Wahrscheinlichkeiten der Oberflächengüte 1, 3 und 5 müssen in Summe 100,0 [%] bilden. Sind die prozentuellen Anteile der Kategorien 3 und 5 kleiner als jener der Kategorie 1, so sind diese auszuschließen. Tabelle 17-4 zeigt einen Teil der Rechenschritte welche zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Oberflächengüte der ersten Zeile von Tabelle 17-3 herangezogen wurden. Die Modellvariablen wurden mit den für sie zuvor im Modell ermittelten Parameterschätzer  $\beta$  multipliziert und anschließend addiert. Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Oberflächengüte 3 ( $P_{K3}$ ) [ $P_{K5}$ ] wurde dementsprechend  $G_{K3}$  [ $G_{K5}$ ] in Formel 8 eingesetzt.

**Tabelle 17-4:** Teilrechnungsschritte der Wahrscheinlichkeitsberechnung nach Formel 8

<b>Teilrechnungsschritte der Wahrscheinlichkeitsberechnung PKi (Formel 8)</b>		
<b>Modellvariablen</b>	<b>Oberflächengüte 3</b>	<b>Oberflächengüte 5</b>
<b>Mod. II 10 Sek.</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
Konstanter Term	-2,49	-174,530
WechselMinReifend	35,1	35,1
$\beta$	0,010	-0,298
SDBeschlln	2,03	2,03
$\beta$	2,219	150,578
SDBeschlqdr	57,45	57,45
$\beta$	-0,038	-2,015
<b>GK3 und GK5</b>	<b>0,18</b>	<b>4,92</b>

Die aus Tabelle 17-4 errechneten Zahlenwerte (GK3 und GK5) werden in die oben angeführte Formel 8 eingesetzt um die Wahrscheinlichkeiten der möglichen Oberflächengüten 3 und 5 zu bestimmen. Die Wahrscheinlichkeit der Oberflächengüte 1 ergibt sich aus der Differenz der beiden Oberflächengüten 3 und 5 auf 100%.

Wahrscheinlichkeit der Oberflächengüte 3:

$$P_3 = (e^{G_3} / (e^{G_3} + e^{G_5}) + 1) * 100$$

$$P_3 = e^{0,18} / (e^{0,18} + e^{4,92}) + 1 * 100$$

$$P_3 = 0,86\%$$

Wahrscheinlichkeit der Oberflächengüte 5:

$$P_5 = (e^{G_5} / (e^{G_3} + e^{G_5}) + 1) * 100$$

$$P_5 = e^{4,92} / (e^{0,18} + e^{4,92}) + 1 * 100$$

$$P_5 = 98,42\%$$

Wahrscheinlichkeit der Oberflächengüte 1:

$$100 - (0,86 + 98,42) = 0,72\%$$

## 18 DISKUSSION

Es ist möglich, mit den vorliegenden Messgeräten Oberflächenbeurteilungen von Radverkehrsanlagen und anderen Verkehrsinfrastrukturen durchzuführen. Dazu war es nötig, das Messprinzip der Messgeräte zu untersuchen und zu verstehen.

In weiterer Folge dienten die erhobenen Daten der Messfahrten als Eingangsgrößen für statistische Modelle, um mit diesen bereits bekannte, Oberflächengüten vorher zu sagen. Im nächsten Schritt kam es zum direkten Vergleich der beobachteten und vorhergesagten Oberflächen (Klassifikationstabellen).

Im Zuge der Entwicklung zeigten sich zwei wichtige Punkte, die zur Schaffung eines funktionellen Modelles von großer Wichtigkeit waren. Die erste wesentliche Verbesserung wurde durch die Gewichtung erreicht. Mit der Gewichtung wurden die beobachteten Oberflächenkategorien entsprechend auf- und abgewichtet, um für das Modell einigermaßen gleich große Kategoriengruppen als Eingangsgrößen verwenden zu können. Damit konnten Oberflächenkategorien unabhängig von ihrer Auftrittshäufigkeit, in das Modell einfließen. Dadurch konnte die Prozentrichtigkeit von unter 50 % auf über 60 % gesteigert werden.

