



TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG  
GEORG SIMON OHM

---

Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

Fakultät Bauingenieurwesen

Masterstudiengang Urbane Mobilität

Masterarbeit von

Helena A n g e r e r

Matrikelnummer: 3051177

---

**Entwicklung von alternativen Methoden  
zur Straßenzustandserfassung**

---

Wintersemester 2021/2022

Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. Berthold Best

Zweitkorrektor: Prof. Roland Kraus

**Kurzzusammenfassung**

Thema der Masterarbeit ist die Entwicklung einer alternativen Methode zur Straßenzustandserfassung. Es wird ein Überblick über die Herangehensweise an die Entwicklung gegeben und Erkenntnisse aus der aktuellen Entwicklungsphase dargelegt.

Als alternative Methode wurde die Straßenzustandserfassung mittels Beschleunigungssensorik betrachtet. Dazu wurde die vertikale Beschleunigung eines Fahrzeugs während der Fahrt gemessen. Anfangs wurde der Sensor an den folgenden Positionen angebracht: Fahrradholm, Fahrzeuginnenraum vorne, Lüftungsgitter, Kofferraum. Diese Versuche wurden sowohl mit Smartphones als auch mit USB-Beschleunigungssensoren aufgezzeichnet. Anschließend wurden Beschleunigungsmessungen mit der GoPro auf der Motorhaube durchgeführt und ausgewertet. Dabei konnte ein Schadensmerkmal identifiziert werden. Auch die Ausbreitung des Schadens konnte aus den Beschleunigungsdaten abgeleitet werden. Gleichzeitig wurde der Einfluss der Längsbeschleunigung auf die gemessene vertikale Beschleunigung sichtbar. An dieser Stelle besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Um in Zukunft umfangreichere Messungen durchführen zu können, wurde ein eigenes Messsystem aufgebaut. Dieses wird von einem Raspberry Pi gesteuert, welcher zwei Beschleunigungssensoren und ein GNSS-Modul anspricht. Um dieses Messsystem zu optimieren werden die fahrzeugspezifischen Einflussfaktoren definiert und ein Messaufbau entwickelt, welcher prüfen soll, ob am Radträger weniger fahrzeugspezifische Einflussfaktoren auf die vertikale Beschleunigungsmessungen wirken als im Innenraum eines Fahrzeugs.

Abschließend wird eine Möglichkeit vorgestellt, wie das Messsystem auf seine praktische und wissenschaftliche Eignung geprüft werden kann. Da aktuell hauptsächlich die Validität der Messdaten von Interesse ist, stehen bereits Referenzdaten von einer ZEB zur Verfügung.

Da die Entwicklung der alternativen Methode zur Straßenzustandserfassung mittels Beschleunigungssensorik noch nicht abgeschlossen ist, wird im Fazit eine Empfehlung für weitere Forschungsthemen ausgesprochen. Vorschläge für weitere Versuche werden gegeben.

**Abstract**

The subject of this master thesis is the development of an alternative method for road condition monitoring. An overview of the engineering is shown and results from the current development phase are presented.

Road condition detection using accelerometer technology was considered as an alternative method. Therefore, the vertical acceleration of a driving vehicle was measured. At the beginning, the sensor was placed in the following positions: bicycle bar, vehicle interior at the front, ventilation grille and the trunk. These experiments were recorded using smartphones as well as a USB accelerometer. This was followed by acceleration measurements with the GoPro on the hood. In this process, it was possible to identify a damage feature. It was also possible to extract the spread of the damage from the data. At the same time, the influence of the longitudinal acceleration on the measured vertical acceleration became visible. At this point, there is still a need for further research.

In order to be able to carry out more complex measurements in the future, a separate measuring system was set up. This is controlled by a Raspberry Pi, which drives two accelerometers and a GNSS module. In order to optimize this measurement system, the vehicle-specific influencing factors will be defined. A measurement setup will be developed to test whether fewer vehicle-specific influencing factors affect the vertical acceleration measurements at the wheel carrier than in the interior of a vehicle. Finally, a way to test the measurement system for its practical and scientific suitability is presented. Currently, the validity of the measurement data is of particular interest, reference data from a ZEB are already available. Because the development of the alternative method for road condition detection using accelerometer technology has not yet been completed, a recommendation for further research topics is made in the conclusion. Suggestions for further experiments are given.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
1.1	<b>Straßenzustandserfassung kommunaler Straßen</b> .....	1
1.2	<b>Überblick über die Projekthistorie</b> .....	2
1.3	<b>Aufbau der Masterarbeit</b> .....	3
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b> .....	4
<b>3</b>	<b>Stand der Technik – Technische Grundlagen</b> .....	5
3.1	<b>Verwendete Messgeräte</b> .....	5
3.2	<b>Verschiedene Zustandsarten</b> .....	9
3.3	<b>Einblicke in die aktuelle Straßenzustandserfassung einer Kommune</b> .....	10
<b>4</b>	<b>Bisherige Messaufbauten</b> .....	13
4.1	<b>Messaufbau – Fahrrad</b> .....	13
4.2	<b>Messaufbau – Fahrzeuginnenraum vorne</b> .....	15
4.3	<b>Messaufbau – Lüftungsgitter</b> .....	16
4.4	<b>Messaufbau – Kofferraum</b> .....	17
4.5	<b>Visuelle Aufnahme</b> .....	18
4.6	<b>Aufnahme der GPS-Daten</b> .....	19
<b>5</b>	<b>Eignung der GoPro als Messsystem</b> .....	21
5.1	<b>Die GoPro HERO9 Black als Messsystem</b> .....	21
5.2	<b>Synchronisierung der Beschleunigungs- und GPS-Daten</b> .....	23
5.3	<b>Durchführung der Messungen</b> .....	26
5.4	<b>Auswertung der Daten</b> .....	26
5.5	<b>Weiteres Vorgehen</b> .....	33
<b>6</b>	<b>Aufbau eines eigenen Messsystems</b> .....	35
6.1	<b>Verwendete Technik</b> .....	35
6.2	<b>Ansteuerung eines Sensors</b> .....	36
6.3	<b>Sensor Einstellungen</b> .....	37

6.4	<b>Abfrage der Beschleunigungssensoren</b> .....	39
6.5	<b>Speichern der Beschleunigungsdaten in eine CSV-Datei</b> .....	42
6.6	<b>Überprüfung der Beschleunigungsdaten aus dem Code</b> .....	44
6.7	<b>Erweiterung um einen weiteren Sensor</b> .....	45
6.8	<b>Abfrage des GNSS-Moduls</b> .....	47
6.9	<b>Weiteres Vorgehen</b> .....	48
7	<b>Fahrzeugspezifische Einflussfaktoren</b> .....	49
7.1	<b>Fahrzeugdynamik</b> .....	50
7.2	<b>Simulation durch ein Matlab-/ Simulinkmodell</b> .....	51
7.3	<b>Messergebnisse Simulation vs. Praxis</b> .....	52
7.4	<b>Schnelle Fourier-Transformation</b> .....	55
7.5	<b>Messaufbau - Radträger mit dem Pi gesteuerten Messsystem</b> .....	57
8	<b>Eignung der Beschleunigungssensoren</b> .....	58
8.1	<b>Praktische Eignung und Wirtschaftlichkeit</b> .....	58
8.2	<b>Wissenschaftliche Eignung – Validität</b> .....	59
8.3	<b>Wissenschaftliche Eignung – Reliabilität</b> .....	60
8.4	<b>Wissenschaftliche Eignung – Objektivität</b> .....	61
9	<b>Fazit und Ausblick</b> .....	62
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	63
	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	68
	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	70
	<b>Anhang</b> .....	71
	<b>Anhang 1: E-Mail Korrespondenz mit der Stadt Nürnberg</b> .....	71
	<b>Anhang 2: E-Mail Korrespondenz mit Code Mercenaries</b> .....	71
	<b>Anhang 3: E-Mail Korrespondenz mit dem Datenschutzbeauftragten der TH</b> ..	75
	<b>Anhang 4: Makro 1</b> .....	75
	<b>Anhang 5: Makro2</b> .....	80

<b>Anhang 6: Marko, um zu speichern.....</b>	<b>81</b>
<b>Anhang 7: Makro, um mehrere Makros auszuführen .....</b>	<b>82</b>
<b>Anhang 8: Makro, um Strecke zu berechnen .....</b>	<b>82</b>
<b>Anhang 9: Code für den Pi.....</b>	<b>83</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>87</b>

**Abkürzungsverzeichnis**

BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
FFT	Fast Fourier Transformation
GIS	Geo-Informationen-System
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
HID	Human Interface Device
IUM	Inertial Measurement Unit
LSB	Least Significant Bit
MSB	Most Significant Bit
QGIS	Open-Source-Geografisches-Informationssystem
TP	Teilprojekt
WGS84	World Geodetic System von 1984
ZEB	Zustandserfassung und -bewertung

## 1 Einleitung

### 1.1 Straßenzustandserfassung kommunaler Straßen

Aktuell erfolgt bei Kommunen eine periodische Erfassung und Bewertung der Zustände der Längs- und Querunebenheit, der Oberflächenschäden und der Griffigkeit der Oberfläche mittels messtechnischer und visueller Zustandserfassung. Durch die periodische Erfassung fehlt der kontinuierliche Überblick über die Zustandsentwicklung der Straße. Dies kann erhöhte Erhaltungskosten zur Folge haben.

Die Erfassungsmethoden einer Kommune wurden von Außerortsstraßen auf die Straßen innerorts übertragen. Dies ist insofern ungeeignet, da sich die Zustände innerorts schneller ändern als außerorts und die Erfassung in personeller und finanzieller Hinsicht ein zu großer Aufwand für die Kommunen ist.

Die Gesamtlänge aller Straßen und Wege im Stadtgebiet der Stadt Nürnberg beträgt 1650 km [1, S. 15]. Die messtechnische Zustandserfassung wird nur auf den Hauptverkehrsstraßen durchgeführt. Dadurch wird der Zustand auf weniger als der Hälfte aller Straßen in Nürnberg messtechnisch erfasst. Für die restlichen Straßen gibt es aktuell noch keine alternative Erfassungsmethode. Dadurch müssen der Zustand und die Verkehrssicherheit dieser Straßen durch Sichtkontrollen von Mitarbeitern der Stadt Nürnberg beobachtet werden (siehe Anhang 1: E-Mail Korrespondenz mit der Stadt Nürnberg).

Unter Anbetracht dessen, dass die Gemeindestraßen streckenmäßig rund drei Viertel des gesamten Straßennetzes in Deutschland ausmachen (siehe Abbildung 1) [2, S. 101], ist es daher zwingend erforderlich, ein auf die kommunalen Bedürfnisse ausgerichtetes System zu entwickeln [3].

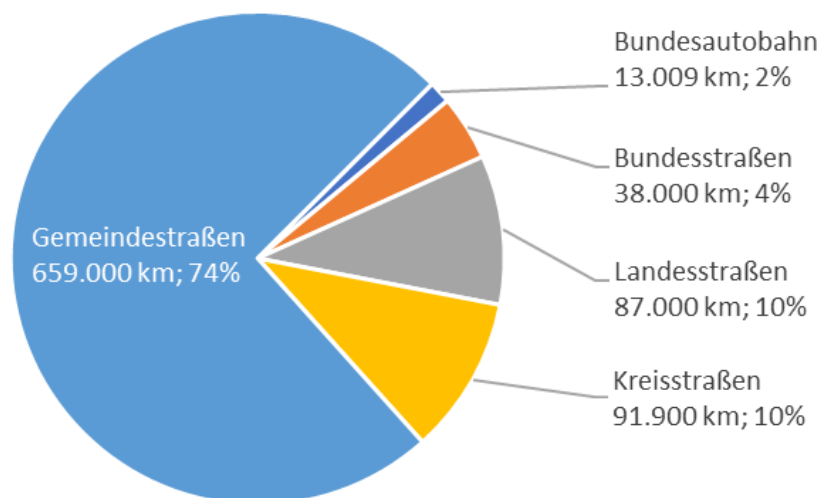


Abbildung 1: Länge des Straßennetzes in Deutschland [2]  
(Stand: 2017, neuste Erfassung inkl. Gemeindefstraßen)



Mit einer alternativen Methode zur Straßenzustandserfassung kommunaler Straßen könnte der Zustand dieser kontinuierlich erfasst werden. Ziel ist es langfristig gesehen ein kostengünstiges Messsystem zu entwickeln, welches die Straßenzustandserfassung im kommunalen Raum bewerkstelligt. Die Daten sollen zur Straßenzustandsbewertung dienen und anschließend in die Erhaltungsplanung einbezogen werden. Auf diesem Weg wäre es möglich, das Erhaltungsmanagement der Kommunen zu unterstützen und durch optimierte Erhaltungsmaßnahmen und geringem personellem Einsatz Kosten zu sparen.

Als alternative Methode wird die Straßenzustandserfassung mittels Beschleunigungssensorik betrachtet. Dazu wird die vertikale Beschleunigung eines Fahrzeugs während der Fahrt gemessen.

## 1.2 Überblick über die Projekthistorie

Die Forschung an einer alternativen Methode zur Straßenzustandserfassung mit Beschleunigungssensorik begann bereits im Jahr 2018 in Zusammenarbeit mit der Royal Melbourne Institute of Technology University (RMIT University) als Partnerhochschule der TH Nürnberg. Der Start des Projekts „Verbesserung der systematischen Straßenerhaltung mittels Schwingungsüberwachung und Bildauswertung“ wurde im Rahmen des Programms „BayIntAn“ von der Bayerischen Forschungsallianz gefördert.

Anschließend förderte die STAEDTLER-Stiftung im Jahr 2019 (Laufzeit 1.6.2019-30.11.2020) das Teilprojekt „Erfassung des Zustandes der Straßenbefestigung mittels Schwingungsüberwachung“. In diesem Projekt sind fünf Abschlussarbeiten an der Fakultät Bauingenieurwesen entstanden. Durch dieses Teilprojekt konnte die grundsätzliche Machbarkeit der Straßenzustandserfassung mittels Erschütterungssensorik nachgewiesen werden.

Um anschließend die Objektivität des Verfahrens, die Reliabilität und die Validität nachzuweisen, wurde von Prof. Berthold Best die Förderung einer Vorlauffinanzierung für das Projekt „Alternative Methoden zur Straßenzustandserfassung“ beantragt. Dieses Forschungsprojekt wurde bewilligt und fördert das Projekt in einem Zeitraum von 15.03.2021 – 31.12.2021 mit 35.000 €. Währenddessen wurde die Forschung durch Abschlussarbeiten an der Fakultät Bauingenieurwesen und ein Masterprojekt an der Fakultät Maschinenbau unterstützt. Die Erkenntnisse der Vorlaufforschung werden in dieser Masterarbeit dargestellt. Außerdem wurden die Erkenntnisse bereits im September 2021 bei

dem 2. Kolloquium Straßenbau in der Praxis an der Technischen Akademie Esslingen vorgetragen und werden im Februar 2022 durch den XVI World Winter Service and Road Resilience Congress in Calgary Canada veröffentlicht.

### **1.3 Aufbau der Masterarbeit**

In dem folgenden Kapitel wird die Aufgabenstellung in Abbildung 2 dargestellt. Anschließend werden die verwendeten Messgeräte erläutert. Ein Überblick über die verschiedenen Straßenzustände und die Art und Weise der aktuellen Straßenzustandserfassung wird gegeben. Daraufhin wird der erste Messaufbau mit dem Fahrrad und anschließend werden die Messaufbauten mit dem PKW aufgeführt. Während diesen Messungen wurde festgestellt, dass in den Metadaten der GoPro Beschleunigungsdaten enthalten sind. Dies wurden im darauffolgenden Kapitel betrachtet. Nachdem dabei festgestellt werden konnte, dass es von Vorteil sein kann in dem Messsystem mehr einstellen zu können, wurde ein eigenes Messsystem in Kapitel 6 aufgebaut. Um das neue Messsystem zu optimieren und vielfältig einsetzen zu können, werden fahrzeugspezifische Einflussfaktoren in Kapitel 7 definiert. Anschließend wird dargelegt wie die praktische und wissenschaftliche Eignung der Beschleunigungssensorik zur Straßenzustandserfassung geprüft werden kann. Um die Validität der Beschleunigungssensorik zu prüfen, können die Zustandsdaten der Stadt Nürnberg als Referenz dienen. Aus den Messungen und Auswertungen werden Erkenntnisse und Schlussfolgerungen gezogen, um Ansätze für den weiteren Verlauf der Forschung zu schaffen.

## 2 Aufgabenstellung

Masterthesis für Frau Helena Angerer, Matr.-Nr: 3051177

### **Entwicklung von alternativen Methoden zur Straßenzustandserfassung**

Eine alternative Methode zur Straßenzustandserfassung soll es den Kommunen ermöglichen den Zustand ihrer Straßen mit einem geringen administrativen und finanziellen Aufwand überwachen zu können. Durch kürzere Abstände zwischen den Messungen oder einer kontinuierlichen Erfassung kommunaler Straßen soll eine treffende Vorhersage über die Entwicklung der Fahrbahneigenschaften getroffen werden. Dadurch werden die Erhaltungskosten und die Bauzeit optimiert. Gleichzeitig führt dies zu einer Erhöhung der Nutzerverfügbarkeit.

Dies soll im Rahmen der Vorlaufforschung „Alternative Methoden zur Straßenzustandserfassung“ erarbeitet werden. Als Methode wird die Zustandserfassung mittels Beschleunigungssensorik verfolgt. Um eine alternative Methode zu entwickeln, müssen verschiedene Studien durchgeführt werden und unterschiedlichen Phänomenen nachgegangen werden.

Diese Masterarbeit soll einen Überblick über die Herangehensweise innerhalb eines Forschungsprojekts geben und die aktuell gewonnenen Erkenntnisse präsentieren.

Verlangt wird:

- Theorie zu der kommunalen Straßenzustandserfassung
- Theorie zu der verwendeten Sensortechnologie
- Aufarbeitung der gesammelten Daten und Informationen der bisherigen Studien
- Darstellung der in dem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse

*Abbildung 2: Aufgabenstellung*

### 3 Stand der Technik – Technische Grundlagen

#### 3.1 Verwendete Messgeräte

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird als alternative Methode zur Straßenzustandserfassung die Erfassung der vertikalen Beschleunigung fokussiert. Voraussetzung für die Straßenzustandsbewertung mit Beschleunigungssensorik ist eine Korrelation zwischen der gemessenen vertikalen Beschleunigung und dem Zustand der Straßenoberfläche. Nach Astarita et al. [4] besteht zwischen den Parametern der vertikalen Beschleunigung und den vorhandenen Oberflächenschäden ein direkter Zusammenhang. Demnach werden für die Messungen verschiedenste Beschleunigungssensoren, auch Accelerometer genannt, verwendet. Die Sensorik ist der Teil der Messtechnik, welcher die Größe der Messdaten zur Weiterverarbeitung in ein elektrisches Signal umwandelt [5].

In dem vorherigen Forschungsprojekt „Erfassung des Zustandes der Straßenbefestigung mittels Schwingungsüberwachung“ wurde der Beschleunigungssensor „JoyWarrior JW24F14-WP“ von „Code Mercenaries“ verwendet. Der Beschleunigungssensor verspricht laut Datenblatt eine Abtastfrequenz von 125 Hz [6]. Bei Testmessungen stellte sich heraus, dass diese Frequenz nicht gehalten werden kann und im Verlauf der Messung absinkt. Da der JW24F14-WP von Code Mercenaries bereits abgekündigt wurde, wird der Sensor von dem Support nicht mehr unterstützt.

Aus diesem Grund wurde in dem jetzigen Forschungsprojekt der Nachfolger „JoyWarrior JW56FR1“ von „Code Mercenaries“ verwendet (siehe Abbildung 3). Dieser Sensor bildet eine inertielle Messeinheit (engl. Inertial Measurement Unit; kurz: IMU). Die verwendete IMU verfügt über einen Beschleunigungsmesser und ein Gyroskop und ist deshalb eine IMU vom Typ 1. Eine IMU vom Typ 2 hätte zusätzlich noch ein Magnetometer verbaut, welches für unseren Anwendungsfall nicht benötigt wird [7].



Abbildung 3: JW56FR1 und Anordnung der Achsen des Sensors [8, 9]

Der Beschleunigungssensor misst mit einer Frequenz von 833 Hz [9]. Der Messbereich der Beschleunigungen muss vor jeder Messung über die Software „MotionPlotter“ eingestellt werden. Die Beschleunigungen werden in Vielfachen der Erdbeschleunigung  $g$  angegeben. Es kann ein Bereich von  $\pm 2 g$ ,  $\pm 4 g$ ,  $\pm 8 g$  oder  $\pm 16 g$  festgelegt werden. Außerdem können an dieser Stelle auch verschiedene Filter ausgewählt werden. Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene Arten von Filtern: low pass Filter und high pass Filter. Der low pass Filter lässt alle Messwerte unterhalb eines bestimmten Wertes durch und zeichnet diese auf. Der high pass Filter hingegen lässt alle Messwerte über der Filtergrenze durch und zeichnet dies auf. Demnach wäre es möglich ein Grundrauschen durch die Motorvibrationen mit einem high pass Filter zu glätten [4, 10].

Der JW56FR1 sendet die Daten in Datenberichten aus bis zu 16 Bits [9]. Demnach wird die Beschleunigung von dem Sensor in der Einheit mg/LSB aufgezeichnet. Um die Messergebnisse des Sensors mit den Messergebnissen anderer Geräte vergleichen zu können, muss die Einheit mg/LSB in die SI-Einheit  $m/s^2$  umgerechnet werden. Hierbei muss der eingestellte Messbereich beachtet werden.

Der Umrechnungsfaktor für den JW56FR1 ist von dem Wert der  $g$ -Auflösung im Messbereich, also 2, 4, 8 oder 16, abhängig und leitet sich folgendermaßen her (siehe Anhang 2: E-Mail Korrespondenz mit Code Mercenaries vom 25.10.2021 um 12:50 Uhr):

$$\frac{(x [g] * 2) * 1000 \left[\frac{mg}{g}\right]}{2^{16} [\text{Bits bzw. LSB}]} \left[\frac{mg}{\text{LSB}}\right]$$

$$x = \pm \text{Wert der } g\text{-Auflösung im Messbereich (2, 4, 8, 16)}$$

Der Umrechnungsfaktoren werden auch im Datenblatt des Sensors angegeben [9]:

*Tabelle 1: Umrechnungsfaktor*

Beschleunigungsauflösung bei $\pm 2g$	0,061 mg/LSB
Beschleunigungsauflösung bei $\pm 4g$	0,122 mg/LSB
Beschleunigungsauflösung bei $\pm 8g$	0,244 mg/LSB
Beschleunigungsauflösung bei $\pm 16g$	0,488 mg/LSB

Da der Messbereich immer um Plus und Minus um den  $g$ -Wert liegt, befindet sich der Nullpunkt der Messskala bei  $\frac{2^{16}}{2} = 32.768$  (siehe Anhang 2: E-Mail Korrespondenz mit

Code Mercenaries vom 25.10.2021 um 12:50 Uhr). Dieser Wert muss in der Formel zuerst vom Messwert abgezogen werden, um einen korrekten g-Wert zu erhalten.

Die Umrechnung der Werte erfolgt durch folgende Formel (siehe Anhang 2: E-Mail Korrespondenz mit Code Mercenaries vom 13.10.2021 um 13:00 Uhr):

$$\frac{(\text{Messwert} \left[ \frac{mg}{LSB} \right] - \frac{2^{16}}{2}) * \text{Umrechnungsfaktor}}{1000} \text{ [g]}$$

Um die Beschleunigung in  $\text{m/s}^2$  zu erhalten, muss der Wert in g noch mit  $9,81 \text{ m/s}^2$  multipliziert werden.

Beschleunigungs- und Drehratesensoren funktionieren nach dem Seismischen Prinzip. Dabei wird die Beschleunigung  $a$  über die Auslenkung einer seismischen Testmasse  $m$  infolge der Newtonschen Trägheitskraft  $F = m * a$  ermittelt. Das physikalische Modell besagt, dass die Beschleunigung  $a$  den Abstand eines Körpers der Masse  $m$  zu einem Referenzpunkt über eine Kombination aus Feder und Dämpfer verändert. Die bewegte Masse wird auch als seismische Masse bezeichnet. Es gibt unterschiedliche technische Ausführungen, um die Bewegung der Masse zu bestimmen. Der JW56FR1 besteht im inneren der wasserfesten Hülle aus einem sechsachsigen MEMS-Sensor [9]. MEMS bedeutet, dass der Sensor auf einem mikro-elektro-mechanischem System basiert [11]. Das wiederum bedeutet, dass in dem JW56FR1 ein mikromechanischer Beschleunigungssensor nach dem kapazitiven Prinzip verbaut ist. Bei diesem Prinzip besteht die seismische Masse  $m$  aus einer Kondensatorplatte, welche durch einen elastischen Federsteg  $k$  gehalten wird. Durch die Beschleunigung  $a$  verändert die Masse  $m$  ihre Position und bewirkt Kapazitätsänderungen an dem Doppel-Kondensatorsystem. Diese Kapazitätsänderungen können durch eine Messbrückenschaltung ermittelt werden [5].

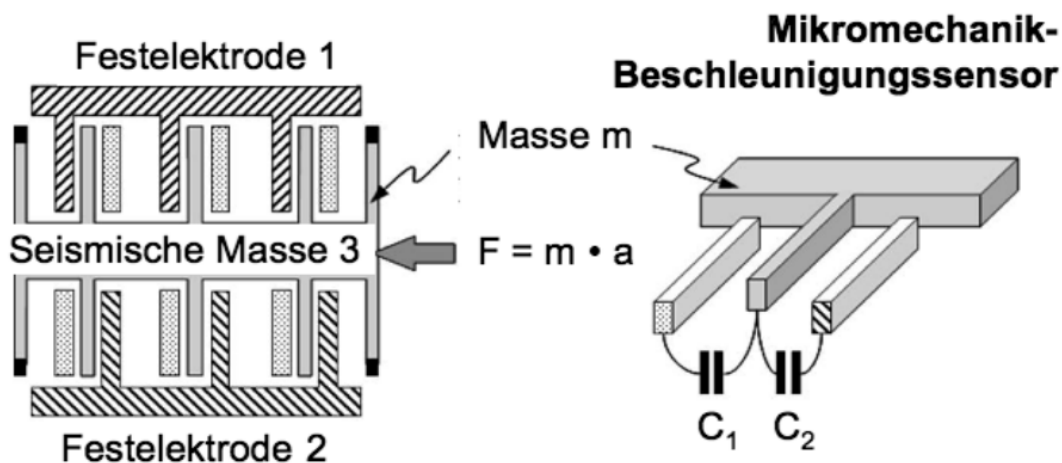


Abbildung 4: Aufbau eines Mikromechanik-Beschleunigungssensors [5]

Neben der Beschleunigung in X-, Y-, und Z-Achse zeichnet der JW56FR1 auch noch die Rotation um die jeweilige Achse und einen Unix-Zeitstempel auf. Die Messwerte von dem Drehratensensor werden im Verlauf dieses Forschungsprojekts bisher nicht beachtet. Der Zeitstempel dient aktuell als einziger Verknüpfungspunkt, um die Beschleunigungsdaten einem Straßenabschnitt zuordnen zu können.

Um die Beschleunigungsdaten referenzieren zu können, findet zeitgleich eine bildbasierte Erfassung der Straße statt. Dazu wurde in dem vorherigen Forschungsprojekt eine GoPro HERO Fusion, eine 360 Grad Kamera, verwendet. Da sich herausgestellt hat, dass die 360 Grad Ansicht nicht benötigt wird, wird in dem jetzigen Forschungsprojekt



Abbildung 5: GoPro Hero9 Black [12]

die GoPro HERO9 verwendet [12]. Die GoPro zeichnet neben dem Video noch weitere Daten auf. Diese können auf der Internetseite [13] aus der MP4-Datei des Videos exportiert werden. Als Metadaten zeichnet die GoPro HERO9 Black unter anderem die GPS-Daten und die Beschleunigungsdaten auf [14, 15].

Aus der Bedienungsanleitung der GoPro [16] geht nicht hervor, ob die GoPro wirklich auf US-amerikanische GPS-Satelliten zugreift oder der Ausdruck GPS bei der GoPro nur deshalb verwendet wird, weil es im Sprachgebrauch als Deonym für verschiedene Satellitensysteme zur Standortbestimmung genutzt wird.

Streng genommen ist GPS nur ein Teil des Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Dieses besteht aus den folgenden satellitengestützten Navigationssystemen: GPS (USA), GLONASS (Russland), Galileo (Europa) und Beidou/Compass (China) [17].

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die GoPro die Standortdaten durch die Verbindung zu GPS-Satelliten ermittelt.

### 3.2 Verschiedene Zustandsarten

Der Straßenbelag kann aus drei verschiedenen Materialien bestehen: Asphalt, Beton, Pflaster. Diese Masterarbeit begrenzt sich allerdings auf die Zustandserfassung von Straßen mit Asphalt als Deckschicht. Der Zustand von Asphaltstraßen innerorts wird in verschiedene Zustandsmerkmale unterteilt. Diese Zustandsmerkmale werden zu Merkmalgruppen zusammengefasst. Unter das Ebenheitsmerkmal fallen die Zustandsmerkmale der Längs- und Querunebenheit. Die Merkmalgruppe Substanz bei der Oberfläche Asphalt umfasst folgende Zustandsmerkmale: Risse, offene Nähte und Fugen, aufgelegte Flickstellen, eingelegte Flickstellen sowie sonstige Oberflächenschäden wie Ausbrüche, Ausmagerungen und Bindemittelanreicherungen [18].

Sobald durch ein Zustandsmerkmal ein Schaden beschrieben wird, ist es ein Schadensmerkmal. Welche Schadensmerkmale mit der Beschleunigungssensorik erfasst werden können, konnte bereits in der ersten Abschlussarbeit an der TH Nürnberg zu diesem Thema von Michael Knüpfer festgestellt werden [19]:

Tabelle 2: Erfassbarkeit der Schadensmerkmale mit der Beschleunigungssensorik

Schadensmerkmale sind mit Beschleunigungssensorik	erfassbar	nicht erfassbar
Längsunebenheit: kurzwellige Längsunebenheit	X	
Längsunebenheit: langwellige Längsunebenheit		X
Querunebenheit (Spurrinnen)		X
Risse: Netzsrisse	X	
Risse: Längsrisse		X
Risse: Querrisse	X	
Offene Nähte und Fugen	X	
Aufgelegte Flickstellen	X	
Eingelegte Flickstellen	X	
Ausbrüche	X	
Ausmagerungen		X
Bindemittelanreicherungen		X

Dadurch, dass die Beschleunigungssensorik auf die Reifenkontaktfläche mit der Straße begrenzt ist, können Straßenebenenflächen, Randbereiche sowie die Entwässerungseinrichtungen nicht aufgenommen werden. Um diese Bereiche in die Erfassung mit einzubeziehen, ist eine visuelle Erfassung notwendig.



### 3.3 Einblicke in die aktuelle Straßenzustandserfassung einer Kommune

Um die Einbindung einer alternativen Methode zur Straßenzustandserfassung in des Erhaltungsmanagement der Kommunen zu ermöglichen, ist es notwendig sich mit der klassischen Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) auseinanderzusetzen. Anschließend kann festgestellt werden wie die alternative Methode mittels Beschleunigungssensorik am besten mit der klassischen Straßenzustandserfassung in Deckung gebracht werden kann. In Anbetracht dessen besteht am Ende der Entwicklung einer alternativen Methode zur Straßenzustandserfassung auch die Möglichkeit die Ergebnisse aus der alternativen Methode mit der Bewertung aus der klassischen ZEB zu vergleichen. Auf Basis dessen kann anschließend die Festlegung von Grenz- und Schwellenwerten für die Straßenzustandserfassung mittels Beschleunigungssensorik erfolgen oder ein anderweitig erarbeiteter Wert mit der Bewertung der klassischen ZEB abgeglichen werden.

Die letzte messtechnische Zustandserfassung und -bewertung der Hauptverkehrsstraßen der Stadt Nürnberg wurde im Jahr 2019 durchgeführt. Die Ausschreibungsunterlagen für jene Erfassung wurden dem Projekt „Alternative Methoden zur Straßenzustandserfassung“ der TH Nürnberg von der Stadt Nürnberg zur Verfügung gestellt. Die Ausschreibungsunterlagen beinhalten teilweise vertrauliche Informationen, welche im Rahmen des Projektes nicht der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden sollen.

Bei einem solchen Auftrag verlangt die Stadt die Darstellung des Ist-Zustands sowie einen Vergleich mit den Daten der vorherigen ZEBen, um die Zustandsentwicklung beobachten zu können. Als Lösung soll ein Bauprogramm aufgestellt werden. Gleichzeitig soll das Anlagevermögen bewertet werden und der Erhaltungsbedarf prognostiziert werden. Eine fototechnische Dokumentation rundet die Unterlagen ab und ist ausdrücklich erwünscht, da diese in der Erhaltungsplanung oftmals verwendet wird.

Diese Streckenbilder werden von Front-, Seiten- und Rückkameras aufgenommen. Die Bilder müssen vor der Übergabe an die Stadt Nürnberg vom Auftragnehmer anonymisiert werden. Aufzeichnungen auf denen Kennzeichen und Gesichter unkenntlich gemacht worden sind, gelten als anonymisiert.

Im Gegensatz dazu sind Datenverarbeitungen zu Forschungszwecken grundsätzlich privilegiert (vgl. Art. 89 DSGVO und Art. 25 BayDSG). Wenn es unmöglich oder nur mit unverhältnismäßigem Aufwand möglich wäre die Betroffenen über die Datenverarbeitung zu informieren und die Forschung im öffentlichen Interesse liegt, dürfen die Daten

auch ohne Einwilligung und Informationspflicht (vgl. Art. 14 Abs. 5b) DSGVO) verarbeitet werden. Laut dem Datenschutzbeauftragten der TH Nürnberg, Herrn Kukle, ist dies zu dokumentieren und entsprechende Aufzeichnungen zwecks Einhaltung der datenschutzrechtlichen Pflichten anzufertigen. Es sei denn die Kameras können, beispielsweise durch einen Filter, so eingestellt werden, dass weder die KFZ-Kennzeichen noch die Personen konkret erkennbar sind. Dies wiederum würde sich mit der Anforderung der Stadt Nürnberg an den Auftragnehmer decken (siehe Anhang 3: E-Mail Korrespondenz mit dem Datenschutzbeauftragten der TH).

Insgesamt befinden sich 710 km Hauptverkehrsstraßen in der Baulast der Stadt Nürnberg. Für die Zustandserfassung werden bei der Ausschreibung einige Kriterien festgelegt, welche in Zukunft auch bei einer alternativen Methode zur Straßenzustandserfassung teilweise berücksichtigt werden sollten. Beispielsweise wird verlangt, dass der Verkehrsfluss durch die Zustandserfassung nicht behindert werden darf. Demnach muss es möglich sein, die Erfassung im fließenden Verkehr durchzuführen. Die Erfassung nach ZEB muss nur auf dem jeweils ersten Fahrstreifen, also dem Hauptfahrstreifen, in Richtung der Stationierung erfolgen. Außer bei Straßen mit mehreren Fahrbahnen, welche durch eine bauliche Vorrichtung getrennt sind, muss die Erfassung in beiden Fahrrichtungen durchgeführt werden.

Die Erfassung wird in zwei Teilprojekte unterteilt. Das Teilprojekt 1 (TP1) umfasst die Erfassung der Ebenheit und ist nochmals aufgeteilt in TP 1a, die Erfassung der Ebenheit im Längsprofil, und TP 1b, die Erfassung der Ebenheit im Querprofil. Das Teilprojekt 3 (TP 3) beinhaltet die Erfassung der Substanzmerkmale der Oberfläche. Bezogen auf die Zustandsmerkmale und Merkmalgruppen aus dem vorherigen Kapitel beschreibt TP 1 die Merkmalgruppe Ebenheit und TP 3 die Merkmalgruppe Substanz.

Ansonsten richten sich die technischen Anforderungen nach den „Zusätzliche(n) Technische(n) Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen“, der „ZVT ZEB-Stb“ (Ausgabe 2018) [20] und nach den „Technische(n) Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, TP Eben - Berührungslose Messungen“ (Ausgabe 2009) [21].

Sowohl in der ZTV ZEB StB Abschnitt 4.2 sowie zusätzlich in der Ausschreibung der Stadt Nürnberg wird festgelegt, dass für die Erfassung von TP 1 und TP 3 nur Messsysteme verwendet werden dürfen, die zum Zeitpunkt der Erfassung bei der Bundesanstalt

für Straßenwesen (BAST) eine gültige zeitbefristete Betriebszulassung besitzen. Außerdem wird festgelegt, dass die Erfassung der TP1 und 3 nur bei ausreichendem Tageslicht und trockener Fahrbahnoberfläche erfolgen darf. Diese Einschränkung wäre bei der Erfassung mittels Beschleunigungssensorik nicht mehr notwendig, sobald die visuelle Aufnahme nicht mehr zur Zuordnung der Messausschläge benötigt werden würde. Eine Studie, ob der Zustand der Straße, trocken oder feucht, einen Einfluss auf die Messung hat, muss an gegebener Stelle erfolgen.

## 4 Bisherige Messaufbauten

Die bisherigen Messaufbauten beinhalten die Nutzung eines Fahrrads und eines PKWs. Die Messfahrten mit dem PKW erfolgten mit dem VW T5 aus der Fakultät Bauingenieurwesen. Es wurden Versuche mit verschiedensten Messaufbauten durchgeführt: Fahrrad, Fahrzeuginnenraum vorne, Lüftungsgitter, Kofferraum. Gleichzeitig hat eine visuelle Aufnahme stattgefunden und die Standortdaten wurden aufgezeichnet.

### 4.1 Messaufbau – Fahrrad

Erste Messungen wurden im Rahmen von der Bachelorarbeit von Herrn Knüpfer [19] mit einem Fahrrad durchgeführt. Das Fahrrad hat den Vorteil, dass die Messtechnik leicht installiert werden und der Aufbau eines Fahrrads übersichtlich konstruiert ist. Außerdem können mit einem Fahrrad ähnliche Geschwindigkeiten wie mit einem PKW erreicht werden, wenn die Messgeschwindigkeit des PKWs auf 30 km/h festgesetzt wird.

Der Messaufbau bei dem Fahrrad besteht aus einer GoPro und zwei Smartphones. Bei der GoPro handelt es sich um eine GoPro Fusion, eine 360 Gradkamera mit 2 Linsen, wobei für den Messaufbau nur eine Linse benötigt wird. Die GoPro wird am Lenker befestigt und zeigt auf die Straßenoberfläche vor dem Fahrrad. Das Smartphone 1 ist ebenfalls am Lenker befestigt. Es ist horizontal ausgerichtet und zeichnet die Beschleunigung mit der App „SensorLog“ auf. Das zweite Smartphone ist am Holm des Fahrrads befestigt und zeichnet die Messwerte mit der App „phyphox“ auf. Damit der Fahrer die Geschwindigkeit möglichst konstant halten kann, befindet sich am Lenker noch ein Tachometer zur Kontrolle der Geschwindigkeit. Der Messaufbau wird in Abbildung 6 dargestellt:

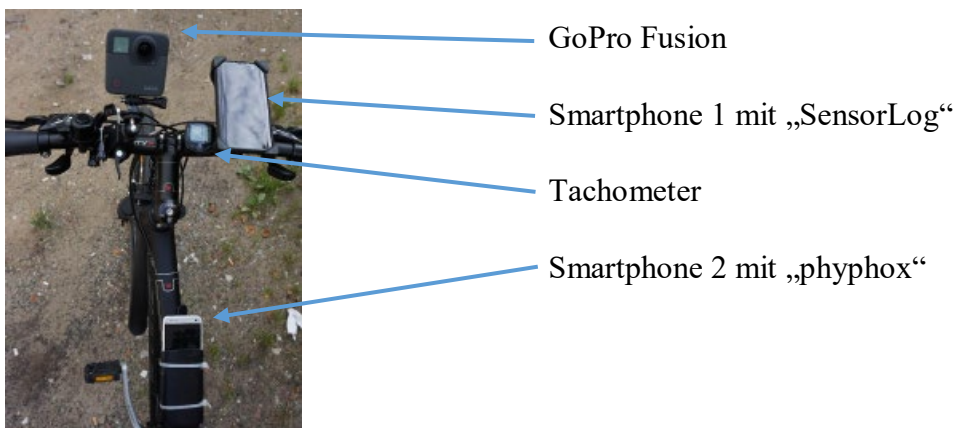


Abbildung 6: Messaufbau Fahrrad [19]

Für die Messungen mit dem Fahrrad wurden Smartphones verwendet. Heutzutage verfügen Smartphones in der Regel über eine Vielzahl an eingebaute Sensoren. Beschleuni-

gungssensoren werden in Smartphones alltäglich verwendet, um beispielsweise Befehle durch das Schütteln des Smartphones auszuführen, die Anzahl der zurückgelegten Schritte mit dem Schrittzähler zu dokumentieren oder um verschiedene Spiele zu spielen. Um den Bildschirm beim Drehen des Smartphones automatisch auszurichten, benötigt das Smartphone ein Gyroskop und um beispielsweise bei Navigationsapplikationen über den Standort zu verfügen, ist ein GPS-Modul verbaut. Da sie durch die oben genannten alltäglichen Anwendungsfälle unter anderem über einen Beschleunigungsmesser und einen GPS-Empfänger verfügen sowie flexibel und einfach einzusetzen sind, scheinen sie für die Nutzung dieser Erfassungsmethode geeignet zu sein [4, 22–27].

Die große Vielfalt und Anzahl der Sensoren machen handelsübliche Smartphones zu leistungsstarken Messgeräten. Dies führt dazu, dass immer mehr Applikationen entwickelt werden und diese dem Verbraucher zur Verfügung gestellt werden [25]. Demzufolge wurden bisher für die Versuche und Messungen einiger Studien das Smartphone als alternatives Messsystem zur Straßenzustandserfassung verwendet [4, 22–27]. Dadurch, dass Smartphones von vielen Menschen tagtäglich verwendet werden, sind diese in ihrer praktischen Handhabung optimiert und überwiegen in diesem Punkt meistens gegenüber anderen Messsystemen. Allerdings sind Smartphones in erster Linie nicht als Messsysteme entwickelt worden. Dies zeigt sich dadurch, dass es wenig bis keine Informationen über die verbaute Hardware gibt und damit auch die Qualität der Sensoren vom Modell des Smartphones abhängig ist [26]. Hinzukommt, dass ein Smartphone in der Regel schneller veraltet und ersetzt werden muss als ein eigens entwickeltes Messgerät. Auch die Applikationen können jederzeit geändert werden, ohne dass der Anwender darüber informiert wird. Demnach ist die verbaute Hard- und Software eines Smartphones zwar laut verschiedenen Studien [4, 22–27] in der Lage als Messsystem zu fungieren aber nicht dafür ausgelegt.

Im Rahmen der Messungen von Michael Knüpfer mit dem Fahrrad wurden als Hardware zwei Smartphones jeweils mit einem Android-Betriebssystem verwendet. Das Smartphone 1, ein „Sony Xperia XA2“, und das Smartphone 2, ein „HTC One mini“. Die Apps „SensorLog“ und „phyphox“ zeichnen die Beschleunigungen mit einer Frequenz von 80–100 Hz auf [19, S. 23].

Die Ausschläge der Erschütterungsdaten über  $2 \text{ m/s}^2$  konnten bei den Messfahrten mit dem Fahrrad mit einer Genauigkeit von 94 % im Video eindeutig zugeordnet werden [19].

## 4.2 Messaufbau – Fahrzeuginnenraum vorne

Bei den ersten Messfahrten mit dem VW T5 wurde wieder die GoPro Fusion für die visuellen Aufnahmen verwendet. Die GoPro wurde auf der Motorhaube befestigt. Die Beschleunigungsdaten wurden mit einem Smartphone im Handschuhfach aufgezeichnet. Der Beschleunigungssensor JoyWarrior-24F14 wurde am Boden zwischen den beiden vorderen Sitzen befestigt. Das Smartphone und der Beschleunigungssensor wurden beide so ausgerichtet, dass die Z-Achse nach oben, die Y-Achse in Fahrtrichtung und die X-Achse nach rechts zeigt (siehe Abbildung 7).

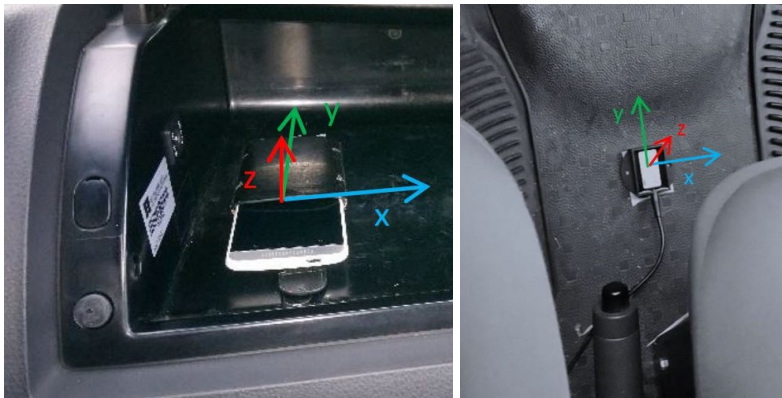


Abbildung 7: Messaufbau Fahrzeuginnenraum vorne [19]

Für die Messungen im Handschuhfach wurde das Smartphone 2 das „HTC One mini“ verwendet. Als Software wurde diesmal auf dem Smartphone 2 die App „SensorLog“ verwendet. Der USB-Beschleunigungssensor JW 24F14-WP wurde im Mitteldurchgang zwischen den beiden vorderen Sitzen angebracht. Dieser wurde von einem Laptop im Innenraum des VW-Busses gesteuert. Der Laptop zeichnet die Werte des Sensors auf. Die Beschleunigungen wurden mit einer Frequenz von 20 Hz aufgezeichnet [19].

Die Ausschläge der Erschütterungsdaten über  $2 \text{ m/s}^2$  konnten mit einer Genauigkeit von 80 % im Video eindeutig zugeordnet werden [19].

Auch wenn die Zuordnung der Daten etwas geringer ausgefallen ist als bei den Messungen mit dem Fahrrad, wird der PKW für weitere Messungen verwendet. Dies hat folgende Gründe:

- Mit dem PKW werden an einem Tag in der Regel mehr Kilometer zurückgelegt als mit dem Fahrrad.
- Im Fahrzeugpool einer Kommune stehen PKWs für Dienstfahrten zur Verfügung, welche mit dem Messsystem ausgestattet werden könnten.
- Die Spurbreite des PKWs ist größer als die eines Fahrrads. Dadurch wird von dem Reifen ein größerer Teil der Straßenbreite überfahren. Dies führt wiederum dazu, dass pro Überfahrt eine größere Fläche der Straße erfasst werden kann.

Auf Grund dessen wurden Fahrten mit einem Personenkraftwagen bevorzugt.

Nachdem im Rahmen von der Bachelorarbeit Herrn Knüpfer der Zusammenhang zwischen den Zustandsmerkmalen der Straße und den Beschleunigungswerten im obigen Messaufbau nachgewiesen werden konnte, wurde der Messaufbau mit weitere Messaufbauten verglichen, um diesen zu optimieren.