Anfangs wurden 5 Oberflächenkategorien in das Modell aufgenommen. Zu diesem Zeitpunkt konnten die Oberflächenkategorien 3 und 5 bereits gut vorhergesagt werden, wie in Tabelle 18-1 (als dick gedruckte Zahlen) ersichtlich. Ganz im Gegensatz dazu die Vorhersage der Kategorie 1 und 2. In der Tabelle als unterstrichene Zahlenwerte gekennzeichnet. Zwar wurde die Kategorie 1 und 2 auch als solche am häufigsten vorhergesagt, jedoch zeigte sich, dass die 1 oftmals als eine 2 und die 2 oftmals als eine 1

ausgewiesen wurde. In der Tabelle 18-1 erkennt man dies an den grau hinterlegten Beobachtungen von 12,81 und 15,91. Der Grund für die wenig genaue Oberflächenzuteilung durch das Modell ist in der nur subjektiv vorgenommenen Beurteilung der Oberflächenkategorien zu finden. Den befahrenen Oberflächen wurden vier Kategorien 1,2,3 und 5 zugewiesen. Diese Zuweisung basierte dabei auf den Auswertungen der Mittelwerte wie in Abbildung 13-1 zu sehen ist.

**Tabelle 18-1:** Klassifikationstabelle der Modellvariante II (5 Sekunden Fenster), Die Summe der Zahlenwerte pro Zeile entspricht der Anzahl der Beobachtungen der entsprechenden Oberflächenklassen.

Klassifikation					
Beobachtete Oberflächengüte	Vom Modell ausgewiesene Oberflächengüte				
	1	2	3	5	Prozent richtig
1	23,86	15,91	9,72	1,77	46,6%
2	12,81	28,83	9,61	0	56,3%
3	5,64	8,46	<b>37,14</b>	0	72,5%
5	0	0	0	<b>48,92</b>	100,0%
Prozent insgesamt	20,9%	26,2%	27,9%	25,0%	68,5%

Für das verbesserte Modell wurden die beiden Kategorien 1 und 2, in einer gemeinsamen Klasse zusammengefasst. Damit wurden die Klassen auf 3 Klassen reduziert: (1) für (sehr) gute Oberflächenqualität, (3) für mittlere Obreflächengüte und (5) für sehr unebene Oberflächen (Kopfsteinpflaster o.ä.).Dieser Schritt brachte eine weitere Steigerung der vom Modell richtig erkannten Oberflächenzuteilung auf über 70 %.Das somit erarbeitete Modell beinhaltet die folgenden erklärenden Variablen die im Zuge der Modellberechnung als signifikant ermittelt wurden:

- Maximalwert weniger Minimalwert multipliziert mit dem Logarithmus des Reifendrucks  
MM10MlnReifend
- Standardabweichung des Logarithmus der Beschleunigung  
SDBeschlln
- Standardabweichung des Quadrates der Beschleunigung  
SDBeschlqdr

Dabei erreichte die Richtigkeit der Schätzung 77,8 %. Dies entspricht dem höchsten Wert aller gerechneten Modelle. Dort ist auch zu sehen, dass die Güteklassen selbst, wesentlich eindeutiger bestimmt werden konnten. Dies ist in Tabelle 18-2 an Hand der fett dargestellten Zahlen zu erkennen. Die Tabellen 18-3 und 18-4 zeigen abschließend die Zusammenfassung der Prozentrichtigen aller acht Modelle. Interessant ist auch, dass im verbesserten Modell die Berechnung mit 10 Sekunden-Fenster bessere Ergebnisse erreicht als mit 5 Sekunden-Fenster; beim vorherigen Modell war dies umgekehrt.

**Tabelle 18-2:** Klassifikationstabelle der Modellvariante II (10 Sekunden Fenster), Die Summe der Zahlenwerte pro Zeile entspricht der Anzahl der Beobachtungen der entsprechenden Oberflächenklassen.