### 4.3 Messaufbau – Lüftungsgitter

Wie bereits in der Projekthistorie im ersten Kapitel erwähnt, begann die Forschung an der Straßenzustandserfassung mit Beschleunigungssensorik bereits im Jahr 2018 in Zusammenarbeit mit der Royal Melbourne Institute of Technology University als Partnerhochschule der TH Nürnberg. Dort haben Amir Shtayat und Sara Moridpour das Smartphone mit einer Halterung im Lüftungsschlitze des Fahrzeugs befestigt [27]. Joshua Steinbrecher, von der TH Nürnberg, hat diesen Messaufbau nachgestellt und bei der Suche nach einem optimalen Messaufbau in seiner Bachelorarbeit beachtet [15].



Abbildung 8: Messaufbau Lüftungsgitter [15]

Mit diesem Versuchsaufbau und mit Messungen der App „SensorLog“ konnten Amir Shtayat und Sara Moirdpour in Australien feststellen, dass die Beschleunigungsdaten von der gefahrenen Geschwindigkeit abhängig sind [27].

Dieser Messaufbau wird im Projekt „Alternative Methoden zur Straßenzustandserfassung“ an der TH Nürnberg allerdings kritisch betrachtet. Die Ausrichtung der Lüftungsgitter kann von den Insassen des Fahrzeugs leicht verstellt werden. Das Messsystem wurde dementsprechend an einem beweglichen Bauteil des Fahrzeugs befestigt. Dies führt dazu, dass sich die Ausrichtung des Smartphones durch eine Erschütterung ändern kann. Dadurch würde sich die Ausrichtung der Achsen während der Messung ändern und das Ergebnis verfälschen. Außerdem kann die Erschütterung die dünnen Plastikstege des Lüftungsgitters in Schwingung versetzen. In diesem Fall würden sich die Schwingungen des Bauteils und die Erschütterung, welche durch die Überfahrt über den Schaden erzeugt wurde, überlagern. Eine Auswertung der Messung wäre nicht möglich. Aus diesen Gründen wird der Messaufbau mit dem am Lüftungsgitter befestigten Messsystem an der TH Nürnberg nicht weiter betrachtet.

#### 4.4 Messaufbau – Kofferraum

Um den Messaufbau im Kofferraum zu testen hat Herr Steinbrecher ein iPad links, den JoyWarrior-24F14 in der Mitte und ein Android Smartphone auf der rechten Seite am Boden des T5 befestigt (siehe Abbildung 9) [15].

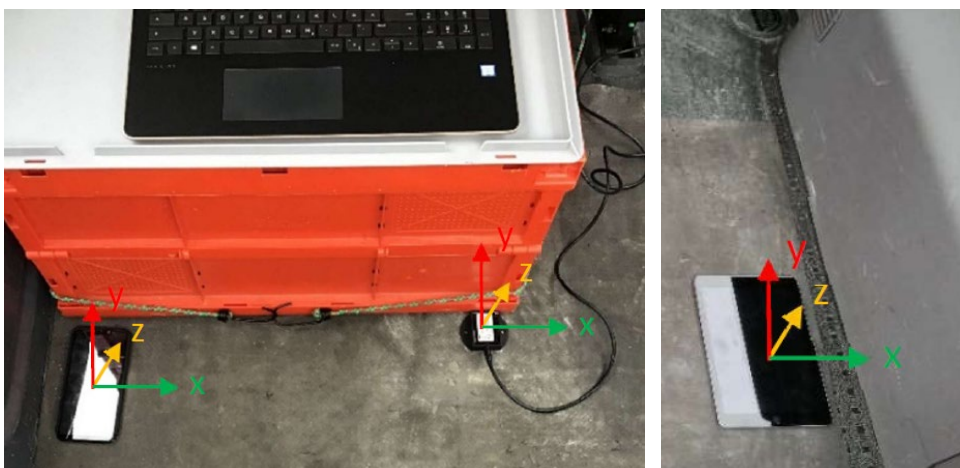


Abbildung 9: Messaufbau Kofferraum [15]

Bei diesem Aufbau wird die Beschleunigung im Kofferraum gemessen. Da der Motor des VW T5 vorne ist und die vordere Achse antreibt, wurden bei diesem Messaufbau die geringsten Störungen durch Motorvibrationen festgestellt [15].



Dadurch, dass die Kamera bei diesem Messaufbau an der Hecktür angebracht war, ist der Abstand zwischen Kamera und Sensoren nicht größer als der Abstand bei den Messaufbauten von Michael Knüpfer. Dadurch ist zu erwarten, dass die Zuordnung zwischen den Messdaten und dem Videomaterial ähnlich ausfällt wie bereits von Michael Knüpfer in seiner Bachelorarbeit festgestellt wurde. Herr Steinbrecher hat diesen Faktor in seiner Bachelorarbeit bei dem Messaufbau im Kofferraum nicht erneut untersucht.

#### 4.5 Visuelle Aufnahme

Für die visuelle Aufnahme wurde in den Arbeiten von Herrn Knüpfer und Herrn Steinbrecher noch die GoPro Fusion verwendet. Im Rahmen der Bachelorarbeit von Herrn Steinbrecher wurden nicht nur verschiedene Positionen der Beschleunigungssensoren, sondern auch verschiedene Positionen der Kamera getestet. Dies liegt unter anderem daran, dass sich die Kamera so nah wie möglich an den Sensoren befinden soll [15, S. 27]. Dadurch wird die Zuordnung der visuellen Aufnahme zu den Werten der Beschleunigungsmessung erleichtert.

Um die Beschleunigungsdaten mit der visuellen Aufnahme der GoPro abzugleichen eignet sich die Anbringung der GoPro auf der Motorhaube und an der Hecktür.

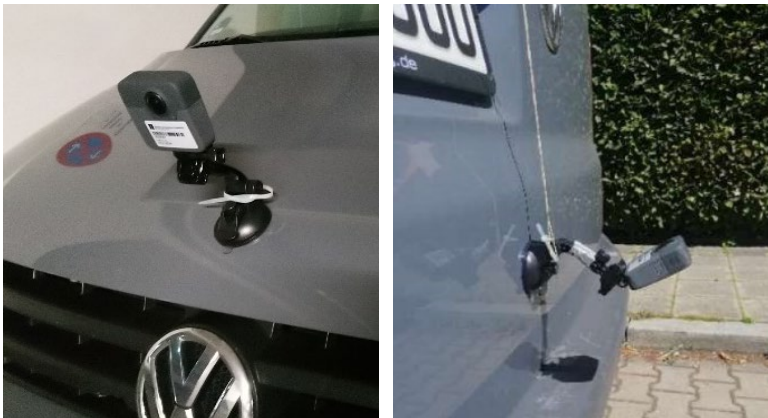


Abbildung 10: Positionen der Kamera [15]

#### 4.6 Aufnahme der GPS-Daten

Da die GoPro durch das verbaute GPS den Standort aufzeichnet, sollte der Raum über der GoPro möglichst frei sein, um den Satelliten Empfang nicht zu stören.

Herr Steinbrecher konnte in seiner Bachelorarbeit feststellen, dass die Standortdaten bei den Messfahrten mit der GoPro an der Hecktür gegen Ende der Messfahrt immer weiter abwichen [15, S. 40]. Die aufgezeichnete Strecke mit der GoPro an der Hecktür ist in Abbildung 11 blau dargestellt. Im Vergleich dazu zeigt die schwarze Linie die GPS-Daten der GoPro während diese auf der Motorhaube befestigt war.



Abbildung 11: Vergleich der GPS-Daten: Motorhaube (schwarz), Hecktür (blau) [15]

Laut Herrn Steinbrecher kann die Abweichung an der Bauform des VW Busses liegen. Dadurch, dass die Hecktür des Busses nahezu senkrecht nach oben führt, hat die GoPro unten an der Hecktür eine eingeschränkte Sicht zu den Satelliten [15, S. 41].

Ansonsten kann das GPS-Signal der GoPro aber auch durch die dichte Bebauung in der Stadt oder durch Bäume, welche nahe an der Straße stehen, geschwächt werden [15, S. 41].

Sowohl bei der GoPro Fusion als auch später bei der GoPro HERO9 Black ist es möglich, die GPS-Daten als CSV-Dateien von der GoPro zu bekommen. Diese CSV-Dateien können in ein GIS-Programm importiert werden. GIS ist die Abkürzung für sämtliche Geo-Informationen-Systeme. An der TH Nürnberg wird dafür das Programm QGIS verwendet. Durch eine Karte im Hintergrund lassen sich die GPS-Daten auch für den Nutzer im Straßennetz lokalisieren. Dadurch kann die gefahrene Strecke wie in Abbildung 11 abgebildet werden.

Anschließend gilt es die Beschleunigungsdaten, aufgenommen von Smartphone/iPad und dem JoyWarrior Sensor, den GPS-Daten zu zuordnen. Hierfür gibt es verschiedene Lösungsansätze:

Durch die im Smartphone verbaute Hardware zur Standortbestimmung sollte es möglich sein, dass die App, welche die Beschleunigungsdaten aufzeichnet auch die Standortdaten aufzeichnet. Dies funktioniert laut Herrn Steinbrecher bei der App „SensorLog“ nicht, hingegen bei der App „phyphox“ schon. Die App „phyphox“ zeichnet im Durchschnitt einen GPS-Wert pro Sekunde auf [15, S. 42].

Der Beschleunigungssensor JW24F14 sowie sein Nachfolger der JW56FR1 hingegen verfügt nicht über ein GPS-Modul. Laut Support ist es auch nicht möglich ein GPS-Modul direkt mit dem Beschleunigungssensor JoyWarrior zu koppeln (siehe Anhang 2: E-Mail Korrespondenz mit Code Mercenaries vom 8.10.2021 um 11:24 Uhr).

Durch die Verwendung von einem Gerät, welches das Video, die GPS-Daten und die Beschleunigung aufzeichnen könnte, könnte die Synchronisierung der verschiedenen Messdaten entfallen. Da Herr Steinbrecher in seiner Bachelorarbeit bei den Metadaten der GoPro auf Beschleunigungsdaten gestoßen ist, erfüllt die GoPro vorerst diese Anforderungen.

## 5 Eignung der GoPro als Messsystem

Bisher wurde die GoPro zur visuellen Aufnahme der Zustandsmerkmale, wie Längs- und Querunebenheiten, Risse, offene Nähte und Fugen, Flickstellen u. w., per Video und zur Aufzeichnung der Standortdaten (GPS) verwendet. Gleichzeitig speichert die GoPro die interne Zeit ab. Die Beschleunigungen, welche bei der Fahrt auf der Straße auf das KFZ wirken, wurden bisher mit einem Beschleunigungssensor aufgezeichnet. Dieser externe Sensor speichert die Systemzeit des Rechners, welcher den Sensor steuert. Eine Synchronisierung der Daten über die Zeit hat sich bei bereits durchgeführten Untersuchungen als nicht ausreichend genau herausgestellt.

Wie bereits erwähnt, wurden in den Metadaten der GoPro Beschleunigungsdaten festgestellt. Dadurch stellt sich nun die Frage, ob die GoPro alleine auch als alternatives Messsystem dienen kann. Wenn die GoPro wie bisher das Video und die GPS-Daten und zusätzlich noch die Beschleunigungsdaten aufnehmen kann, könnten weitere Schritte wie die Synchronisierung der verschiedenen Daten erleichtert werden, wenn nicht sogar entfallen.

In einer Studie [28] wurde geklärt, ob die GoPro alle benötigten Daten (Video, GPS, Beschleunigung) hinreichend genau aufnimmt. Außerdem wurde untersucht, ob die Daten bereits synchronisiert sind oder ob die Synchronisation im Nachhinein erfolgen kann. Anschließend wurde in der Auswertung festgestellt, ob es möglich ist, aus den Beschleunigungsdaten Zustandsmerkmale zu identifizieren. In Summe wurde durch die Studie festgestellt, ob sich die GoPro als alternatives Messsystem zur Straßenzustandserfassung eignet.

### 5.1 Die GoPro HERO9 Black als Messsystem

Die GoPro HERO9 Black von der Marke GoPro ist zum Zeitpunkt der Studie eine aktuelle Actionkamera zum Preis von 430 €. Sie bietet unter anderem die Möglichkeit, Videos mit einer Auflösung von 5K und 30 Bildern pro Sekunde oder mit einer Auflösung von 4K mit 60 Bildern pro Sekunde aufzunehmen [12].

Das Video wird von der GoPro als MP4-Datei abgespeichert. Mit einer webbasierten Anwendung werden aus der MP4-Datei weitere Daten extrahiert [13]. Es wird eine CSV-Datei mit den Beschleunigungsdaten und eine CSV-Datei mit den GPS-Daten erstellt. Die webbasierte Anwendung verfügt nur über die Möglichkeit beide Datenpakete in zwei

einzelnen Tabellen auszugeben. Die Beschleunigungsdaten sind demnach noch nicht mit den GPS-Daten synchronisiert. Die untenstehende Abbildung 12 zeigt einen Ausschnitt der Beschleunigungsdaten als Rohdaten:

```
"cts","date","Accelerometer [m/s2"],"1","2","temperature [°C]"
"116.009","2021-11-25T12:42:30.116Z","10.24220623501199","0.4244604316546763","0.0407673860911271","16.927734375"
"121.08482741116751","2021-11-25T12:42:30.121Z","10.045563549160672","0.1223021582733813","0.21103117505995203","16.927734375"
"126.16065482233502","2021-11-25T12:42:30.126Z","9.94484412470024","-0.31654676258992803","0.24940047961630696","16.927734375"
"131.23648223350253","2021-11-25T12:42:30.131Z","8.973621103117505","-0.05755395683453238","0.2014388489208633","16.927734375"
"136.31230964467005","2021-11-25T12:42:30.136Z","8.815347721822542","-0.019184652278177457","0.2565947242206235","16.927734375"
```

Abbildung 12: Ausschnitt der Beschleunigungsdaten als Rohdaten

„cts“ ist ein Zeitstempel in Millisekunden basierend auf dem Zeitstempel der MP4-Daten. Dies muss bei der webbasierten Anwendung sowohl bei den Beschleunigungsdaten als auch bei den GPS-Daten ausgewählt werden, damit der Zeitstempel cts mit dem Videomaterial übereinstimmt. Wenn dies beim Extrahieren beider Datensätze berücksichtigt wird, verfügen beide Dateien über den gleichen Zeitstempel. Unter dieser Voraussetzung ist es möglich, im späteren Verlauf die Beschleunigungsdaten und die GPS-Daten über den Zeitstempel „cts“ zu synchronisieren. Dies ist von Vorteil, da die Formatierung als Dezimalzahl für Berechnungen besser geeignet ist als das Format von der Spalte „date“. Die Spalte „date“ beinhalten das Datum und die Uhrzeit mit Stunden, Minuten, Sekunden und Millisekunden.

Die nächsten drei Spalten zeigen Beschleunigungswerte in  $\text{m/s}^2$ . Da die Beschleunigungswerte der ersten Spalte um einen Ruhewert von  $9,81 \text{ m/s}^2$  pendeln und die Erdbeschleunigung von  $9,81 \text{ m/s}^2$  dauerhaft auf die z-Achse wirkt, ist ersichtlich, dass es sich hierbei um die z-Achse der GoPro handelt. Durch kurze Messungen konnte festgestellt werden, dass anschließend die x-Achse und dann die y-Achse aufgezeichnet wird. Die Anordnung der Achsen wird in Abbildung 13 dargestellt.

Die letzte Spalte zeichnet die Temperatur auf und ist im Rahmen der Studie bisher irrelevant.



Abbildung 13: Anordnung der Achsen bei der GoPro [12] abgeändert

Durch Betrachtung mehrerer Messungen lässt sich feststellen, dass die Beschleunigungswerte von der GoPro mit einer Frequenz von bis zu 200 Hz aufgezeichnet werden.

Die GPS-Daten können durch die webbasierte Anwendung ebenfalls als CSV-Datei exportiert werden. Die Abbildung 14 zeigt den Beginn des Datenpakets:

```
"cts","date","GPS (Lat.) [deg]","GPS (Long.) [deg]","GPS (Alt.) [m]","GPS (2D speed) [m/s]","GPS (3D speed) [m/s]","fix","precision","altitude system"
"74.905","2021-11-25T12:42:30.074Z","49.4037696","11.053111","318.09","3.761","3.93","3","129","MSLV"
"129.7647894736842","2021-11-25T12:42:30.129Z","49.4037699","11.0531081","318.092","3.778","3.76","3","129","MSLV"
"184.6245789473684","2021-11-25T12:42:30.184Z","49.4037702","11.0531052","318.086","3.802","3.78","3","129","MSLV"
"239.4843684210526","2021-11-25T12:42:30.239Z","49.4037706","11.0531024","318.053","3.819","3.8","3","129","MSLV"
"294.34415789473684","2021-11-25T12:42:30.294Z","49.403771","11.0530996","318.022","3.78","3.82","3","129","MSLV"
```

Abbildung 14: Ausschnitt der GPS-Daten als Rohdaten

Die ersten beiden Spalten „cts“ und „date“ sind identisch mit der Beschleunigungsdatei. Allerdings fällt auf, dass die GPS Datensätze einen größeren zeitlichen Abstand aufweisen als die Datensätze mit den Beschleunigungsdaten. Unter genauerer Betrachtung konnte festgestellt werden, dass die GPS-Daten mit einer Frequenz von bis zu 18 Hz aufgenommen werden.

Die beiden darauffolgenden Spalten beinhalten die geografischen Koordinaten. Die erste der beiden Spalten gibt den Breitengrad und die zweite den Längengrad als Dezimalgrad an. Dabei beziehen sie sich auf das geodätische Referenzsystem namens World Geodetic System von 1984 (kurz: WGS84) [29]. Die Koordinaten werden von der GoPro mit sieben Nachkommastellen aufgezeichnet.

Die Messtechnik der GoPro bezogen auf die Videoqualität, die Nachkommastellen und die Frequenzen der Beschleunigungs- und der GPS-Daten wäre auf Basis der bisher festgestellten Eigenschaften ausreichend. Negativ aufgefallen ist, dass der Anwender keine Einstellungen an dem Beschleunigungssensor vornehmen kann und auch sonst keine Informationen zu der verbauten Messtechnik erhält.

## 5.2 Synchronisierung der Beschleunigungs- und GPS-Daten

Da die beiden Datenpakete, wie bereits in Abbildung 12 und Abbildung 14 dargestellt, in zwei getrennten Tabellen ausgegeben werden, müssen diese in einem weiteren Bearbeitungsschritt zusammengeführt werden. Dies ist notwendig, um die Daten anschließend in einem geografischen Informationssystem, wie beispielsweise QGIS, darstellen zu können. Um die beiden CSV-Dateien in Excel einzulesen, aufzubereiten und anschließend in einer Tabelle zu verknüpfen, wurden mehrere Makros geschrieben. Diese Makros sind variabel auf alle CSV-Dateien anwendbar, sofern diese nach dem oben beschriebenen Verfahren mit Hilfe der webbasierten Anwendung generiert wurden.

Zu Beginn des ersten Makros (siehe Anhang 4: Makro 1) muss die Beschleunigungsdatei und anschließend die GPS-Datei ausgewählt werden. Das Makro liest die Beschleunigungsdaten im Rohformat in das erste Excel-Arbeitsblatt namens „Tabelle1“ und die GPS-Daten in „Tabelle2“ ein. In „Tabelle3“ und „Tabelle4“ befinden sich anschließend die aufbereiteten Daten in einem Tabellenformat von Excel. In „Tabelle5“ werden durch das Makro alle Datensätze, nach der Zeit (cts) sortiert, aufgelistet. Die resultierende Tabelle wird auf die relevanten Spalten begrenzt, sodass der Zwischenschritt folgendermaßen aussieht (siehe Abbildung 15):

cts	Date	Time	Accelerometer z [m/s <sup>2</sup> ]	Accelerometer x [m/s <sup>2</sup> ]	Accelerometer y [m/s <sup>2</sup> ]	GPS (Lat.) [deg]	GPS (Long.) [deg]	GPS (2D speed) [m/s]
74,905	2021-11-25	12-42-30,074				49,4037696	11,0531111	3,761
116,009	2021-11-25	12-42-30,116	10,24220624	0,424460432	0,040767386			
121,0848274	2021-11-25	12-42-30,121	10,04556355	0,122302158	0,211031175			
126,1606548	2021-11-25	12-42-30,126	9,944844125	-0,316546763	0,24940048			
129,7647895	2021-11-25	12-42-30,129				49,4037699	11,0531081	3,778
131,2364822	2021-11-25	12-42-30,131	8,973621103	-0,057553957	0,201438849			
136,3123096	2021-11-25	12-42-30,136	8,815347722	-0,019184652	0,256594724			
141,3881371	2021-11-25	12-42-30,141	9,887290168	-0,215827338	-0,175059952			
146,4639645	2021-11-25	12-42-30,146	10,24940048	0,12470024	0,302158273			
151,5397919	2021-11-25	12-42-30,151	10,27338129	0,136690647	0,035971223			
156,6156193	2021-11-25	12-42-30,156	10,13908873	0,18705036	0,302158273			
161,6914467	2021-11-25	12-42-30,161	9,585131894	-0,194244604	0,189448441			
166,7672741	2021-11-25	12-42-30,166	8,472422062	0,033573141	0,395683453			
171,8431015	2021-11-25	12-42-30,171	9,052757794	-0,143884892	0			
176,9189289	2021-11-25	12-42-30,176	10,34292566	-0,318944844	0,035971223			
181,9947563	2021-11-25	12-42-30,181	10,25899281	0,438848921	0,237410072			
184,6245789	2021-11-25	12-42-30,184				49,4037702	11,0531052	3,802
187,0705838	2021-11-25	12-42-30,187	10,20143885	0,18705036	0,038369305			
192,1464112	2021-11-25	12-42-30,192	9,853717026	0,086330935	0,513189448			

Abbildung 15: Beschleunigungs- und GPS-Daten in einer Tabelle nach cts sortiert

In Abbildung 15 ist zu erkennen, dass das Arbeitsblatt „Tabelle5“ sowohl aus den Beschleunigungsdaten als auch aus den GPS-Daten besteht. Nachdem die Daten nach der Zeit, welche auf der Zeit der MP4-Datei basiert, sortiert sind, könnten die Daten als synchronisiert deklariert werden. Allerdings ist deutlich zu erkennen, dass die Frequenz der Beschleunigungsdaten größer ist als die der GPS-Daten. Um die Beschleunigungsdaten in einem geografischen Informationssystem, wie beispielsweise QGIS, darstellen zu können, müssen den Beschleunigungswerten noch konkrete Koordinaten zugeordnet werden. Dies übernimmt das zweite Makro (siehe Anhang 5: Makro2), welches die fehlenden GPS-Daten durch lineare Interpolation über die Zeit (cts) ergänzt.

Um diese Interpolation durchführen zu können, muss die Tabelle aber erst noch vorbereitet werden. Da es durchaus möglich ist, dass ein Beschleunigungs- und ein GPS-Datensatz gleichzeitig aufgenommen wurde, müssen zuerst diese Fälle identifiziert werden und in einer Zeile zusammengefasst werden. Die andere Zeile wird gelöscht. Da es möglich ist, dass erst ein Beschleunigungswert aufgezeichnet wird und dann erst ein GPS-Wert oder der Beschleunigungswert durch die Frequenz am Ende des Videos länger aufgezeichnet wird, müssen Beschleunigungswerte vor dem ersten und nach dem letzten

GPS-Wert gelöscht werden. Anschließend werden die GPS-Werte linear interpoliert, so dass am Ende jeder Beschleunigungsdatensatz einen konkreten GPS-Datensatz zugewiesen bekommen hat. Dadurch dass die Datensätze des GPS keine Beschleunigungsdaten enthalten, werden diese nach der Interpolation gelöscht. In Abbildung 16 ist die fertige Tabelle dargestellt:

cts	Date	Time	Accelerometer z [m/s <sup>2</sup> ]	Accelerometer x [m/s <sup>2</sup> ]	Accelerometer y [m/s <sup>2</sup> ]	GPS (Lat.) [deg]	GPS (Long.) [deg]	GPS (2D speed) [m/s]
116,009	2021-11-25	12-42-30,116	10,24220624	0,424460432	0,040767386	49,40376982	11,05310883	3,773737344
121,0848274	2021-11-25	12-42-30,121	10,04556355	0,122302158	0,211031175	49,40376985	11,05310856	3,775310246
126,1606548	2021-11-25	12-42-30,126	9,944844125	-0,316546763	0,24940048	49,40376988	11,05310829	3,776883148
131,2364822	2021-11-25	12-42-30,131	8,973621103	-0,057553957	0,201438849	49,40376991	11,05310802	3,778643835
136,3123096	2021-11-25	12-42-30,136	8,815347722	-0,019184652	0,256594724	49,40376994	11,05310775	3,780864402
141,3881371	2021-11-25	12-42-30,141	9,887290168	-0,215827338	-0,175059952	49,40376996	11,05310749	3,783084969
146,4639645	2021-11-25	12-42-30,146	10,24940048	0,12470024	0,302158273	49,40376999	11,05310722	3,785305537
151,5397919	2021-11-25	12-42-30,151	10,27338129	0,136690647	0,035971223	49,40377002	11,05310695	3,787526104
156,6156193	2021-11-25	12-42-30,156	10,13908873	0,18705036	0,302158273	49,40377005	11,05310668	3,789746671
161,6914467	2021-11-25	12-42-30,161	9,585131894	-0,194244604	0,189448441	49,40377007	11,05310641	3,791967239
166,7672741	2021-11-25	12-42-30,166	8,472422062	0,033573141	0,395683453	49,4037701	11,05310614	3,794187806
171,8431015	2021-11-25	12-42-30,171	9,052757794	-0,143884892	0	49,40377013	11,05310588	3,796408373
176,9189289	2021-11-25	12-42-30,176	10,34292566	-0,318944844	0,035971223	49,40377016	11,05310561	3,798628941
181,9947563	2021-11-25	12-42-30,181	10,25899281	0,438848921	0,237410072	49,40377019	11,05310534	3,800849508
187,0705838	2021-11-25	12-42-30,187	10,20143885	0,18705036	0,038369305	49,40377022	11,05310508	3,80275797
192,1464112	2021-11-25	12-42-30,192	9,853717026	0,086330935	0,513189448	49,40377025	11,05310482	3,804330872

Abbildung 16: Tabelle mit Beschleunigungs- und GPS-Werten bei jedem Datensatz

Mit dem Makro „Speichern“ (siehe Anhang 6: Makro, um zu speichern) wird die fertige Datei anschließend automatisch unter dem Pfad der Rohdaten als Excel-Datei mit Makros abgespeichert. Der Name der Datei ergibt sich aus dem Namen des Videos, dem Aufzeichnungsdatum der Daten und dem Zusatz „\_ACC\_und\_GPS“. Zusätzlich wird die fertige Tabelle, also das Arbeitsblatt „Tabelle5“, einzeln als CSV-Datei in UTF-8 Codierung abgespeichert. Der Name der CSV-Datei bekommt zusätzlich den Anhang „\_CSV“. Anschließend wird die Datei mit den Makros automatisch ohne speichern geschlossen. Dadurch wird die Ausgangsdatei nie geändert und kann jedes Mal erneut, als eine Art Programm zum Synchronisieren, genutzt werden. Wenn alle bisher genannten Makros direkt hintereinander ausgeführt werden sollen, ist das mit dem Makro „Ausführen“ möglich (siehe Anhang 7: Makro, um mehrere Makros auszuführen).

Es lässt sich festhalten, dass die Daten von der GoPro vorerst nicht synchronisiert sind, diese im Nachhinein aber mit dem Makro noch synchronisiert werden können. Durch das Makro beträgt der Zeitaufwand pro Messung nur noch eine halbe Minute.

Dadurch sind alle Vorbereitungen getroffen, um Zustandsmerkmale einer Straße mit der GoPro aufzunehmen.



### 5.3 Durchführung der Messungen

Vor den Messungen wurde die GoPro mit der mitgelieferten gebogenen Klebehalterung und dem Befestigungsclip auf der Motorhaube des VW T5 montiert. In den Einstellungen der GoPro wurde eine Auflösung von 4K bei 30 Bildern pro Sekunde mit einem linear eingestellten Objektiv ausgewählt. Die HyperSmooth Funktion, welche das Bild stabilisiert, wurde absichtlich deaktiviert, um später die visuelle Aufnahme und die Ausschläge in dem Verlauf der Beschleunigungsdaten leichter verknüpfen zu können. Die GoPro wurde mit einem Smartphone verbunden, um die Aufnahme aus dem Innenraum des Fahrzeugs starten und stoppen zu können.

Die Messungen erfolgten auf Abschnitten mit wenig Kreuzungen und keinen bevorrechtigt einmündenden Straßen. Lichtsignal geregelte Kreuzungen sowie Kreuzungen und einmündende Straßen, an denen rechts vor links gilt, zwingen den Autofahrer dazu die Geschwindigkeit zu verringern und den Verkehr zu beachten. Da die Messungen geschwindigkeitsabhängig sind, sollten die Aufnahmen mit einer annähernd konstanten Geschwindigkeit durchgeführt werden. Unter Beachtung der oben genannten Punkte wurde für die Messungen ein Abschnitt im Nürnberger Hafen gewählt.

Die Messungen begannen auf der Duisburger Straße Ecke Hamburger Straße, erstreckten sich über die Duisburger Straße, links auf die Bochumer Straße bis diese wieder auf die Hamburger Straße trifft. Die Strecke hat eine Länge von 1,6 km und wurde drei Mal abgefahren.

Die Messungen wurden bei einer Geschwindigkeit von ca. 30 km/h durchgeführt. Um das natürliche Pendeln des Fahrers um die geplante Geschwindigkeit zu verringern, wurde nach dem Erreichen der Geschwindigkeit von 30 km/h der Tempomat aktiviert.

### 5.4 Auswertung der Daten

Bereits beim Befestigen der GoPro hat sich ein Nachteil aufgezeigt: Da die GoPro nicht nur zur visuellen Aufnahme, sondern auch zur Aufzeichnung der Beschleunigungsdaten dient, muss darauf geachtet werden, dass die Ausrichtung der GoPro auch mit den Achsen für die Beschleunigungsmessung übereinstimmt. Demnach ist es nicht möglich, die GoPro für einen anderen Bildausschnitt leicht nach vorne zu neigen. Die GoPro muss senkrecht auf der Motorhaube befestigt werden.

Nachdem aus den Videodateien, wie unter Kapitel 5.1 beschrieben, die Beschleunigungs- und GPS-Daten extrahiert worden sind, wurden diese, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, synchronisiert.

Anschließend wurden die Daten in QGIS eingelesen. Dies wird in Abbildung 17 dargestellt:

In der Abbildung 17 ist zu erkennen, auf welcher Straße die Messung stattgefunden hat. Demnach sind die GPS-Daten hierfür ausreichend. In Abbildung 18 ist die Ungenauigkeit der GPS-Daten dadurch zu erkennen, dass die Position des Messfahrzeugs während dem Stand an verschiedenen Koordinaten aufgezeichnet wurde. Die Ungenauigkeiten bei der Standortaufzeichnung führten bei Video GH010073 im Stand zu einer maximalen Abweichung von 0,57 m (siehe Abbildung 18).

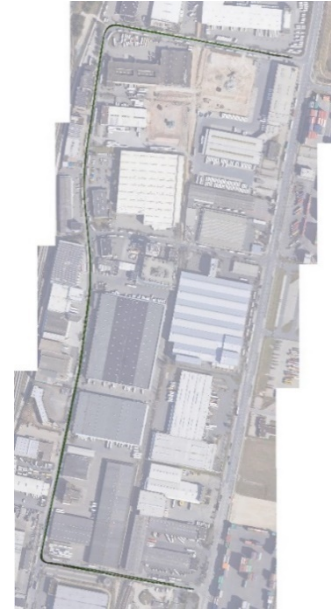


Abbildung 17: Daten in QGIS  
Quelle: Eigene Darstellung

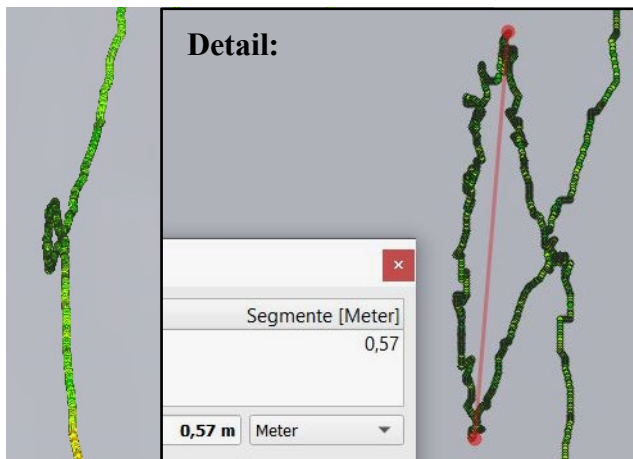


Abbildung 18: Ungenauigkeit der GPS-Daten im Stand

Allerdings ist das GPS nicht genau genug, um die gefahrene Spur zuverlässig auszugeben. In Abbildung 19 ist der Schaden dadurch auf der Gegenfahrbahn verzeichnet.



Abbildung 19: Straßenschaden auf der falschen Fahrspur

In QGIS wurden die Messpunkte abhängig von dem gemessenen Beschleunigungswert farblich unterschiedlich dargestellt. Messpunkte, welche um +/- 0,2 m/s<sup>2</sup> um den Ruhewert von 9,81 m/s<sup>2</sup> liegen, wurden dunkelgrün dargestellt. Messpunkte mit einer größeren Abweichung vom Ruhewert wurden über einen Farbverlauf von hellgrün über gelb nach rot dargestellt.

Um die Messwerte in einem Diagramm darstellen zu können, müssten die Daten noch weiter aufbereitet werden. Da im Verlauf der Messungen Geschwindigkeitsschwankungen vorliegen und das Messfahrzeug zum Vorfahrt gewähren stehen bleiben musste, ist es nicht sinnvoll die Beschleunigungswerte in einem Diagramm über die Zeit darzustellen. Um die Geschwindigkeitsdifferenzen auszugleichen, muss aus der Geschwindigkeit  $v$  und der Zeit  $t$  erst die gefahrene Strecke  $s$  mit folgender Formel berechnet werden:

$$s = v * t$$

Dies erfolgte ebenfalls mit einem Makro (siehe Anhang 8: Makro, um Strecke zu berechnen). Dadurch, dass im Stand die Geschwindigkeit gleich Null ist, ist die zurückgelegte Strecke auch Null. Werden die Beschleunigungsdaten in einem Diagramm über die Strecke dargestellt, werden beliebig viele Beschleunigungswerte aus dem Stand nur einem Wert auf der Achse der Strecke zugeordnet.

Da dies zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Beschleunigungswerte auf der Achse der Strecke führt, muss ein xy-Diagramm zur Darstellung in Excel gewählt werden. Das Punktdiagramm ermöglicht eine ungleichmäßige Verteilung der Werte über beide Achsen. Dies geschieht dadurch, dass die Datenpunkte, bestehend aus Beschleunigungswert und einem Wert für die zurückgelegte Strecke, an dem Schnittpunkt beider Werte im Diagramm eingetragen werden [30].

Im Vergleich dazu würde ein Liniendiagramm die Beschleunigungswerte der Reihe nach immer eine Einheit weiter einzeichnen. Eine zweite Wertachse mit der Strecke oder der Zeit ist nicht vorhanden.

Bevor die drei Messfahrten in ein gemeinsames Diagramm eingetragen werden können, muss eine gemeinsame Kilometrierung gewählt werden. Unter der Annahme, dass bei allen drei Messfahrten der maximale Beschleunigungswert bei der Überfahrt über denselben Straßenschaden erzeugt wurde, kann die Kilometrierung anhand des maximalen Messwertes erfolgen. Die Messreihe, die bei dem maximalen Messwert die größte zurückgelegte Strecke aufweist, wurde als erstes gestartet. Um die anderen Messreihen auf die gleiche Kilometrierung zu bringen, wird auf jeden Streckenwert der anderen Messreihen so viel dazu addiert, dass die Werte der zurückgelegten Strecke beim maximalen Beschleunigungswert gleich sind.

Das nachfolgende Diagramm (Abbildung 20) zeigt auf der y-Achse die Beschleunigungswerte der drei Fahrten und auf der x-Achse die zurückgelegte Strecke in Metern. Zusätzlich ist noch der Ruhewert von  $9,81 \text{ m/s}^2$  und der Schwellenwert bei einer Abweichung von  $\pm 2 \text{ m/s}^2$  vom Ruhewert eingezeichnet. Dieser Schwellenwert wurde von Christoph Raab im Rahmen seiner Bachelorarbeit an der Technischen Hochschule Nürnberg ermittelt [31].

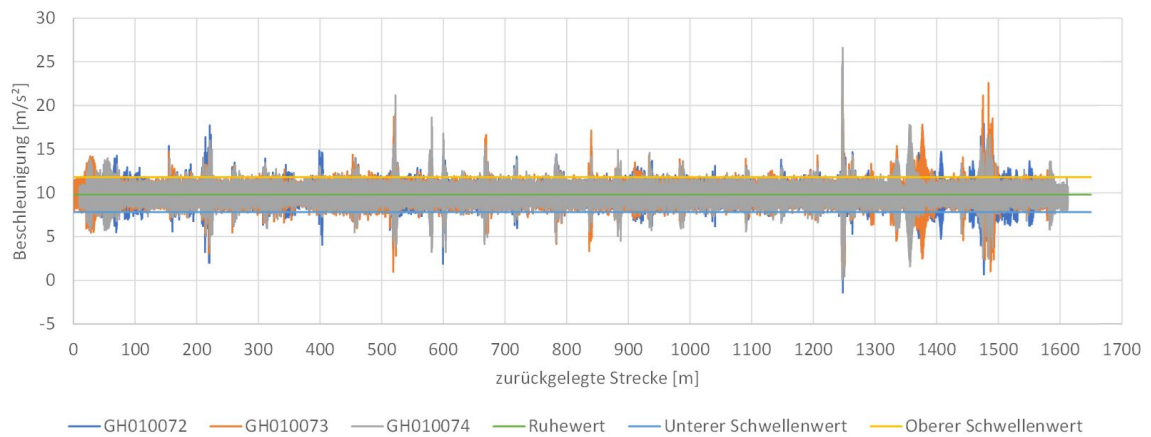


Abbildung 20: Diagramm mit den Beschleunigungsdaten der drei Messreihen

Laut der Kilometrierung und der persönlichen Wahrnehmung stammt der maximale Ausschlag zwischen 1200 m und 1300 m von folgendem Schaden (siehe Abbildung 21):



Abbildung 21: Straßenschaden bei maximalem Ausschlag der Beschleunigung

Bei genauerer Betrachtung der Beschleunigungen im Bereich des maximalen Ausschlags entsteht folgendes Diagramm (siehe Abbildung 22):

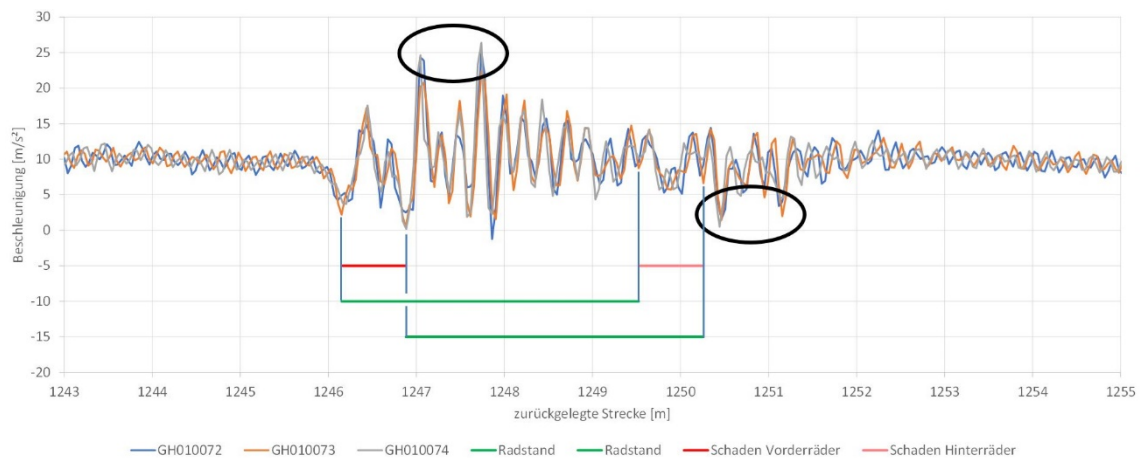


Abbildung 22: Beschleunigungen im Bereich des maximalen Ausschlags

Das Diagramm zeigt den Verlauf der Beschleunigungsdaten aller drei Datenreihen über die Strecke von 1243 m bis 1255 m. Zu Beginn, von 1243 m bis 1246 m, pendeln die Beschleunigungswerte um den Ruhewert von  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Anschließend wird der Verlauf durch den Straßenschaden angeregt und erreicht bei der Datenreihe aus dem Video GH010073 einen Tiefpunkt von  $2,19 \text{ m/s}^2$  bei 1246,15 m. Der nächste, ähnlich stark ausgeprägte, Tiefpunkt von  $0,34 \text{ m/s}^2$  befindet sich bei 1246,88 m. Der Abstand beider Punkte beträgt 0,73 m. Dies entspricht ungefähr der Ausbreitung des Schadens in Längsrichtung, welche tatsächlich zwischen 0,7 m und 0,8 m beträgt. Die bisherigen Schwingungen wurden nur durch die Überfahrt der beiden vorderen Reifen über den Schaden angeregt. Bei einem VW T5 mit einem langen Radstand beträgt der dieser 3,4 m [32]. Folglich gibt es zwei weitere Extrema, welche durch die Überfahrt des Schadens auftreten. Ein Tiefpunkt liegt mit  $8,71 \text{ m/s}^2$  bei 1249,52 m und ein weiterer mit  $6,61 \text{ m/s}^2$  bei 1250,26 m. Der Abstand der beiden Tiefpunkte beträgt 0,74 m.

Der Abstand des ersten Tiefpunktes der Vorderräder zum ersten Tiefpunkt der Hinterräder beträgt 3,37 m und der Abstand des zweiten Tiefpunktes der Vorderräder zum zweiten Tiefpunkt der Hinterräder beträgt 3,38 m. Dies spiegelt den Radstand von 3,40 m wider.

Kritisch anzumerken ist, dass die Auswirkungen der Hinterräder auf den Verlauf der Beschleunigungen ohne weitere Kenntnisse in dem Diagramm nicht ersichtlich sind. Die geringen Auswirkungen können auf den großen Abstand der GoPro zu den Hinterrädern zurückgeführt werden. Interessant ist, dass sich die Beschleunigungen jeweils nach dem

Überfahren des Schadens so überlagern, dass deutlichere Extrema entstehen. Diese Extrema sind in dem Diagramm in Abbildung 22 schwarz eingekreist. Die Abstände der Extrema spiegeln ebenfalls die Ausbreitung des Schadens in Längsrichtung und den Radstand des Messfahrzeugs wider. Diese überlagerten Extrema sind im Diagramm deutlich sichtbar. Angenommen die Überlagerung ist kein Zufall, dann wäre dies eine erste Grundlage, um einen Schaden anhand der Beschleunigungsdaten zu identifizieren und dessen Ausbreitung in Fahrtrichtung zu ermitteln.

Allgemein ist festzustellen, dass der Verlauf der Beschleunigungsdaten der drei Datenreihen nicht immer so synchron ist wie im eben betrachteten Abschnitt in Abbildung 22. Im weiteren Verlauf, gegen Ende der Messung, weisen die Datenreihen einen unterschiedlichen Verlauf auf. In diesem Abschnitt befindet sich eine T-Kreuzung. Dadurch bedingt, wurden die Daten der drei Messreihen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Autos in y-Richtung aufgenommen. Um dies zu betrachten, wird in dem Diagramm in Abbildung 23 der Verlauf der Beschleunigungsdaten auf der Primärachse und die gefahrene Geschwindigkeit auf der Sekundärachse dargestellt.

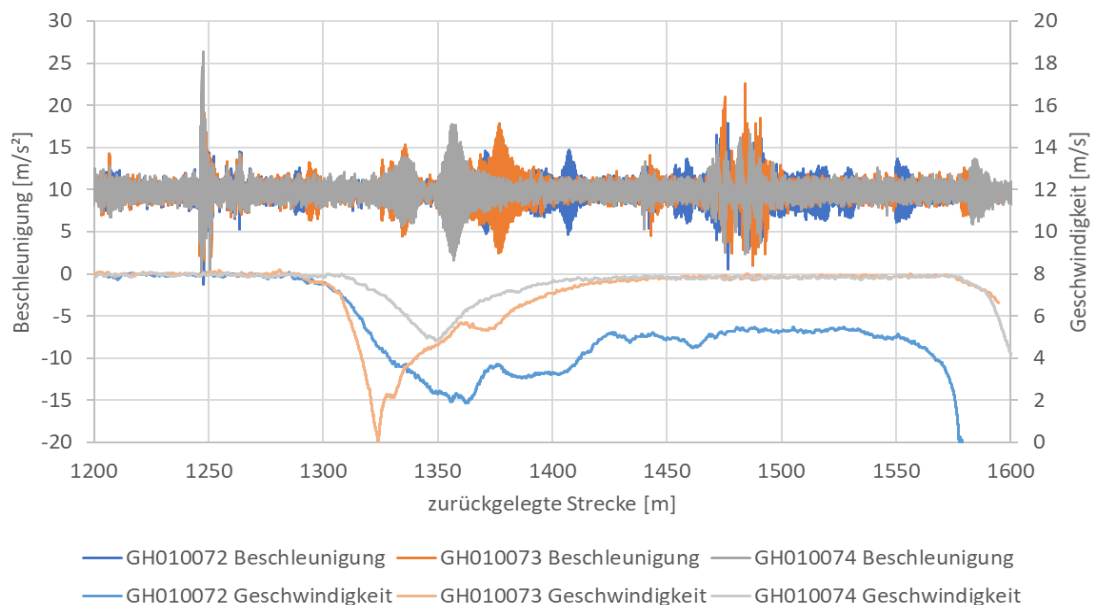


Abbildung 23: Verlauf der Beschleunigungsdaten bei gefahrener Geschwindigkeit

Der untere Graph zeigt den Verlauf der Geschwindigkeiten an. Im Bereich von 1200 m bis ca. 1275 m wurden alle drei Datenreihen noch mit der gleichen Geschwindigkeit aufgezeichnet. Anschließend folgt der Bereich der T-Kreuzung von 1275 m bis ca. 1450 m. In diesem Bereich weisen alle drei Datenreihen einen unterschiedlichen Verlauf der Geschwindigkeiten auf. Dieser Bereich wird im Folgenden noch genauer betrachtet. Da bei der ersten Messreihe die Geschwindigkeit nach der Kreuzung von der Geschwindigkeit

der beiden anderen Messreihen abweicht, erfolgt die genaue Betrachtung des Kreuzungsbereichs zur Vereinfachung anhand der Messreihe GH010073 und der Messreihe GH010074.