<b>Klassifikation</b>				
Beobachtete Oberflächengüte	Vom Modell ausgewiesene Oberflächengüte			
	1	3	5	Prozent richtig
1	<b>45,7</b>	6,17	,88	86,6%
3	16,07	<b>11,20</b>	,48	40,4%
5	0	0	<b>26,07</b>	100,0%
Prozent insgesamt	58,0%	16,3%	25,7%	<b>77,8%</b>

**Tabelle 18-3:** Prozentrichtige der Modellvarianten I und II

Modellvariante	Prozentrichtige je Zeitfenster	
	5 [s]	10 [s]
I	63,60%	57,40%
II	68,50%	57,40%

**Tabelle 18-4:** Prozentrichtige der verbesserten Modellvarianten I und II

Verbesserte Modellvariante	Prozentrichtige je Zeitfenster	
	5 [s]	10 [s]
I	74,80%	77,80%
II	75,70%	77,80%

## 19 VERBESSERUNGSVORSCHLÄGE

Die angeführten verbesserten Modelle I und II des Zeitfensters von 10 Sekunden erreichten den höchsten Erklärungswert von 77,8 %. Auf Grund der durch die Erarbeitung dieses und anderer Modelle erlangten Erfahrungen ist es möglich, Vorschläge für zukünftige Verbesserungen des Verfahrens zu geben. Eine Verbesserung sollte als Kombination von gesetzten Maßnahmen gesehen werden, um einen möglichst hohen Erklärungswert zu erhalten. Als eine solche Kombination an Maßnahmen wären hier folgende Punkte zu nennen.

- Ein größerer Datenpool  
Der Umfang der Erhebungsfahrten sollte erweitert werden.
- Zuteilung der Kategorien  
Es sollte für eine klare Trennung der Kategorien nach objektiven (physikalischen) Eigenschaften gesorgt werden. Eine reine visuelle Beurteilung der Oberflächen ist dafür nicht ausreichend. Das Erstellen einer "Rauhigkeitstabelle" für unterschiedlichste Oberflächen wäre ein Ansatz um die Zuordnung der Kategorien zu verbessern.
- Statistikprogramm  
Wie zu sehen ist basieren alle Modelle auf dem statistischen Softwareprogramm SPSS. Es handelt sich dabei um eine Statistik und Analyse Software die hauptsächlich für Marktwirtschaftliche Fragestellungen entwickelt wurde.  
Die Verwendung der Statistiksoftware R könnte daher zu einer weiteren Verbesserung führen.

## 20 LITERATURVERZEICHNIS

Achim Bühl: Einführung in die moderne Datenanalyse. SPSS 14, 12. Auflage, München 2010

Stopher P. (2008) Collecting and Processing Data from Mobile Technologies. Ressource paper for workshop B4: The Collection and Procesing of Survey Data using Mobile Technologies; 8th International Conference on Survey Methods in Transport, Annecy,France, May 25-31, 2008.

Strnad D. (2008) Enhanced POSTAR Mobility Measurement Technology.

Wolf J., Bonsall P., Oliveira M., Leary L., Lee M. (200?) Review of the Potential Role of“ New Technologies” in the National Travel Survey; Report of work conducted in Work Package 1, GeoStats LP, Atlanta USA and Institute for Transport Studies, University of Leeds, UK.

Wolf J., Lee M. (2008) Synthesis of and Statistics for Recent GPS-enhanced Travel Surveys. Harmonisation and Data Comparability; 8th International Conference on Survey Methods in Transport, Annecy, France, May 25-31, 2008.

Zmud J., Wolf J. (2003) Identifying the Correlates of Trip Misreporting – Results from the California Statewide Household Travel Survey GPS Study. Moving through nets: The physical and social dimensions of travel; 10th International Conference on Travel Behaviour Research, Lucerne, 10-15 August 2003.