In Abbildung 24 ist das Diagramm für die Messreihe GH010073 dargestellt:

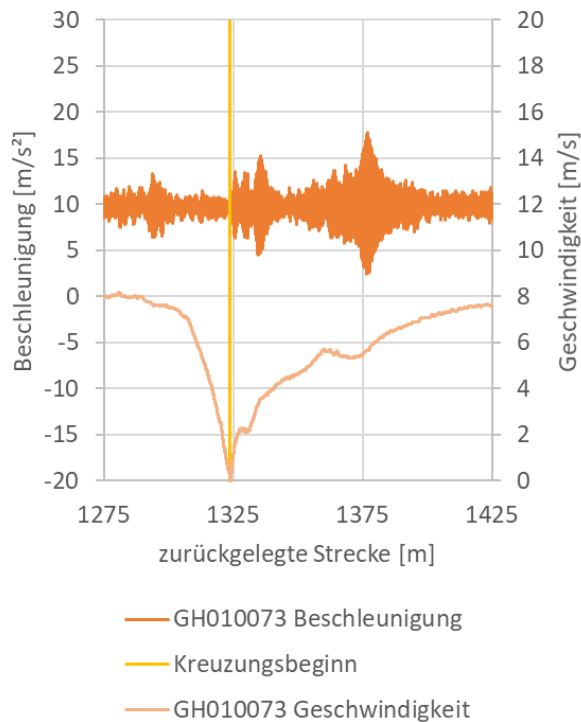


Abbildung 24: Kreuzungsbereich bei der Messreihe GH010073

Im Vergleich zu der vorherigen Abbildung verfügt diese bei ca. 1324 m über einen senkrechten Strich. Da bei dieser Messreihe ein LKW an der Kreuzung Vorfahrt hatte, musste das Messfahrzeug bis zum Stillstand abgebremst werden. Da dies vor der Kreuzung war, symbolisiert der Messwert mit einer Geschwindigkeit von 0  $\text{m/s}$  den Kreuzungsbeginn und wird mit dem senkrechten Strich markiert.

Um die Messfahrt fortzuführen, wurde im ersten Gang angefahren und das Messfahrzeug auf eine Geschwindigkeit von ca. 2  $\text{m/s}$  beschleunigt. Daraus resultieren die ersten Ausschläge nach dem Kreuzungsbeginn. Um von dem ersten Gang in den zweiten Gang zu schalten, wurde die Kupplung betätigt. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Auto nicht mehr beschleunigt. Die Geschwindigkeit verringerte sich nur minimal, aber die Ausschläge im Beschleunigungsprofil sind ähnlich ausgeprägt wie bei der positiven Beschleunigung. Dies könnte daran liegen, dass die Beschleunigung im ersten Gang sehr stark ist und der Trägheitssatz Anwendung findet, wodurch die Ausschläge verstärkt werden. Sobald im

zweiten Gang eingekuppelt wurde, wurde beschleunigt. Dies schlägt sich in den Messwerten in der dritten Gruppe der Ausschläge nieder. Die Beschleunigung im dritten Gang bildet die vierte und letzte Gruppe der Ausschläge.

Das gleiche Diagramm für die Messreihe GH010074 wird in Abbildung 25 dargestellt:

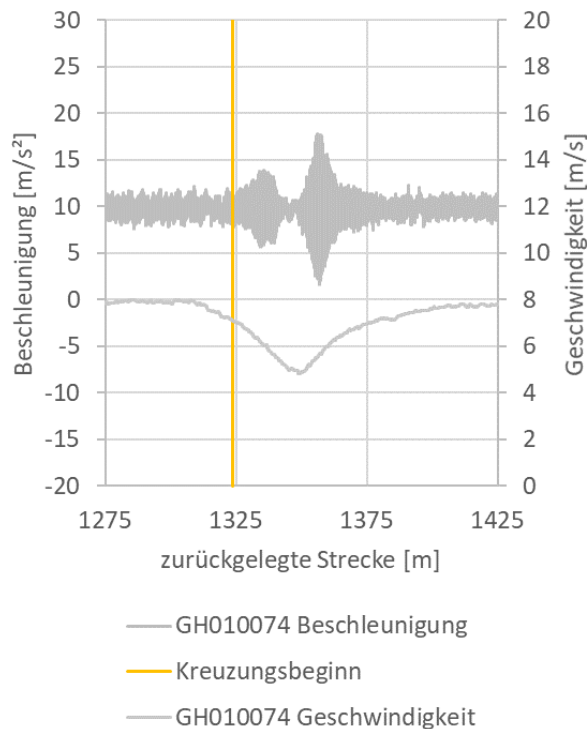


Abbildung 25: Kreuzungsbereich bei der Messreihe GH010074

Der Kreuzungsbeginn aus der vorherigen Messreihe wurde in das Diagramm der Messreihe GH010074 übernommen. Dadurch ist ersichtlich, dass die Geschwindigkeit beim Einfahren in den Kreuzungsbereich verringert wurde und gegen Ende des Kreuzungsbereichs wieder erhöht wurde. Ein Schaltvorgang hat in diesem Fall nicht stattgefunden. Sowohl die negative als auch die positive Beschleunigung des VW-Busses in y-Richtung bilden eine Gruppe an Ausschlägen.

## 5.5 Weiteres Vorgehen

Bei der Untersuchung, ob die GoPro als alternatives Messsystem zur Straßenzustandserfassung geeignet ist, wurde festgestellt, dass alle benötigten Daten (Video, GPS, Beschleunigung) von der GoPro hinreichend genau aufgenommen werden, lediglich das GPS könnte etwas genauer sein. Auch wenn die Daten vorerst nicht miteinander synchronisiert sind, stellt dies kein Problem dar, da sich die Daten im Nachhinein mit einem



Makro synchronisieren lassen. In der Auswertung war es möglich, aus den Beschleunigungsdaten Schadensmerkmale zu identifizieren. Es war sogar möglich, die Ausbreitung eines Schadensmerkmals in Fahrtrichtung zu ermitteln. Auch der Radstand des Messfahrzeugs konnte aus den Beschleunigungsdaten abgeleitet werden. Es stellte sich jedoch auch heraus, dass nicht jeder Ausschlag im Beschleunigungsprofil ein Schadensmerkmal repräsentiert. Die vertikale Achse des Beschleunigungssensors reagiert auch auf die Längsbeschleunigung des Messfahrzeugs. Demnach eignet sich die GoPro zwar als alternatives Messsystem zur Straßenzustandserfassung, allerdings besteht weiterer Forschungsbedarf bevor die GoPro in der Straßenzustandserfassung Anwendung finden kann.

Um die Auswertung im Rahmen weiterer Untersuchungen zu vereinfachen, ist es von Vorteil, wenn in einem Abschnitt nur ein Schadensmerkmal vorliegt. Dadurch wird sichergestellt, dass sich die Auswirkungen mehrerer Straßenschäden in dem Beschleunigungsprofil nicht überlagern. Da die Messungen geschwindigkeitsabhängig sind und der Einfluss der Geschwindigkeit noch nicht genauer untersucht wurde, müssen die Messungen bei einer konstanten Geschwindigkeit aufgenommen werden. Zur Unterstützung bei der Auswertung wird das visuelle Bildmaterial aktuell noch benötigt.

Beim weiteren Vorgehen sollte einerseits die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Beschleunigung des Messfahrzeugs untersucht werden, andererseits müssen Beschleunigungsdaten von den unterschiedlichsten Straßenschäden aufgenommen und ausgewertet werden. Sollten diese Untersuchungen die Erkenntnisse der Studie bestätigen, kann auf der Grundlage der Daten eine künstliche Intelligenz angelehrt werden. Für die weiteren Untersuchungen kann die GoPro durchaus verwendet werden.

Allerdings hat sich im Rahmen des Forschungsprojekts „Alternative Methoden zur Straßenzustandserfassung“ gezeigt, dass es von Vorteil ist, wenn es weitere Informationen und Einstellmöglichkeiten bei dem Beschleunigungssensor gibt. Der Nachteil an der GoPro ist, dass es keinerlei Informationen über die verbauten Komponenten gibt. Selbst die Frequenz wurde in der zitierten Studie nur über die Auswertung der Messprotokolle auffindig gemacht.

## 6 Aufbau eines eigenen Messsystems

Bei fertigen Messsystemen wie beispielsweise einem Smartphone oder der GoPro gibt es wenig bis keine Informationen über die verbauten Sensoren und der Benutzer kann meist keine Einstellungen an den Sensoren vornehmen. Bei dem externen Sensor, dem JW56FR1, können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden. Des Weiteren gibt es ein vollständiges Datenblatt über den Sensor. Dafür kann dieser Sensor im Gegensatz zum Smartphone und der GoPro kein Standortsignal empfangen. Laut Support (siehe Anhang 2: E-Mail Korrespondenz mit Code Mercenaries vom 8.10.2021 um 11:24 Uhr) gibt es auch keine vorbereitete Schnittstelle, um den Sensor mit einem GPS zu koppeln. Werden allerdings sowohl der Sensor als auch das GPS über den gleichen Rechner gesteuert, kann bei beiden die Zeit des Rechners gespeichert werden und die Daten am Ende ähnlich wie bei der GoPro verwendet werden. Dieses Messsystem befindet sich aktuell noch im Aufbau. Dennoch gibt es bereits weitreichende Erkenntnisse.

### 6.1 Verwendete Technik

Es soll ein Beschleunigungssensor und ein GPS-Modul über einen Rechner gekoppelt werden. Der Rechner soll alle Daten aufnehmen und gebündelt als Datei speichern.

Als Beschleunigungssensor wurde weiterhin der JW56FR1 von Code Mercenaries verwendet. Dieser verfügt über zwei Schnittstellen zur Datenaggregation. In dem normalen Modus wird eine Joystick API als Schnittstelle verwendet, welche die Daten mit 833 Hz aufzeichnet. Zusätzlich verfügt der Sensor über einen Highspeed-Modus mit einem HID (Human Interface Device) als Schnittstelle. Die Aufzeichnungsfrequenz im Highspeed Modus beträgt 6664 Hz. Der JW56FR1 hat eine Datenauflösung von 16 Bit [9].

Für das Aufzeichnen des Standorts wird der GNSS-Sensor NL-602U der Firma Navilock verwendet. Dieser verfügt über eine 5 Hz Update-Rate und ist mit einer Genauigkeit von 2,5 m angegeben. Dieser GNSS-Sensor erfasst sowohl US-amerikanische GPS-Satelliten als auch europäische Galileo-Satelliten. Ausschlaggebend für die Verwendung des NL-602U war, dass er unter Linux verwendet werden kann [33].

Linux ist ein modular aufgebautes Betriebssystem, welches Open Source Software ist. Da eine Kooperationsfirma aus dem Projekt „Alternative Methoden zur Straßenzustandserfassung“ ihr Messsystem auf Linux aufgebaut hat, wird das Messsystem in diesem

Kapitel auch unter Linux programmiert. Wenn das Messsystem der TH Nürnberg erfolgreich funktioniert, wäre dadurch eine Implementierung des Moduls in das System der Kooperationsfirma möglich.

Ausgeführt wird das Ganze auf einem Einplatinencomputer in Form des Raspberry Pi 3 B+. Im zukünftigen Verlauf des Projekts soll auf einen Raspberry 4 B umgerüstet werden. Der Raspberry verfügt über ein Linux basiertes Betriebssystem, was eine einfache Anbindung mit kostenlosen Open Source Programmen, sowie Libraries ermöglicht [34].

Auf dem Raspberry Pi muss ein Programm geschrieben werden, welches die Sensoren steuert und die Datenaufzeichnung übernimmt. Durch Internetrecherche ist bekannt, dass durch Privatpersonen ähnliche Vorhaben durchgeführt wurden, deren Ergebnisse sind allerdings nicht für die Öffentlichkeit verfügbar [35]. Dementsprechend musste im Rahmen des Projekts ein eigenes Messprogramm geschrieben werden (siehe Anhang 9: Code für den Pi).

Die Programmiersprache Python 3.6 wurde, auf Grund ihrer weiten Verbreitung in der Datenanalytik, verwendet [36]. Vorteilhaft sind auch die Libraries, wie PyUSB und GPST, welche durch ihre native Einbindung in Python die Datenabfrage der Sensoren vereinfachen. Libraries sind bereits erstellte Programmcode Bausteine, welche beim Programmieren verwendet werden können [37].

## 6.2 Ansteuerung eines Sensors

Auf Grund der Rechteverteilung in Linux müssen jedem USB-Gerät zuerst Rechte im Kernel freigeschalten werden. Erst wenn das USB-Gerät vom Kernel freigegeben wurde, kann dieses unter Linux angesteuert werden [38].

Hierbei wird im Betriebssystem „Pi OS“, welches auf der Linux Distribution „Debian“ aufbaut [34], das Programm „udev“ verwendet. Das Programm „udev“ übernimmt die Rechteverwaltung [39].

Um Zugriffsrechte auf ein neues USB-Gerät, beispielsweise den JW56FR1, zu erlauben, muss in einer, am besten neuen, udev-Datei folgender Code eingefügt werden:

```
SUBSYSTEM="usb", ATTRS{idVendor}=="07c0", MODE="0666"
```

Dieser Code gibt dem JW56FR1 Lese- und Schreibrechte und ist für jedes neue USB-Gerät eines anderen Herstellers zu wiederholen. Die VendorID entspricht dabei der VendorID des entsprechenden Geräts.

Um einen Beschleunigungssensor mit dem Pi über die USB Schnittstelle anzusprechen, wird die Bibliothek PyUSB in Python verwendet.

Der Sensor wird mittels seiner Hersteller ID und der Produkt ID gesucht und als Variable zur Weiterverwendung festgelegt [40]. Die beiden IDs sind bei allen JW56FR1 identisch. Die Hersteller ID ist „0x07c0“ und die Produkt ID lautet „0x111A“.

### 6.3 Sensor Einstellungen

Wie bereits erwähnt, verfügt der JW56FR1 über zwei Modi: den normalen Modus und dem Highspeed Modus. Laut dem Support startet der JW56FR1 immer in dem normalen Modus (siehe Anhang 2: E-Mail Korrespondenz mit Code Mercenaries vom 01.11.2021 um 13:02 Uhr). Demnach muss der Sensor zu Beginn des Codes in diesem Modus angesteuert werden. Dabei können die Einstellung des Modus und die Einstellung weiterer Parameter erfolgen. Folgende Parameter können bei dem JW56FR1 eingestellt werden:

- Messbereich ( $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ ,  $\pm 16g$ )
- Filter (Low Pass Filter, High Pass Filter)
- Grenzfrequenz für Filter
- Einstellen für Gyroskop

Diese Einstellungen erfolgen durch das Senden eines acht Byte langen Datensatzes zum Sensor [9]. Da die Zählweise sowohl bei Bytes als auch bei Bits mit Null beginnt, besteht ein acht Byte langer Datensatz aus den Byte 0 bis Byte 7 [41, S. 8]. Ein Byte wiederum besteht aus acht Bits [41, S. 7]. Um einen Messbereich von  $\pm 16g$  und nur den Low Pass Filter mit einer Grenzfrequenz von 416,5 Hz im normalen Modus oder 3330 Hz im Highspeed Modus einzustellen, ist folgender Code notwendig:

```
# sets sensor to: 16g; LP1 only at 416,5/3330Hz; Gyroscope at 1000dps with no HP filter
Config = [0x00, 0x01, 0x00, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00]
```

Abbildung 26: Sensoreinstellungen

Der Byte 0 lautet „0x00“ und ist der Befehl, dass mit diesem Code Änderungen an den Einstellungen vorgenommen werden sollen. Mit dem Byte 1 wird der Messbereich festgelegt. „0x01“ stellt einen Messbereich von  $\pm 16g$  ein. Für  $\pm 2g$  lautet der Byte 1 „0x00“,

für  $\pm 4g$  „0x02“ und für  $\pm 8g$  „0x03“ [9, Punkt 4.6]. Der Low Pass Filter (LP1) des Beschleunigungssensors ist immer aktiv. Wenn nur der LP1 aktiv sein soll, muss der Bit 6 und Bit 7, also die letzten beiden Bits des Byte 2 gleich Null sein. In dem Datenblatt werden weitere Kombinationen für den sechsten und siebten Bit angegeben, um einen weiteren Low Pass Filter (LP2) oder den High Pass Filter (HP) hinzuschalten. Wenn, wie in unserem Fall, kein High Pass Filter aktiv ist, muss für die Low Pass Bandbreite der Bit 3 des Byte 2 gleich Null sein. Dadurch wird eine Grenzfrequenz von 416,5 Hz im Normalen Modus und 3330 Hz im Highspeed Modus gewählt. Da dann der komplette Byte 2 Null sein muss, lautet der Byte 2 im Hexadezimalsystem „0x00“. Mit dem Byte 3 „0x04“ wird der Messbereich des Gyroskops auf 1000 dps festgelegt. Das Gyroskop wird zum jetzigen Zeitpunkt allerdings noch nicht benötigt. Auch bei dem Gyroskop ist der Low Pass Filter immer aktiv. Dieser liegt im normalen Modus bei 245 Hz und im Highspeed Modus bei 351 Hz. Mit dem Byte 4 könnte der high pass Filter für das Gyroskop aktiviert werden. Mit „0x00“ ist dieser allerdings nicht aktiviert. Die restlichen Byte, also Byte 5 bis Byte 7, sind nicht belegt und lauten deshalb immer „0x00“. Die bisher getroffenen Einstellungen können im Highspeed Modus nicht mehr eingestellt werden und müssen deshalb immer im normalen Modus eingestellt werden.

Der Highspeed Modus ist standardmäßig aus und kann nach dem Anpassen der Einstellungen aktiviert werden. Dazu muss ebenfalls ein acht Byte langer Datensatz an den Sensor gesendet werden. Im Code sieht dies folgendermaßen aus:

```
# activate highspeed mode
ConfigMode = [0x04, 0x01, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00]
```

Abbildung 27: Aktivierung des Highspeed Modus

Der Befehl, dass der Code den Highspeed Modus aktiviert oder deaktiviert, lautet im Byte 0 „0x04“. „0x01“ als Byte 1 aktiviert den Highspeed Mode wie in unserem Fall. Lautet der Byte 1 „0x00“, wird der Highspeed Mode deaktiviert. Alle weiteren Bytes müssen „0x00“ lauten.

Bisher wurden die Variablen für die Einstellungen und den Modus nur festgelegt. Mit dem folgendem Codeausschnitt werden die Variablen an den Sensor gesendet:

```
dev0.write(0x2, Config, 0)
dev0.write(0x2, ConfigMode, 0)
```

Abbildung 28: Übertragung der Einstellungen und des Modus an den Sensor

#### 6.4 Abfrage der Beschleunigungssensoren

Im Highspeed Modus erzeugt der Sensor die Daten mit einer Übertragungsrate von 6664 Hz. Diese Datenrate ist zu hoch, um die Standard Schnittstelle (Joystick API) aus dem Normalen Modus zu verwenden. Im Highspeed Modus werden daher zwei Schnittstellen zur Übertragung der Daten benötigt. In diesem Fall werden zwei Human Interface Device (HID) verwendet. HID ist eine Schnittstelle für USB-Geräte. Eine Schnittstelle ist für die Beschleunigungsdaten zuständig und eine für die Daten des Gyroskops.

Die Daten werden von dem Sensor als Datenpakete über die Schnittstelle an den Pi übertragen. Jedes Datenpaket besteht aus 62 Bytes und beinhaltet zehn Datensätze. Die zehn Datensätze werden in zeitlicher Reihenfolge nacheinander gemessen. Jeder Datensatz besteht aus sechs Werten, welche zur gleichen Zeit aufgenommen wurden. Ein Datensatz beinhaltet folgende Werte: x-Wert in LSB, x-Wert in MSB, y-Wert in LSB, y-Wert in MSB, z-Wert in LSB und z-Wert in MSB. Die Abkürzungen LSB und MSB stammen aus dem Englischen und bedeuten Least Significant Bit (LSB) und Most Significant Bit (MSB) [41, S. 8].

Um Beschleunigungswerte mit einer 16 Bit Auflösung zu erhalten, müssen die LSB- und MSB-Werte zusammengefügt werden. Dazu wird der MSB Byte um acht Stellen nach links verschoben, um die ersten acht Stellen der 16 Bit Auflösung darzustellen. Der LSB Byte stellt die hinteren acht Stellen dar. Dadurch ist der wichtigste Bit (MSB) im MSB Byte und der unwichtigste Bit (LSB) im LSB Byte.

Der nächste Datensatz wurde zu einem späteren Zeitpunkt aufgezeichnet. Durch zehn Datensätze mit jeweils sechs Werten, a ein Byte, besteht das Datenpaket bisher aus 60 Bytes. Die letzten beiden Bytes geben die Innentemperatur des Sensors einmal in LSB und einmal in MSB an. Bei der Schnittstelle des Gyroskops erfolgt dies analog.

Bei der Abfrage des Highspeed Modes ist es zu Problemen der Datenausgabe gekommen. Trotz erfolgreichem Setzen des Modus und der Parameter konnten keine fortlaufenden Daten vom Sensor aufgezeichnet werden. Lediglich ein einziger Datensatz wurde in der Konsole ausgegeben. Nach Angaben des Supports ist hierbei der Linux Kernel das Problem (siehe Anhang 2: E-Mail Korrespondenz mit Code Mercenaries vom 01.11.2021 um 13:02 Uhr).

Aus diesem Grund wird der Sensor aktuell im Normalen Modus verwendet. Dazu muss die Variable zum Einstellen des Modus folgendermaßen lauten:

```
# deactivate highspeed mode
ConfigMode = [0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00]
```

Abbildung 29: Deaktivierung des Highspeed Modus

Wie bereits im vorherigen Kapitel 6.3 erklärt, deaktiviert der Byte 1 mit „0x00“ den Highspeed Modus und der Normale Modus ist aktiv. An den Einstellungen wurde keine Änderung vorgenommen. Demnach ist einen Messbereich von  $\pm 16g$  und nur der Low Pass Filter mit einer Grenzfrequenz von 416,5 Hz eingestellt. Im Normalen Modus ist die Datenaufzeichnung mit einer Frequenz von 833 Hz zu erwarten.

Die Daten werden in einer While-Schleife (siehe Abbildung 30) abgerufen und im RAM zwischengespeichert. Diese Schleife wird solange ausgeführt, bis sie durch die Tastenkombination STRG + C abgebrochen wird.

```
while True:
    Time.append(datetime.now())
    Data0.append(dev0.read(Port, ByteSize, 0))
except KeyboardInterrupt:
    # stop the loop with ctrl + c
    pass
```

Abbildung 30: Daten abrufen und im RAM zwischenspeichern

Im Normalen Modus sendet der Sensor Datenpakete aus je 13 Byte. Dieses setzen sich folgendermaßen zusammen: 2 Byte Acc-X, 2 Byte Acc-Y, 2 Byte Acc-Z, 2 Byte Gyro-X, 2 Byte Gyro-Y, 2 Byte Gyro-Z, 1 Byte Buttons.

Jeweils 2 Byte müssen zusammengeführt werden, um einen Wert mit einer Auflösung von 16 Bits zu erhalten. Hierfür wird vom Support folgendes Codebeispiel genannt (siehe Abbildung 31 und Anhang 2: E-Mail Korrespondenz mit Code Mercenaries vom 01.11.2021 um 13:02 Uhr):

```
x = ( buffer[0] | (buffer[1] << 8) )
y = ( buffer[2] | (buffer[3] << 8) )
usw...
```

Abbildung 31: Codebeispiel, um Wert mit 16 Bits zu erhalten

In dem Code wurde dies folgendermaßen umgesetzt:

```
Value = (Data0[j][i] | (Data0[j][i + 1] << 8))
Output.append(transform(Value, Factor))
```

Abbildung 32: Umrechnung eines Messwerts

Nachdem die beiden Bytes eines Wertes zusammengefügt wurden, wird im Code die Funktion „transform“ ausgeführt. Diese Funktion rechnet den Wert mit der 16 Bit Auflösung in die Einheit  $\text{m/s}^2$  um. Da diese Umrechnung von dem Messbereich abhängig ist, wird zuerst die Variable „Factor“ folgendermaßen definiert:

```
ConfigValue = [0x00, 0x02, 0x03, 0x01]
CalcValue = [2, 4, 8, 16]
i = 0
while i < len(ConfigValue):
    if Config[1] == ConfigValue[i]:
        Factor = (CalcValue[i] * 2) / 2 ** 16
        print(Factor)
        break
    i += 1
```

Abbildung 33: Variable "Factor" als Umrechnungsfaktor

Der Byte 1 der Variable „Config“ lautet im Code „0x01“ und gibt einen Messbereich von  $\pm 16\text{g}$  an. In der While-Schleife findet diese Zuordnung statt. Sobald der „ConfigValue“ mit dem Byte 1 der Variable „Config“ übereinstimmt, wird die Variable „Factor“ mit dem jeweiligen „CalcValue“ berechnet. Die Variable „Factor“ wird in der Funktion „transform“ folgendermaßen eingesetzt:

```
def transform(Value, Factor):
    return ((Value - (2 ** 16 / 2)) * Factor) * 9.81
```

Abbildung 34: Umrechnungsformel von 16 Bits in  $\text{m/s}^2$

Mit der Funktion „transform“ wird der Messwert mit der 16 Bit Auflösung zuerst in g und dann durch die Multiplikation von 9,81 in die Einheit  $\text{m/s}^2$  umgerechnet. Diese Formel wurde bereits im Theorieteil unter Kapitel 3.1 hergeleitet.



## 6.5 Speichern der Beschleunigungsdaten in eine CSV-Datei

Die Beschleunigungsdaten sollen im CSV-Format (Comma Separated Values) gespeichert werden. Hierbei werden die Daten in reiner Textform mit Kommas getrennt gespeichert. Die so erhaltenen Dateien können, wie bei der GoPro in Kapitel 5.2, für die Auswertung in Excel importiert und weiterverarbeitet werden [42].

Neben der bisherigen Verwendung des CSV-Formats wurde dieses weiterhin gewählt, da es in Python ein nativ integriertes Modul gibt, mit dem die Dateien erstellt und beschrieben werden können. Weiter war die finale Dateigröße ausschlaggebend, da der Speicherplatz begrenzt ist und die Dateigröße auf Grund der zukünftig potenziell längeren Testfahrten so klein wie möglich gehalten werden soll.

Zu Beginn der Funktion „write\_data“ wird die CSV-Datei durch folgenden Code angelegt:

```
def write_data(Port, ByteSize, RowNames):
    filename = f'Messdaten/{current_date}/data_{current_time}.csv'
    print(filename)
    os.makedirs(os.path.dirname(filename), exist_ok = True)
    with open(filename, mode='w') as data_file:
        data_writer = csv.writer(data_file, delimiter=',', quotechar='"', quoting=csv.QUOTE_MINIMAL)
        data_writer.writerow(RowNames)
```

Abbildung 35: Erstellung der CSV-Datei

Die Funktion „write\_data“ verwendet die Variablen „Port“, „ByteSize“ und „RowNames“. Im Normalen Modus sind die Variablen folgendermaßen belegt:

```
RowNames = ['time', 'X', 'Y', 'Z', 'rX', 'rY', 'rZ', 'Buttons']
Port = 0x81
ByteSize = 13
```

Abbildung 36: Variablen für die Funktion "write\_data"

Sobald die Funktion „write\_data“ aufgerufen wird, wird zuerst die CSV-Datei angelegt. Dann wird die Kopfzeile mit den Daten aus der Variablen „RowNames“ geschrieben.

Anschließend werden die Daten, wie in Kapitel 6.4 beschrieben, abgerufen und im RAM zwischengespeichert. Sobald die Messung beendet wird, werden die Daten, durch folgenden Ausschnitt aus der Funktion „write\_data“, verarbeitet und in die CSV-Datei geschrieben:

```
print('Starting to process data...')
j = 0
while j < len(Data0):
    Output = []
    Output.append(Time[j])
    ...
    ...
    ...
    data_writer.writerow(Output)
    j += 1
print('Finished processing data!')
```

Abbildung 37: Ausschnitt aus der Funktion, um CSV-Datei zu schreiben

Der Benutzer wird darüber informiert, dass die Daten nun verarbeitet werden. Dies erfolgt Datensatz für Datensatz. Zuerst wird der Zeitpunkt der Aufnahme des Datensatzes in den Output geschrieben. Anschließend folgt die Bitverschiebung sowie die Umrechnung der Messwerte eines Datensatzes aus dem RAM, wie unter Kapitel 6.4 beschrieben. Sobald alle Daten eines Datensatzes im „Output“ stehen, wird dieser Datensatz mit „data.writer.writerow(Output)“ in eine Zeile der CSV-Datei geschrieben. Der Zähler j zählt eins weiter und der nächste Datensatz wird in den Output und von diesem in die CSV-Datei geschrieben. Sobald alle Datensätze aus dem Arbeitsspeicher des Pis verarbeitet und in die CSV-Datei geschrieben worden sind, wird der Benutzer darüber informiert, dass die Verarbeitung der Daten abgeschlossen ist.

## 6.6 Überprüfung der Beschleunigungsdaten aus dem Code

Der Code wurde mittels eines zweiten baugleichen Sensors und dem vom Hersteller bereitgestellten Programm "MotionPlotter" getestet. Dies geschah durch Aufeinanderlegen und Schütteln der beiden Sensoren mit anschließendem Vergleichen der Daten.

Das erste Diagramm zeigt die durch den Code von dem Pi gespeicherten Werte (siehe Abbildung 38):

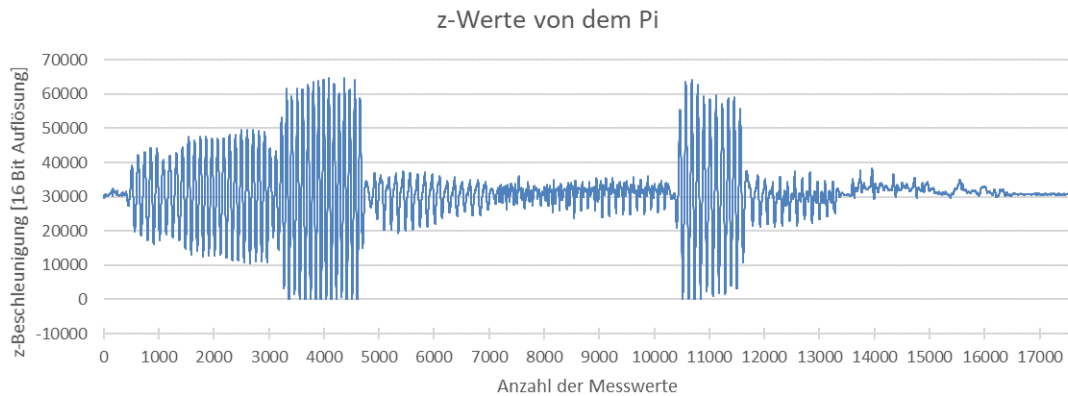


Abbildung 38: Diagramm der Messwerte (z-Werte) von dem Pi

Das zweite Diagramm hingegen zeigt die Werte, welche mit dem Programm „MotionPlotter“ aufgenommen wurden (siehe Abbildung 39):

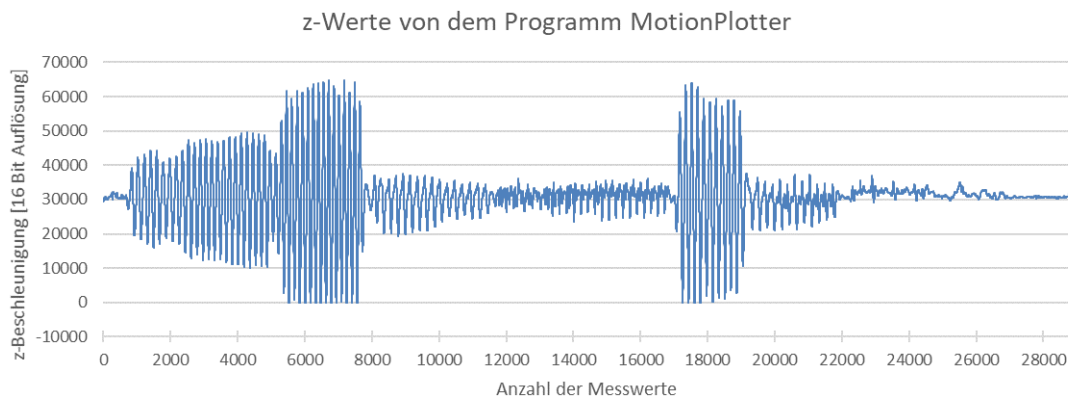


Abbildung 39: Diagramm der Messwerte (z-Werte) von dem "MotionPlotter"

Es ist zu erkennen, dass beide Diagramme den gleichen Verlauf der Messwerte für die z-Beschleunigung aufzeigen. Allerdings unterscheiden sich die beiden Diagramme in der x-Achse. Die x-Achse zeigt bei beiden Diagrammen die Anzahl der Messwerte an. Während die Messreihe von dem Pi aus nur etwas mehr als 17000 Messwerten besteht, verfügt die Messreihe vom MotionPlotter über mehr als 28000 Messwerte. Das bedeutet, dass der Pi die Werte mit einer Frequenz von nur 500 Hz aufzeichnet. Der MotionPlotter hingegen liefert fast die erwarteten 833 Hz. Im weiteren Verlauf des Projekts werden an dieser

Stelle diverse Tests durchgeführt, um die Ursache herauszufinden. Dadurch, dass der Verlauf der Messdaten keinen Unterschied aufzeigt, ist es möglich bis zur Klärung der Ursache den aktuellen Code zu verwenden.

Der Vorteil durch die Verwendung des Pis besteht darin, dass im weiteren Verlauf ein zweiter Sensor implementiert werden kann. Dadurch wäre der direkte Vergleich von zwei verschiedenen Messorten möglich. Außerdem könnte im weiteren Verlauf das GPS-Modul auch über den Pi gesteuert werden. Dadurch können die Standortdaten mit den Beschleunigungsdaten gekoppelt werden.

### **6.7 Erweiterung um einen weiteren Sensor**

Um in Zukunft die Beschleunigung an zwei Orten gleichzeitig messen und direkt miteinander vergleichen zu können, wird eine weiterer Sensor implementiert.

Bisher wurde das standardmäßige Verfahren von PyUSB genutzt und mittels VendorID und ProductID der Sensor angesteuert [40]. Über diesen Weg ist es allerdings nicht möglich einzelne Geräte zu identifizieren, sondern lediglich die Baureihe einzugrenzen. Dadurch ist es nicht möglich, zwei identische Sensoren getrennt voneinander anzusprechen.

Da zwei gleichartige Beschleunigungssensoren im Messaufbau verwendet werden sollen, wurde das Programm nach der Einbindung eines Sensors um die Funktion mit mehreren Sensoren erweitert. Hierbei wurden weite Teile des vorhandenen Codes für den zweiten Sensor durch Anpassung der Variablen und Nutzung von Funktionen übernommen.

Abbildung 40 zeigt den Ausschnitt des Codes, wie am Anfang festgestellt werden kann, ob kein, ein oder zwei Beschleunigungssensoren angeschlossen sind.

```

if usb.core.find(idVendor=0x07c0, idProduct=0x111A) is None:
    raise ValueError('No sensor found')
else:
    # Test to find how to add multiple devices
    List = usb.core.find(find_all=True, idVendor=0x07c0, idProduct=0x111A)
    count = 0
    while count < 2:
        # for item in List:
            if count == 0:
                dev0 = next(List)
                device(dev0)
                dev0.set_configuration()
                count += 1
            else:
                try:
                    dev1 = next(List)
                    device(dev1)
                    dev1.set_configuration()
                    count += 1
                    multiple = True
                    print('2 sensors connected')
                except:
                    count = 2

```

Abbildung 40: Code, um zu ermitteln wie viele JW56FR1 angeschlossen sind

Es wird eine Liste mit allen USB-Geräten erstellt, welche die Hersteller ID „0x07c0“ und die Produkt ID „0x111A“ besitzen. Wenn mehr als ein Sensor angeschlossen wurde, wird der boolesche Operator „multiple“ wahr.

Dadurch ist noch nicht definiert, welcher Sensor welcher ist. Durch das Auslesen der USB-Schnittstelle im Code, sowie einer Nachfrage beim Support wurde die Seriennummer der Sensoren als Möglichkeit der Identifikation ausfindig gemacht (siehe Anhang 2: E-Mail Korrespondenz mit Code Mercenaries vom 9.12.2021 um 10:03 Uhr). Dies wird im Coder folgendermaßen umgesetzt:

```

if multiple == False:
    RowNames = ['time', 'X', 'Y', 'Z', 'rX', 'rY', 'rZ', 'Buttons']
elif multiple == True and usb.util.get_string(dev0, dev0.iSerialNumber) == '00000458':
    print('dev0 outside, dev1 inside')
    RowNames = ['time', 'X Outside', 'Y', 'Z', 'rX', 'rY', 'rZ', 'Buttons', 'X Inside', 'Y', 'Z', 'rX', 'rY', 'rZ', 'Buttons']
else:
    print('dev0 inside, dev1 outside')
    RowNames = ['time', 'X Inside', 'Y', 'Z', 'rX', 'rY', 'rZ', 'Buttons', 'X Outside', 'Y', 'Z', 'rX', 'rY', 'rZ', 'Buttons']

```

Abbildung 41: Zuordnung zweier identischen Sensoren

Wenn der boolesche Operator „multiple“ falsch ist, also nur ein Sensor angeschlossen ist, ist es egal welcher es ist und die Datei erhält die gleiche Kopfzeile wie bisher.

Wenn der boolesche Operator „multiple“ wahr ist, wird ausgelesen welche Seriennummer der Sensor „dev0“ hat. Wenn es der Sensor mit der Seriennummer „00000458“ ist, erhält dieser den Zusatz „outside“. Auch die Werte in der Kopfzeile erhalten den entsprechenden Zusatz. Dies liegt daran, dass Messungen durchgeführt werden sollen, bei denen sich ein Sensor außerhalb des Fahrzeuginnenraums und ein Sensor im Fahrzeuginnenraum befinden soll. Dieser Zusatz kann jederzeit an die geplanten Messungen angepasst werden.

Angenommen der Sensor „dev0“ besitzt nicht die angegebene Seriennummer, dann erhält der Sensor den Zusatz „inside“ und der andere Sensor erhält den Zusatz „outside“. Dadurch ist sichergestellt, dass die Werte von dem Sensor mit der Seriennummer „00000458“ benutzerunabhängig immer den Zusatz „outside“ erhalten. Eine dementsprechende Beschriftung der Sensoren wurde vorgenommen.

Durch diese Lösung im Code und das Beschriften der Sensoren wird das Risiko die Sensoren falsch anzubringen minimiert und das Aufzeichnen mit den richtigen Einstellungen gewährleistet.

## **6.8 Abfrage des GNSS-Moduls**

Zur Positionierung der Datensätze wird ein GNSS-Sensor verwendet. Das Einbinden in den Code konnte hierbei allerdings nicht, wie bei den Beschleunigungssensoren, mittels PyUSB erfolgen. Die USB-Schnittstelle des GNSS-Sensors gibt bei dieser Vorgehensweise keine verwertbaren Daten aus. Durch Recherche der Sensordokumentation wurde festgestellt, dass der Sensor das NMEA 0183 (National Marine Electronics Association) Protokoll unterstützt. Nachdem in Linux verifiziert werden konnte, dass der Sensor Daten überträgt, wurde nach einer Schnittstelle gesucht und mit dem Programm GPSD diese gefunden. Das Programm GPSD funktioniert hierbei als Übersetzer zwischen dem vom Sensor ausgegebenen NMEA Format und dem gewünschten Breiten- und Längengrad. Da GPSD auf dem Format JSON (JavaScript Object Notation) basiert, müssen die Daten anschließend noch umgewandelt werden. Die Implementierung des GNSS-Sensors ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht komplett abgeschlossen.

## 6.9 Weiteres Vorgehen

Im weiteren Verlauf muss der Code für die Abfrage des GNSS-Moduls fertig gestellt werden. Anschließend kann die CSV-Datei mit den Beschleunigungsdaten und die CSV-Datei mit den Standortdaten genauso wie bei der GoPro (siehe Kapitel 5.2) zusammengefügt, sortiert und interpoliert werden. Dies wird vorerst mit den bereits vorhandenen Makros erfolgen. Um die Makros von der GoPro auch für die Daten des Pis zu verwenden, werden nur geringe Anpassungen notwendig sein. Damit eine automatische Verarbeitung der Daten durch den Pi erfolgen kann, bedarf es erneut Einarbeitung und Zeit zum Programmieren. Dafür ist der Zeitaufwand der Datenverarbeitung nach der Messung geringer. Erst, wenn die ersten Daten ausgewertet wurden und aufschlussreich sind, ist die Programmierung der automatischen Datenverarbeitung in Python zielführend.

Außerdem ist weiterhin zu klären, warum der Pi die Daten nur mit einer Frequenz von 500 Hz und nicht mit 833 Hz abfragen kann. Es konnte beobachtet werden, dass sich die Frequenz bei der Verwendung von zwei Sensoren halbiert. Der Pi kann dann nur noch Daten mit einer Frequenz von 250 Hz auslesen. Trotzdem wird die Messung mit dem Pi gegenüber dem Programm „Motionplotter“ aus den folgenden Gründen bevorzugt:

- Die Zeit kann mit dem Pi genauer aufgezeichnet werden. Der „MotionPlotter“ zeichnet den Unix Zeitstempel auf. Dieser gibt die Zeit sekundengenau an, der Pi hingegen im Bereich der Millisekunden.
- Durch den Raspberry Pi besteht die Möglichkeit die Standortdaten mit den Beschleunigungsdaten zu koppeln. Da beide Daten mit der Uhrzeit des gleichen Geräts versehen werden und dadurch keine Zeitdifferenzen vorliegen.

Die Verwendung des Messsystems mit dem Pi würde auch gegenüber der GoPro bevorzugt werden. Dazu sind folgende Gründe Ausschlag gebend:

- Auch mit einer Frequenz von 250 Hz liefert der Pi mehr Daten als die GoPro, welche 200 Hz liefert
- Die externen Sensoren können vielseitiger am Fahrzeug angebracht werden.
- Durch die beiden Sensoren kann die Beschleunigung an zwei verschiedenen Orten gleichzeitig aufgenommen werden und anschließend die Daten miteinander verglichen werden.
- Das Messsystem mit dem Pi ist kostengünstiger als die GoPro.

Deshalb sollen im nächsten Schritt erste Messfahrten mit dem Messsystem erfolgen.

## 7 Fahrzeugspezifische Einflussfaktoren

Um das neue Messsystem zu optimieren und vielfältig einsetzen zu können, müssen fahrzeugspezifische Einflussfaktoren zuerst definiert und dann im Idealfall eliminiert werden.

Wenn fahrzeugspezifische Einflüsse in Zukunft ausgeschlossen oder minimiert werden könnten, würde dies einerseits während der Forschung die Zusammenarbeit mit dem Royal Melbourne Institute of Technology University (RMIT University) erleichtern. Andererseits wäre es in ferner Zukunft vorteilhaft, da davon auszugehen ist, dass der Fahrzeugpool einer Kommune auch aus verschiedenen Fahrzeugmodellen besteht.

Bisher konnten die Datensätze der Testfahrten in Australien nur begrenzt mit denjenigen von der TH Nürnberg verglichen werden. Die Ursache dafür ist neben den unterschiedlichen Positionen und Fixierungen der Messgeräte vor allem der Gebrauch von verschiedenen Messfahrzeugen. Bevor der Messaufbau in Zukunft fahrzeugunabhängig gestaltet werden kann, müssen in diesem Kapitel alle fahrzeugspezifischen Einflussfaktoren betrachtet werden.

In den bisherigen Messungen konnten bereits einige fahrzeugspezifischen Einflussfaktoren beobachtet werden:

- In Kapitel 5 konnte festgestellt werden, dass bei den Messungen mit der GoPro die Hinterräder in dem Verlauf der Beschleunigungsdaten weniger Auswirkung zeigten als die Vorderräder.
- Bei Messungen mit dem VW Bus bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h überlagerten sich die Messwerte nach dem Schaden konstruktiv und bildeten ein Extremum (siehe Kapitel 5.4).
- Die Messungen mit dem Fahrrad lieferten, wegen des Fehlens von Federn und Stoßdämpfern, ein unverfälschteres Erschütterungsprofil [19].
- Einfluss der Längsbeschleunigung auf die vertikale Beschleunigung.

Um diese fahrzeugspezifischen Phänomene erklären und definieren zu können, wird erst die Fahrzeugdynamik erläutert, welche anschließend in einem Simulationsmodell abgebildet wird. Es werden Simulationen durchgeführt und ein Messaufbau für das neue Messsystem aus Kapitel 6 entwickelt.



### 7.1 Fahrzeugdynamik

Wie bereits bekannt verläuft die z-Achse vertikal durch das Fahrzeug. Die y-Achse befindet sich in Längsrichtung und die x-Achse in Querrichtung. Zusätzlich zu den Bewegungen in Achsenrichtungen gibt es noch die Drehbewegung um die jeweiligen Achsen. Diese werden gieren, wanken und nicken genannt [43, S. 6]. Diese

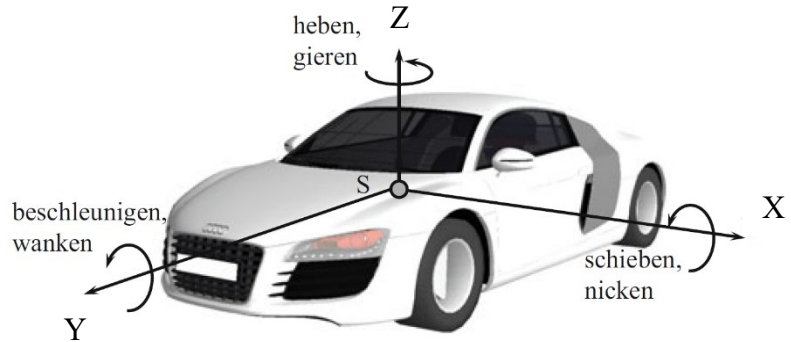


Abbildung 42: Achsen und Rotationen eines Fahrzeugs [43]

Bewegungen werden von dem Gyroskop aufgezeichnet und wurden bisher noch nicht beachtet. Allerdings konnte die Rotation um die x-Achse in den Messungen bereits wahrgenommen werden. Bei den Messungen mit der GoPro konnte festgestellt werden, dass die Längsbeschleunigung des Fahrzeugs auch in den Messwerten der vertikalen Beschleunigung wahrgenommen werden kann. Durch die positive oder negative Beschleunigung kommt es zu einer dynamischen Achslastverteilung und das Fahrzeug führt eine Nickbewegung durch.

Um diese Nickbewegung zusammen mit der Hubbewegung aus der vertikalen Beschleunigung in einem Modell darstellen zu können, wäre ein Zweidimensionales Hub-Nickmodell nach Willumeit mit drei Massen und vier Freiheitsgraden notwendig [44]:

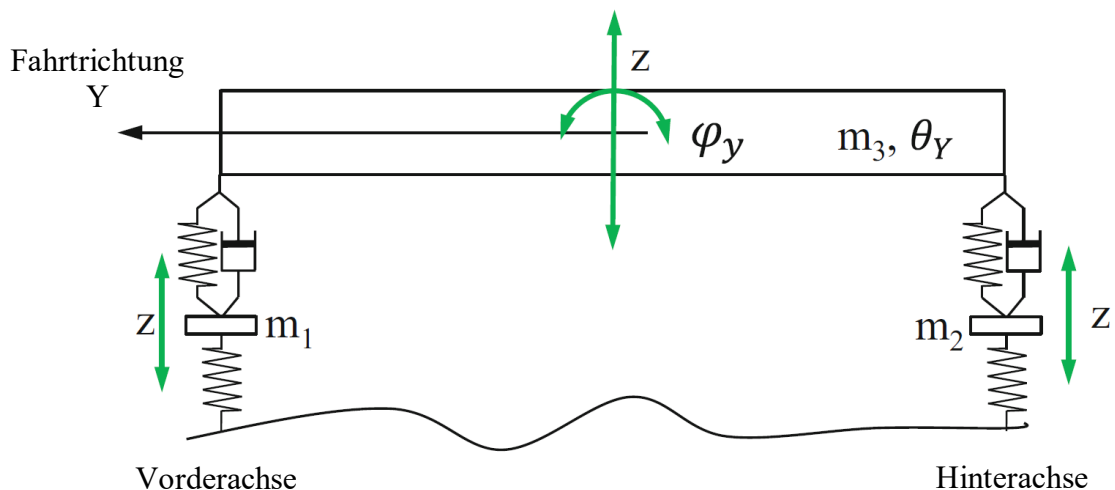


Abbildung 43: Zweidimensionales Hub- und Nickmodell [43]

In einem Modell werden die Massen einzelner Fahrzeugkomponenten zusammengefasst. Masse  $m_1$  sind die Massen von Achse, Felgen und Reifen an der Vorderachse. Analog dazu Masse  $m_2$  an der Hinterachse. Die Masse  $m_3$  ist die Aufbaumasse.