## 21 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Mobitest GSL von MGE-Data Prag .....	2
Newtonsche Widerstandsformel: .....	3
Berechnung der Endgeschwindigkeit.....	4
Berechnung der Geschwindigkeitsfunktion.....	4
Abbildung 3-1: Endgeschwindigkeit des fiktiven Versuchskörpers.....	5
Berechnung des Fallweges.....	5
Abbildung 3-2: Darstellung des Verlaufes des Fallweges.....	5
Beschleunigung als Funktion der Zeit.....	6
Abbildung 3-3: Überlagerte Darstellung der theoretisch berechneten Beschleunigung ....	6
und Geschwindigkeit eines Körpers im freien Fall.....	6
Transformationsformel nach Wally (o.J.).....	9
Tabelle 3-1: Die Versuchsergebnisse der Messeinheit im freien Fall .....	12
Abbildung 4-1: Messeinheit am Oberrohr des Fahrrades .....	14
Abbildung 4-2: Sprung.....	14
Tabelle 4-1: Ergebnisse der nach unten gerichteten Beschleunigung .....	16
Abbildung 5-2: Darstellung der vertikalen Beschleunigung in Abhängigkeit des Weges	18
Abbildung 5-3: Offener Straßenzug, Bellariastraße .....	20
Abbildung 5-4: Von Bäumen gesäumter Radweg.....	20
Abbildung 8-1: Gewählte Route .....	24
Tabelle 8-1: Übersichtstabelle der befahrenen Straßen mit Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit.....	25
Abbildung 8-2: Gleiskörper .....	26
Abbildung 8-3: Radweg.....	26
Abbildung 8-4: Pflasterstein .....	26
Abbildung 8-5: Asphalt.....	26
Abbildung 8-6: Rennrad.....	27
Abbildung 8-7: Mountainbike .....	27
Tabelle 8-2: Vergleichstabelle der Fahrräder.....	27
Tabelle 8-3: Befahrungsserien mit zwei Fahrrädern und zwei Geschwindigkeiten.....	28
Abbildung 8-8: Vorderrad.....	29
Abbildung 8-9: Hinterrad .....	29

Abbildung 8-10: Konsole .....	29
Abbildung 9-2: Daten der Kartenansicht .....	32
Tabelle 9-1: Ausschnitt der Zahlenreihe der Messwerte .....	33
Tabelle 9-2: Messprotokoll (MTD Datei) einer 1 [Hz] getakteten Beschleunigungsmessung .....	34
Tabelle 9-3: Definitionen der Raumrichtungen.....	35
Tabelle 9-4: Messprotokoll (MTA Datei) einer 10 [Hz] getakteten Beschleunigungsmessung .....	36
Tabelle 10-1: Korrekturmaßnahme .....	37
Tabelle 11-1: Gruppenstatistik.....	40
Tabelle 11-2: Ergebnisse des Testes bei unabhängigen Stichproben.....	41
Befahrungskombination .....	41
Tabelle 11-3: Befahrungskombinationen; RR Rennrad; MTB Mountainbike; H Hinterrad (28 und 20 km/h).....	41
Tabelle 12-1: Berechnung des gleitenden Mittelwertes für ein zwei Sekunden Zeitfenster .....	43
Abbildung 12-1: Darstellung der gleitenden Mittelwerte .....	44
Tabelle 13-1: Beschreibung der verwendeten Kurzformen.....	46
Tabelle 13-2: Erklärende Variablen .....	47
Tabelle 13-3: Ausschnitt eines Datensatzes.....	48
Tabelle 14-1: Schematische Darstellung zur Ermittlung des Zeitfensters von 5 Sekunden. .....	53
Tabelle 14-2: Schematische Darstellung zur Ermittlung des Zeitfensters von 10 Sekunden.....	53
Tabelle 15-1: Modellvarianten.....	56
Tabelle 15-2: Pseudo - Bestimmtheitsmaße von Modell I (5Sekunden).....	57
Tabelle 15-4: Berechnungsschritte der "Prozent insgesamt" .....	59
Berechnung der modellbeschreibenden Prozentrichtigkeit.....	59
Tabelle 15-5: Berechnungsschritte der Prozentrichtigen.....	59
Tabelle 16-1: Verbesserte Modellvarianten.....	64
Formel 1: Wahrscheinlichkeitsberechnung .....	69

Tabelle 17-3: Auszug der Ergebnisse der gewählten Oberflächengüten im Zuge der Anwendung im Vergleich zu den tatsächlich vorkommenden Oberflächengüten .....	71
Tabelle 17-4: Teilrechnungsschritte der Wahrscheinlichkeitsberechnung nach Formel 8 .....	72
Tabelle 18-1: Klassifikationstabelle der Modellvariante II (5 Sekunden Fenster), Die Summe der Zahlenwerte pro Zeile entspricht der Anzahl der Beobachtungen der entsprechenden Oberflächenklassen. ....	74
Tabelle 18-2: Klassifikationstabelle der Modellvariante II (10 Sekunden Fenster), Die Summe der Zahlenwerte pro Zeile entspricht der Anzahl der Beobachtungen der entsprechenden Oberflächenklassen. ....	75