Die einfachste Art und Weise, wie die Dynamik eines Fahrzeugs dargestellt werden kann, ist ein eindimensionales Modell eines Viertel-Fahrzeugs. Dieses Modell besitzt nur zwei Freiheitsgrade und kann nur die vertikale Bewegung eines Fahrzeugs darstellen. Für dieses Modell wird ein viertel eines symmetrischen Fahrzeugs betrachtet (siehe Abbildung 44). Es wird die Federung  $c_A$  und Dämpfung  $d$  des Aufbaus, sowie die Federung des Reifens  $c_R$  als auch die Dämpfung des Reifens  $d_R$  beachtet.

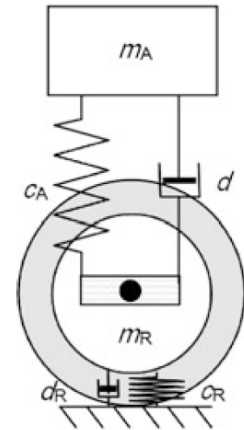


Abbildung 44: Viertel-Fahrzeug-Modell [43]

### 7.2 Simulation durch ein Matlab-/ Simulinkmodell

Der Fahrzeugaufbau wurde in einem Masterprojekt der Fakultät Maschinenbau an der TH Nürnberg [45] durch ein Matlab-/ Simulinkmodell simuliert. Das Modell stellt den Fahrzeugaufbau an Hand eines Viertelfahrzeugs dar. Die fahrzeugspezifischen Eigenschaften wurden als Variablen in das Modell integriert und können auf jedes Messfahrzeug individuell angepasst werden. Das Blockdiagramm in Abbildung 45 gibt einen groben Überblick über die Komplexität der Simulation.

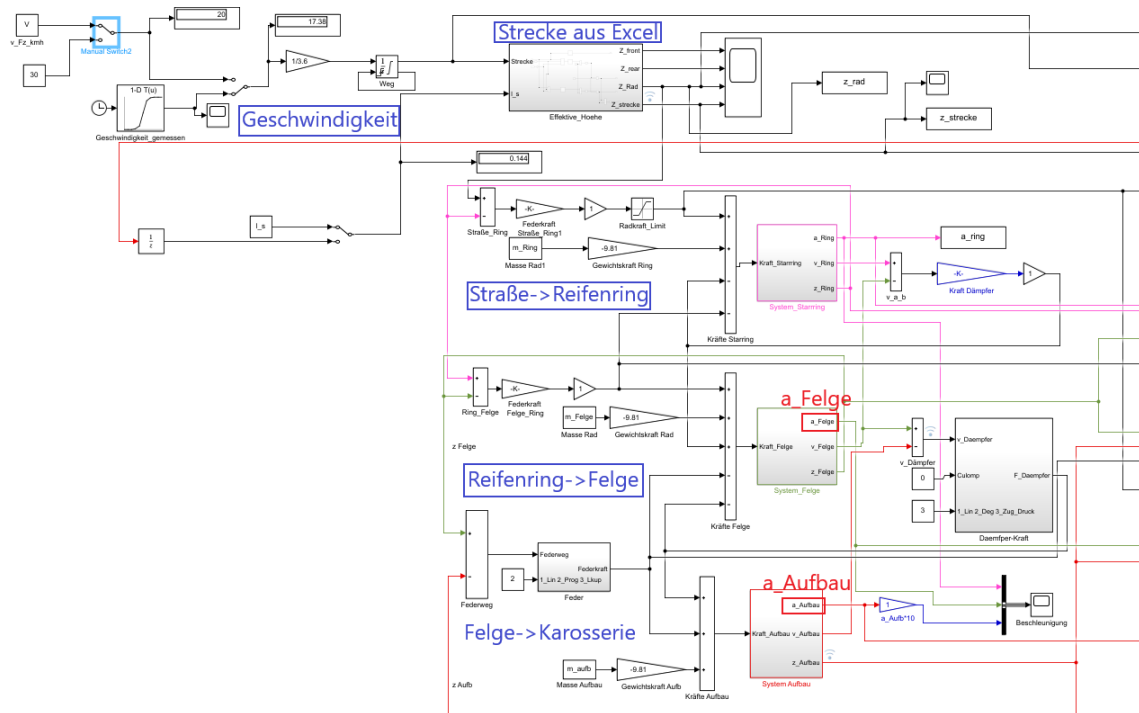


Abbildung 45: Blockdiagramm von der Beschleunigungssimulation

Dem Modell kann neben einer konstanten Geschwindigkeit auch ein Geschwindigkeitsverlauf hinzugefügt werden. Anschließend wird ein zweidimensionaler Höhenverlauf in Längsrichtung der Straße eingeladen. Das Höhenprofil der Straße in Querrichtung kann aktuell noch nicht berücksichtigt werden. Nachdem die fahrzeugspezifischen Einflussfaktoren auf das Messfahrzeug angepasst wurden, konnten verschiedene Versuchsaufbauten simuliert werden.

Parallel dazu wurden in der Praxis Messungen mit einem PKW an den gleichen Versuchsaufbauten durchgeführt. Das Messfahrzeug der Fakultät Maschinenbau ist ein Opel Astra J, welcher mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet ist. Außerdem ist in dem Opel ein adaptives Fahrwerk verbaut. Damit kann die Härte der Federung eingestellt werden. Dementsprechend lassen sich dadurch Änderungen an den sonst fahrzeugspezifischen Eigenschaften vornehmen.

### 7.3 Messergebnisse Simulation vs. Praxis

Um die Ergebnisse der Simulation mit Messergebnissen aus der Praxis zu vergleichen, wurden Messungen an zwei verschiedenen Versuchsaufbauten durchgeführt. Bei den Versuchen wird ein definiertes Hindernis überfahren. Für den Versuchsaufbau 1 wird eine Rampe (siehe Abbildung 46) überfahren. Für den Versuchsaufbau 2 werden zwei dieser Rampen hintereinander überfahren. Da diese Hindernisse in dem zweidimensionalen Raum komplett abgebildet werden können, ist es unerheblich, dass das Modell bisher nur für den zweidimensionalen Verlauf der Straßenoberfläche gilt.



Abbildung 46: Definiertes Hindernis "Rampe"

An dem Messfahrzeug befinden sich Beschleunigungssensoren im Fahrzeuginneren und am Radträger. In dem folgenden beiden Diagrammen wird der Verlauf der **Karosseriebeschleunigung** aus der Simulation (schwarz) und die Messwerte aus der Praxis (rot) gegenübergestellt.

Das Diagramm zeigt den Verlauf bei Versuchsaufbau 1 „Rampe“:

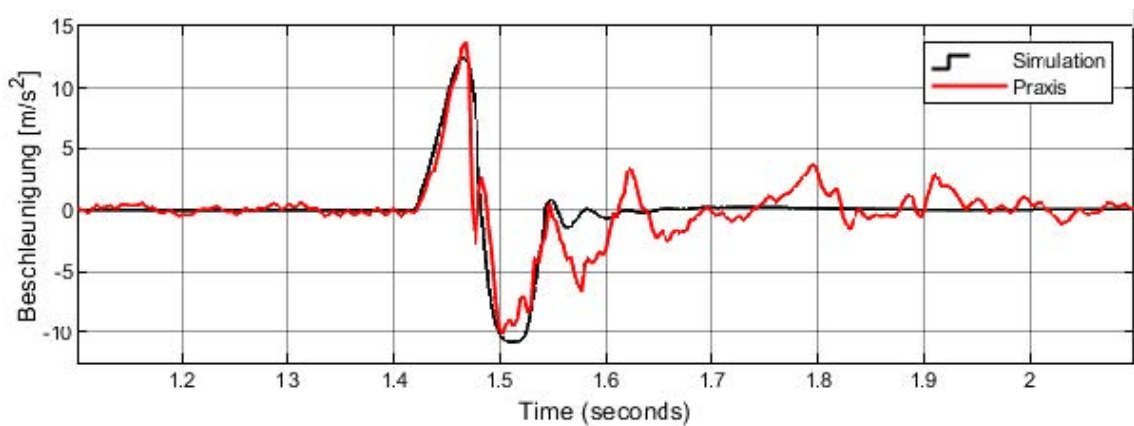


Abbildung 47: Rampe - Karosseriebeschleunigung bei 30 km/h [45]

Das zweite Diagramm zeigt den Versuchsaufbau 2 „Doppelrampe“:

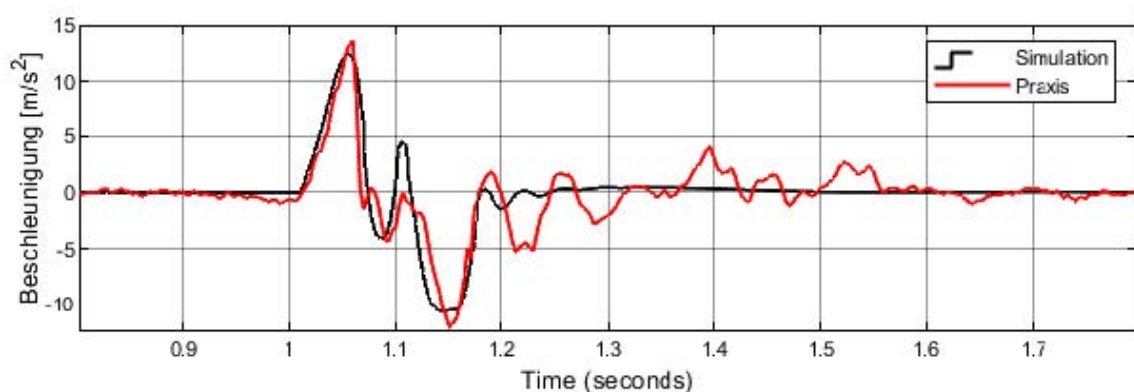


Abbildung 48: Doppelrampe - Karosseriebeschleunigung bei 30 km/h [45]

In beiden Diagrammen ist zu erkennen, dass die Anregung durch das Hindernis mit der Simulation dargestellt werden kann. Allerdings schwingt der Aufbau in der Praxis nach. In der Simulation klingt der Ausschlag der Beschleunigung schnell wieder ab. Dies kann daran liegen, dass die Simulation nur das Verhalten eines Viertelfahrzeuges simuliert. In der Praxis nimmt das restliche Fahrzeug die Bewegung auf und erzeugt das Nachschwingen. Da dieses Nachschwingen der Karosserie durch die Federung des Aufbaus begünstigt wird, wird im Folgenden die Beschleunigung am Radträger betrachtet.

In dem folgenden beiden Diagramm wird der Verlauf der **Beschleunigung am Radträger** aus der Simulation (schwarz) und die Messwerte aus der Praxis (rot) gegenübergestellt. Das Diagramm zeigt den Verlauf bei Versuchsaufbau 1 „Rampe“:

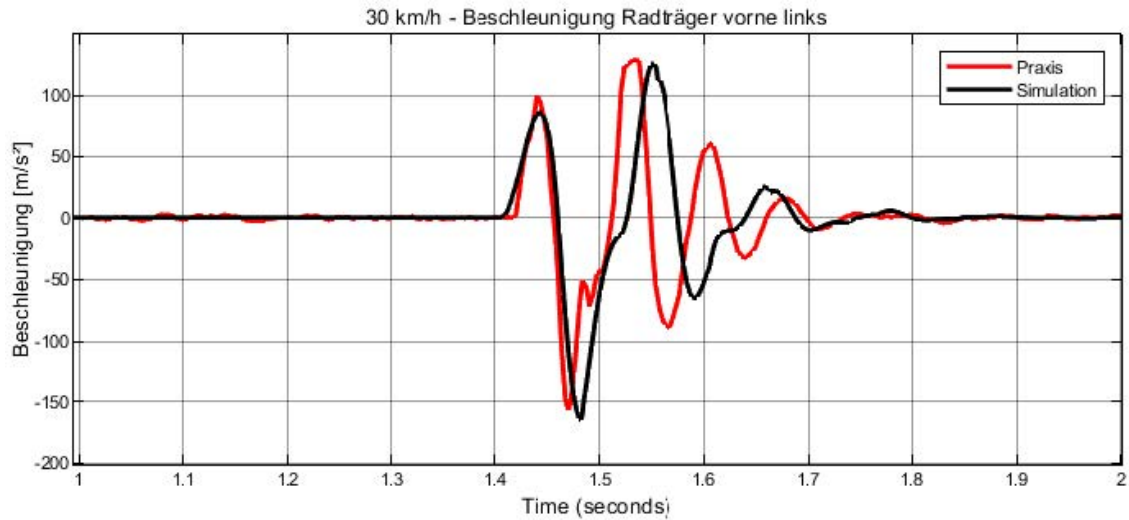


Abbildung 49: Rampe - Beschleunigung am Radträger bei 30 km/h [45]

Das zweite Diagramm zeigt den Versuchsaufbau 2 „Doppelrampe“:

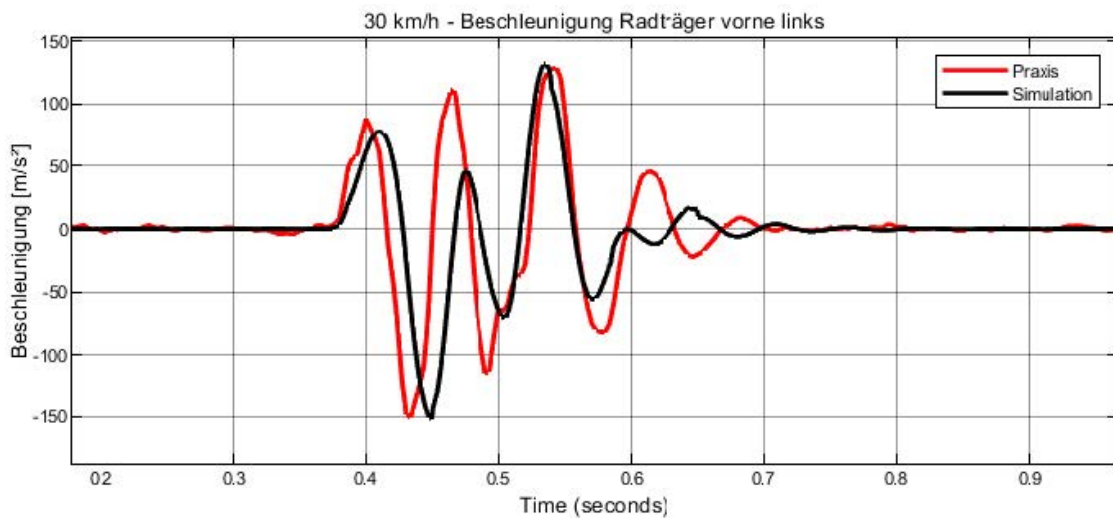


Abbildung 50: Doppelrampe - Beschleunigung am Radträger bei 30 km/h [45]

Sowohl in Abbildung 49 als auch in Abbildung 50 kann die Simulation den gemessenen Verlauf der Beschleunigung am Radträger abbilden. Die Amplitude der Beschleunigung läuft in der Simulation und in der Praxis ähnlich lange aus.

#### 7.4 Schnelle Fourier-Transformation

Die Schnelle Fourier-Transformation wird auch Fast Fourier Transformation genannt und deshalb mit FFT abgekürzt. Es ist eine Möglichkeit, um Signale zu analysieren. Dazu werden die Signale aus dem zeitlichen Verlauf herausgenommen und in die auftretenden Frequenzen aufgeteilt. Dadurch können die einzelnen Frequenzen ermittelt werden [46].

Die Frequenzen, welche in einem bestimmten Zeitabschnitt auftreten, können wie in Abbildung 51 als Diagramm abgebildet werden. Um die Frequenzen trotzdem in Abhängigkeit von der Zeit darstellen zu können, können diese auch in einem Spektrogramm wiedergegeben werden. Dies hat den

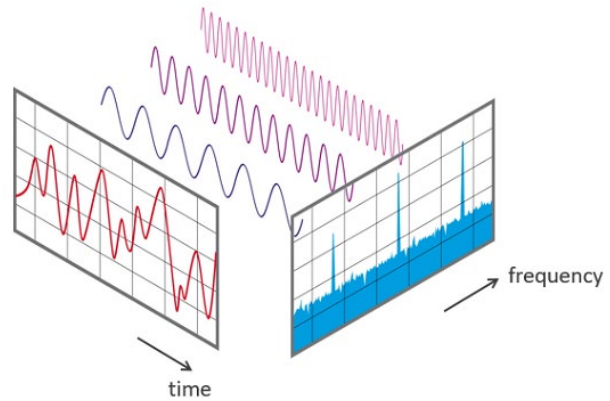


Abbildung 51: Fast Fourier Transformation [46]

Vorteil, dass bei einer Geschwindigkeitsänderung über die Zeit auch die Frequenzen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten dargestellt werden können.

Im Rahmen des Masterprojekts der Fakultät Maschinenbau war es möglich, durch mehrere Testfahrten und anschließende FFTs die Eigenfrequenz des Radträgers und die Eigenfrequenz der Karosserie zu bestimmen. Dies ist in dem Spektrogramm (siehe Abbildung 52) der Karosseriebeschleunigungen bei der Überfahrt von Kopfsteinpflaster ersichtlich:

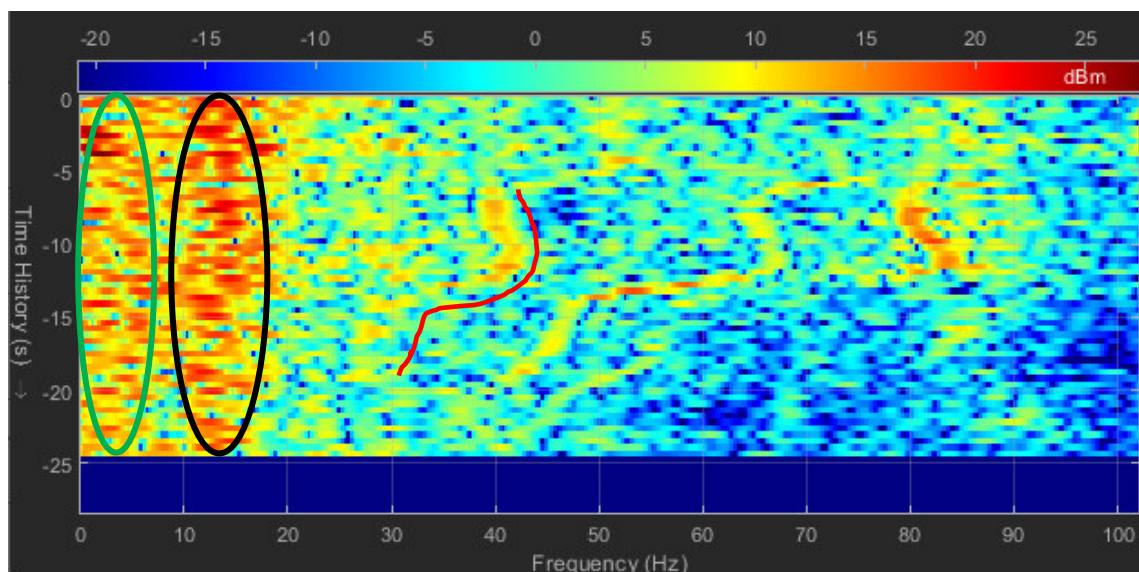


Abbildung 52: Spektrogramm der Karosseriebeschleunigungen [45]

Die Eigenfrequenz der Karosserie beträgt 2,5 Hz (grün) und die Eigenfrequenz des Radträgers beträgt 13 Hz (schwarz). Die Eigenfrequenzen bleiben konstant, während sich die Geschwindigkeit über die Zeit (y-Achse) erhöht. Durch die rote Linie wird die erste Eigenfrequenz des Kopfsteinpflasters markiert. Rechts daneben befindet sich die zweite Anregungsfrequenz des Kopfsteinpflasters und des Motors.

Bei einem Spektrogramm der Beschleunigungen gemessen am Radträger tritt die Eigenfrequenz der Karosserie nicht auf. Es tritt nur die Eigenfrequenz des Radträgers mit 13 Hz auf (schwarz) (siehe Abbildung 53):

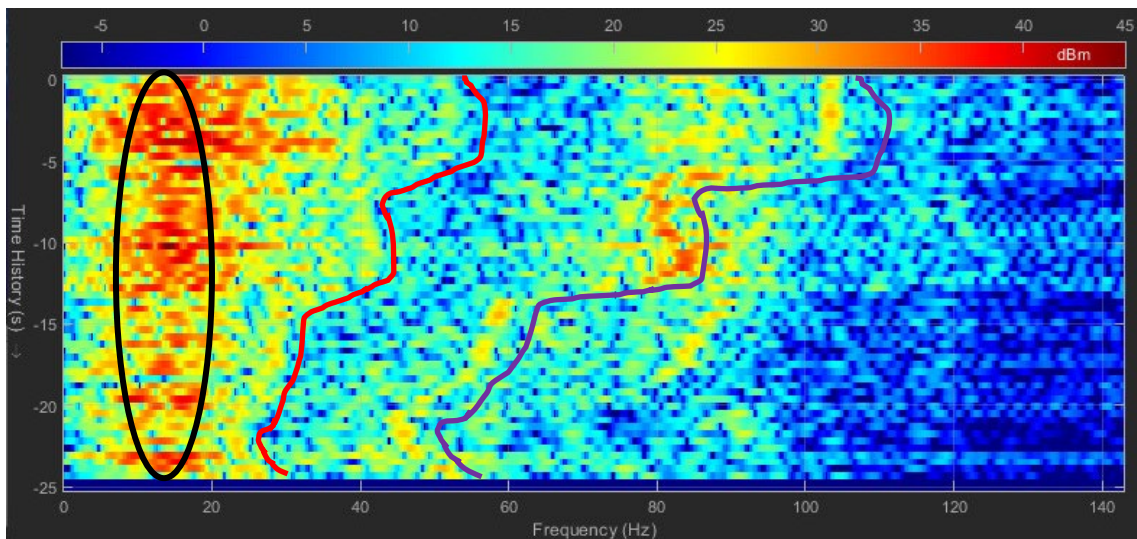


Abbildung 53: Spektrogramm der Beschleunigungen am Radträger [45]

Die Geschwindigkeit wurde während der Messung von 16 km/h auf 36 km/h erhöht. Die Eigenfrequenz des Radträgers ist wieder über die Geschwindigkeit konstant. Links neben der roten Linie ist die erste Eigenfrequenz des Kopfsteinpflasters über die Geschwindigkeiten hinweg sichtbar. Die lila Linie markiert die zweite Anregungsfrequenz des Kopfsteinpflasters. Bei den Messungen am Radträger fallen die Eigenfrequenzen von Karosserie und Motor weg. Je weniger Eigenfrequenzen eine Auswirkung auf die Messung haben, desto weniger Eigenfrequenzen können sich Überlagern. Dadurch sind die Frequenzen deutlicher, welche durch das Längsprofil der Straße ausgelöst werden.

Es konnte herausgefunden werden, dass die erste Eigenfrequenz in der Messung deutlicher ist, wenn mit dem adaptiven Fahrwerk eine möglichst harte Dämpfungseinstellung gewählt wurde. Beide Messungen (Abbildung 52 und Abbildung 53) wurden mit der harten Einstellung durchgeführt.

### 7.5 Messaufbau - Radträger mit dem Pi gesteuerten Messsystem

Sobald das im Projekt entstandene Messsystem, welches zwei Beschleunigungssensoren und ein GNSS-Modul über den Raspberry Pi steuern kann (siehe Kapitel 6), fertiggestellt ist, sollen verschiedene Messungen durchgeführt werden. Dabei soll ein Sensor folgendermaßen am Radträger befestigt werden (siehe Abbildung 54):



Abbildung 54: Externer Sensor am Radträger



Abbildung 55: Externer Sensor im Einstieg

Der zweite Beschleunigungssensor soll sich zum Vergleich dazu im Fahrzeuginnenraum befinden (siehe Abbildung 55). Dabei gilt zu beachten, dass die Sensoren am besten direkt übereinander verbaut werden sollten. Dadurch werden die Ergebnisse nicht durch die xy-Lage im Auto unterschiedlich beeinflusst. Verschiedene Ergebnisse bei den Messungen können demnach nur auf die Höhendifferenz der Sensoren und vor allem auf die beteiligten Fahrzeugkomponenten zurückgeführt werden.

Bei dieser Messung kommt die GoPro aus den folgenden Gründen an ihre Grenzen und kann deshalb für den Messaufbau nicht verwendet werden:

- Der Vorteil der GoPro besteht darin, dass diese alle Daten aufnehmen und mit derselben Zeit versehen kann. Bei Anbringung der GoPro an dem Radträger kann diese nicht mehr gleichzeitig zur visuellen Aufnahme verwendet werden.
- Für den Vergleich müssen die Beschleunigungsdaten an zwei verschiedenen Orten gleichzeitig erfasst werden.
- Da am Radträger stärkere Beschleunigungen auftreten als im Fahrzeuginnenraum muss es möglich sein, bei beiden Sensoren einen unterschiedlichen Messbereich einstellen zu können.

Da die neuen Messungen ohne Federung andere Beschleunigungswerte liefern werden, müssen neue Warn- und Schwellenwerte für die Straßenzustandsbewertung ermittelt werden. Dazu kann im Anschluss an die Messungen der bisherige Schwellenwert von  $2 \text{ m/s}^2$  bei Messungen im Fahrzeuginnenraum auf einen Schwellenwert für Messungen am Radträger übertragen werden.



## 8 Eignung der Beschleunigungssensorik

Bevor ein neues Messsystem mit einer alternativen Methode, beispielsweise das Messsystem mit dem Raspberry Pi, in der Straßenzustandserfassung verwendet werden kann, muss dessen Eignung geprüft werden.

Die praktische Eignung beinhaltet die Wirtschaftlichkeit der Straßenzustandserfassung mittels Beschleunigungssensorik und wird anschließend durch eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile erörtert.

Die wissenschaftliche Eignung ist an Hand der drei Hauptkriterien für die wissenschaftliche Eignung von Messinstrumenten nach DIN ISO 5725-1 zu prüfen [47]. Diese sind Validität, Reliabilität und Objektivität.

### 8.1 Praktische Eignung und Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit wurde bereits in der Bachelorarbeit von Herrn Rauh betrachtet und stellte sich abschließend als positiv heraus [48]. Weitere Vor- und Nachteile der beschleunigungs-basierten Straßenzustandserfassung werden in der folgenden Tabelle aufgelistet [15, 19]:

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der beschleunigungs-basierten Zustandserfassung

Vorteil	Nachteil
Reduzierung der Kosten durch den Einsatz von vorhandenen Fahrzeugen aus dem Fahrzeugpool der Kommune.	Einfluss der Geschwindigkeit / Beschleunigung in Längsrichtung auf die vertikalen Beschleunigungsdaten. → Abhängigkeit vom Fahrstil
Die Messungen können auch von ungeschultem Personal durchgeführt werden.	Einfluss der fahrzeugspezifischen Eigenschaften
Es müssen keine Fahrten extra durchgeführt werden. Die Messungen können bei ohnehin stattfindenden Fahrten aufgenommen werden.	Die individuelle Wahl der Fahrspur kann bei mehreren Messfahrten unterscheiden Ergebnissen führen. Dies muss durch den genauen Standort aufgezeichnet werden können.
Die Beschleunigungsdaten benötigen wenig Speicherplatz.	
Die Daten könnten in Zukunft automatisch verarbeitet werden.	
Die Erfassung könnte öfter als die messtechnische Erfassung stattfinden.	

Um die Praktische Eignung der beschleunigungsbasierten Straßenzustandserfassung zu verbessern, müssen die Nachteile eliminiert werden. Weitere Untersuchungen dazu sind notwendig und wurden in den jeweiligen Kapiteln bereits thematisiert.

### 8.2 Wissenschaftliche Eignung – Validität

Um die Validität des alternativen Messsystems zu ermitteln, werden die Messergebnisse mit den Zustandsdaten der Stadt Nürnberg aus dem Jahr 2019 verglichen. Da die Beschleunigungssensorik nur bestimmte Schadensmerkmale erfassen kann (siehe Kapitel 3.2), muss festgestellt werden, ob sich die Ergebnisse trotzdem mit den Zustandsdaten der Stadt Nürnberg decken.

Der Gesamtwert einer ZEB setzt sich folgendermaßen zusammen [3, S. 16]:[3]

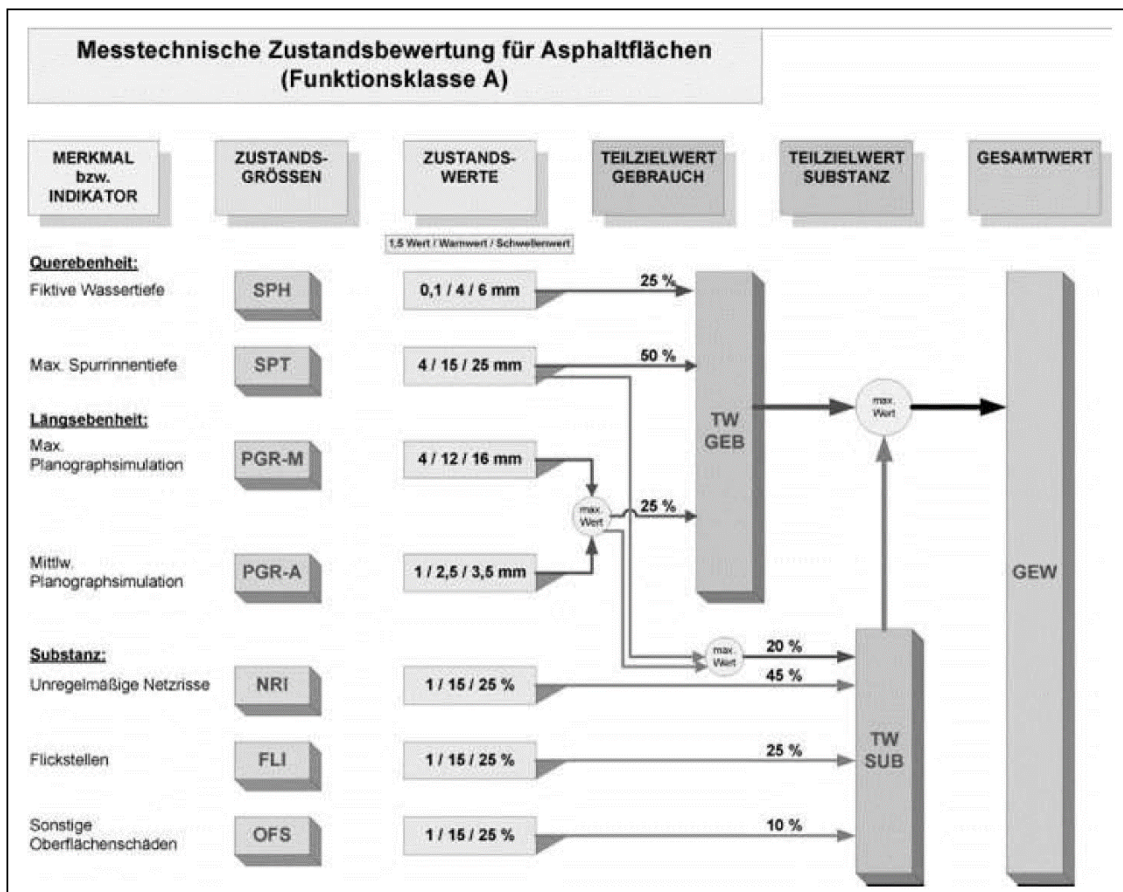


Abbildung 56: Wertesynthese bei der messtechnischen Zustandsbewertung [3]

Bei der ZEB werden die gemessenen Zustandswerte unterschiedlich gewichtet und bilden den Teilzielwert Gebrauch und den Teilzielwert Substanz. Der maximale Teilzielwert

bildet den Gesamtwert. Der Gesamtwert kann durch folgende Tabelle in eine Zustandsklasse umgerechnet und farblich in einer Karte dargestellt werden [3, S. 16]:

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Gesamtwert und Zustandsklasse

Gesamtwert $x$	Zustandsklasse	Farbdarstellung
$1,0 \leq x < 1,5$	1	Blau
$1,5 \leq x < 2,5$	2	Dunkelgrün
$2,5 \leq x < 3,5$		Hellgrün
$3,5 \leq x < 4,5$	3	Gelb
$x \geq 4,5$	4	Rot

Es kann sein, dass die Schadensmerkmale in den Beschleunigungsdaten identifiziert werden können und davon ein Zustandswert abgeleitet werden kann. In diesem Fall kann ein Vergleich auf Ebene der Zustandswerte stattfinden. Anderen Falls muss aus den Beschleunigungsdaten abschnittsweise ein Wert gebildet werden, welcher den Zustand des Abschnitts angibt. Dieser müsste dann mit den Teilzielwerten Gebrauch und Substanz oder dem Gesamtwert bzw. der Zustandsklasse aus der ZEB der Stadt Nürnberg verglichen werden. Wenn dies der Fall ist kann mit der Beschleunigungssensorik nur eine Aussage über den Gesamtzustand der Straße nicht aber über einzelne Zustandsmerkmale getroffen werden.

### 8.3 Wissenschaftliche Eignung – Reliabilität

Die Reliabilität lässt eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu. Dazu wird die Standardabweichung der Wiederholungsmessung bestimmt. Die Messungen erfolgen unter den gleichen Bedingungen, also auf der gleichen Strecke, mit dem gleichen Fahrer, dem gleichen Auswerter und werden mit dem gleichen Messsystem aufgezeichnet. Um sicher stellen zu können, dass die gleiche Strecke abgefahren wurde, muss entweder die Strecke markiert sein oder die Standortaufzeichnung ausreichend genau sein, um abweichende Messungen verwerfen zu können. Sobald das Messsystem einen gewissen Entwicklungsstand erreicht hat, können Messungen zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse durchgeführt werden.

#### **8.4 Wissenschaftliche Eignung – Objektivität**

Die Objektivität eines Messsystems wird durch die Standardabweichung der Vergleichsmessungen bewertet. Das Messsystem muss unabhängig vom Fahrer und Auswerter und auch unabhängig von der Einzelausführung des Messsystems sein. Um dies zu prüfen, müssen die Messfahrten von verschiedenen Personen und mit verschiedenen baugleichen Messsystemen durchgeführt werden. Da vorerst keine baugleichen Messsysteme zur Verfügung stehen werden, wird die Objektivität des Messsystems vorerst nicht untersucht werden. Die Bewertung der Objektivität wird erst in einer deutlich späteren Entwicklungsphase erfolgen.

Hinzukommt, dass die Messergebnisse aktuell noch von der Fahrweise des Fahrers abhängig sind. Um die Objektivität sinnvoll prüfen zu können, muss der Einfluss der Geschwindigkeit bzw. der Längsbeschleunigung auf die Messwerte eliminiert werden.

## 9 Fazit und Ausblick

Zum aktuellen Stand der Entwicklung kann noch keine Aussage darüber getroffen werden, ob mit der Beschleunigungssensorik eine alternative Methode zur Straßenzustandserfassung entwickelt werden kann. In der Arbeit wurde ein Überblick über die Herangehensweise an dieses Projekt gegeben und es konnte der aktuelle Kenntnisstand dargelegt werden. Gleichzeitig wurde weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

Im weiteren Verlauf sollten die Messungen am Radträger mit dem neuen Messsystem durchgeführt und ausgewertet werden. Bei der Auswertung sollte neben der Identifizierung der Schadensmerkmale auch ein Hauptaugenmerk auf den Einfluss der Längsbeschleunigung gelegt werden. An Hand der gleichen Messdaten kann die Genauigkeit des GNSS-Moduls untersucht werden. Mit den Messergebnissen aus diesem Versuchsaufbau kann außerdem die Validität untersucht werden.

Wenn die bisher aufgezählten Versuche positiv verlaufen sind, sollte eine Möglichkeit gefunden werden wie der Einfluss der Längsbeschleunigung eliminiert werden kann. Nur so kann das Messsystem die wissenschaftliche Anforderung der Objektivität erfüllen.

Sobald ein standardisierter Prozess für die Auswertung gefunden werden konnte, muss die automatisierte Verarbeitung und Auswertung der Daten in Angriff genommen werden.

Neben den bisher aufgezählten Entwicklungsschritten gibt es zwei weitere Aspekte, welche untersucht werden sollten: Dadurch, dass mit dem Messsystem des Pis zwei Sensoren gleichzeitig die Beschleunigungen aufzeichnen können. Sollte eine Messung stattfinden, welche die Beschleunigungen auf der linken und rechten Seite des PKWs aufzeichnet. Dadurch kann bei einer Überfahrt eine größere Straßenfläche erfasst werden. Außerdem gilt es zu untersuchen, ob durch die gleichzeitige Messung links und rechts weitere Schadensmerkmale, wie beispielsweise die Querunebenheit, in den Beschleunigungsdaten identifiziert werden können.

**Literaturverzeichnis**

- [1] Referat für Finanzen, Personal, IT und Organisation, *Was kostet Nürnberg?: Daten | Fakten*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.nuernberg.de/imperia/md/stadtfinanzen/dokumente/was\\_kostet\\_nuernberg\\_2\\_auflage.pdf](https://www.nuernberg.de/imperia/md/stadtfinanzen/dokumente/was_kostet_nuernberg_2_auflage.pdf) (Zugriff am: 18. Dezember 2021).
- [2] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hg., „Verkehr in Zahlen 2020/2021“, Flensburg, 2020.
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hg., „Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (E EMI 2012)“, Köln, 2012.
- [4] V. Astarita *et al.*, „A Mobile Application for Road Surface Quality Control: UNIquALroad“, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Jg. 54, S. 1135–1144, 2012, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.828.
- [5] H. Czichos, *Mechatronik: Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme*, 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [6] Code Mercenaries, *Datenblatt JW24F14: 3D acceleration sensor*.
- [7] Generation Robots - Blog, *IMU und Robotertechnik: Was Sie wissen sollten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.generationrobots.com/blog/de/imu-und-robotertechnik-was-sie-wissen-sollten-2/> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [8] Codemercs Webshop, *JoyWarrior56FR1-WP*. [Online]. Verfügbar unter: <https://shop.codemercs.com/de/joywarrior56fr1-wp.html> (Zugriff am: 20. Dezember 2021).
- [9] Code Mercenaries, *Datenblatt JW56FR1: 6D acceleration + turn rate sensor*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.codemercs.com/downloads/joywarrior/JW56FR1\\_Datasheet.pdf](https://www.codemercs.com/downloads/joywarrior/JW56FR1_Datasheet.pdf) (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [10] V. Douangphachanh und H. Oneyama, „A study on the use of smartphones under realistic settings to estimate road roughness condition“, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014.
- [11] Robert Bosch GmbH, *Automotive MEMS-Sensoren*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/elektronische-bauelemente/mems-sensoren/> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [12] GoPro GmbH, *GoPro HERO9 Black*. [Online]. Verfügbar unter: <https://gopro.com/de/ch/shop/cameras/hero9-black/CHDHX-901-master.html> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).

- [13] Telemetry Overlay S.L., *Telemetry Extractor for GoPro (Lite)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://goprotelemetryextractor.com/free/> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [14] GoPro GmbH, *GoPro Open Sources Video Metadata*. [Online]. Verfügbar unter: <https://gopro.com/de/de/news/gopro-video-metadata-open-source-explained> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [15] J. Steinbrecher, „Optimierung des Messaufbaus für die Straßenzustandserfassung mittels Beschleunigungssensorik“. Bachelorarbeit, Nürnberg, 22. Dez. 2020.
- [16] GoPro GmbH, *Bedienungsanleitung GoPro Hero9 black*. [Online]. Verfügbar unter: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/de/002355482ML00/bedienungsanleitung-2355482-gopro-hero-9-black-action-cam-5k-30-bps-action-cam-5k-gps-wasserfest-stossfest-stereo-sound-touch-screen-wlan.pdf> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [17] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, *Global Navigation Satellite Systems (GNSS)*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bkg.bund.de/DE/Observatorium-Wetzell/Messverfahren/Global-Navigation-System/global-navigation-system\\_cont.html](https://www.bkg.bund.de/DE/Observatorium-Wetzell/Messverfahren/Global-Navigation-System/global-navigation-system_cont.html) (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [18] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hg., „Arbeitspapier Nr. 9 Reihe K: Kommunale Straßen, Abschnitt K 2: Zustandserfassung, Unterabschnitt K 2.1: Vorbereitung und Durchführung der messtechnischen Zustandserfassung für innerörtliche Verkehrsflächen“, Köln, 2016.
- [19] M. Knüpfer, „Bildreferenzierung bei der Straßenzustandserfassung mittels Erschütterungssensorik“. Bachelorarbeit, Nürnberg, 16. Dez. 2019.
- [20] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hg., „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen“, Köln, 2018.
- [21] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hg., „Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, Teil: Berührungslose Messungen (TP Eben - Berührungslose Messungen)“, 2009.
- [22] V. Douangphachanh und H. Oneyama, „Using Smartphones to Estimate Road Pavement Condition“ in *International Symposium for Next Generation Infrastructure*, 1-4 October 2013, doi: 10.14453/isngi2013.proc.16.
- [23] M. Perttunen *et al.*, „Distributed Road Surface Condition Monitoring Using Mobile Phones“ in *Lecture Notes in Computer Science*, Bd. 6905, *Ubiquitous Intelligence*

- and Computing*, C.-H. Hsu, L. T. Yang, J. Ma und C. Zhu, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 64–78, doi: 10.1007/978-3-642-23641-9\_8.
- [24] F. Seraj, K. Zhang, O. Turkes, N. Meratnia und P. J. M. Havinga, „A smartphone based method to enhance road pavement anomaly detection by analyzing the driver behavior“ in *the 2015 ACM International Joint Conference*, Osaka, Japan, 2015, S. 1169–1177, doi: 10.1145/2800835.2800981.
- [25] A. Shtayat, S. Moridpour, B. Best, A. Shroff und D. Raol, „Dynamic Monitoring of Asphalt Pavement Using Mobile Application“, *26th World Road Congress World Road Association (PIARC)*, 2019.
- [26] N. Silva, J. Soares, V. Shah, M. Y. Santos und H. Rodrigues, „Anomaly Detection in Roads with a Data Mining Approach“, *Procedia Computer Science*, Jg. 121, S. 415–422, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.11.056.
- [27] A. Shtayat, S. Moridpour und B. Best, „Using e-bikes and private cars in dynamic road pavement monitoring“, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2021, doi: 10.1016/j.ijtst.2021.03.004.
- [28] H. Angerer, „Eignung der GoPro als alternatives Messsystem zur Straßenzustandserfassung“. Ingenieurwissenschaftliche Studie, Nürnberg, 8. Dez. 2021.
- [29] Coordinates-converter.com, *Erklärung zu geographischen Koordinaten, Umwandlung und Berechnung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.koordinaten-umrechner.de/info> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [30] Microsoft Corporation, *Darstellen von Daten im Punkt- oder Liniendiagramm*. [Online]. Verfügbar unter: <https://support.microsoft.com/de-de/topic/darstellen-von-daten-im-punkt-oder-liniendiagramm-4570a80f-599a-4d6b-a155-104a9018b86e> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [31] C. Raab, „Ermittlung von Warn- und Schwellenwerten für die Straßenzustandsbewertung mittels Erschütterungssensorik“. Bachelorarbeit, Nürnberg, 6. Juli 2020.
- [32] Volkswagen Nutzfahrzeuge, *Der neue Transporter, Preisliste und Technische Daten, Gültig für das Modelljahr 2016*. [Online]. Verfügbar unter: <http://docplayer.org/20533471-Preisliste-und-technische-daten-guelting-fuer-das-modelljahr-2016-der-neue-transporter-nutzfahrzeuge.html> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [33] Navilock, *Datenblatt Navilock NL-602U-GPS / Galileo Empfänger*. [Online]. Verfügbar unter: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/->



- /de/000378835DS01/datenblatt-378835-navilock-nl-602u-gps-empfaenger-schwarz.pdf (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [34] Raspberry Pi Ltd, *Raspberry Pi Documentation - Raspberry Pi OS*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/os.html> (Zugriff am: 16. Dezember 2021).
- [35] CodeMercs Forum, *JoyWarrior56FR1 Kommunikation unter Raspberry OS mit pyUSB - CodeMercs Forum*. [Online]. Verfügbar unter: <https://forum.codemercs.com/viewtopic.php?t=2123> (Zugriff am: 16. Dezember 2021).
- [36] C. D. Costa, *Top Programming Languages for Data Science in 2020 - Towards Data Science*. [Online]. Verfügbar unter: <https://towardsdatascience.com/top-programming-languages-for-data-science-in-2020-3425d756e2a7> (Zugriff am: 16. Dezember 2021).
- [37] Python Software Foundation, *The Python Standard Library - Python 3.10.1 documentation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.python.org/3/library/> (Zugriff am: 16. Dezember 2021).
- [38] GitHub, *pyusb: Issue #76*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/pyusb/pyusb/issues/76> (Zugriff am: 16. Dezember 2021).
- [39] Software in the Public Interest, *debian - udev - Linux dynamic device management*. [Online]. Verfügbar unter: <https://wiki.debian.org/udev> (Zugriff am: 16. Dezember 2021).
- [40] GitHub, *pyusb Tutorial*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/pyusb/pyusb/blob/master/docs/tutorial.rst#where-are-you> (Zugriff am: 16. Dezember 2021).
- [41] K. Wüst, *Mikroprozessortechnik: Grundlagen, Architekturen, Schaltungstechnik und Betrieb von Mikroprozessoren und Mikrocontrollern ; mit 44 Tabellen*, 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [42] Python Software Foundation, *CSV File Reading and Writing - Python 3.10.1 documentation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.python.org/3/library/csv.html> (Zugriff am: 16. Dezember 2021).
- [43] S. Breuer und A. Rohrbach-Kerl, *Fahrzeugdynamik: Mechanik des bewegten Fahrzeugs*, 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [44] H.-P. Willumeit, *Modelle und Modellierungsverfahren in der Fahrzeugdynamik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1998.

- [45] N. Schmeller und T. Schöne, „Beurteilung der Fahrbahnqualität auf Basis von Fahrzeugmessungen und Adaption eines digitalen Zwillings in Matlab / Simulink“. Masterprojekt in der Fahrzeugtechnik, Nürnberg, 16. Aug. 2021.
- [46] NTi Audio GmbH, *Fast Fourier Transformation FFT - Grundlagen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nti-audio.com/de/service/wissen/fast-fourier-transformation-fft> (Zugriff am: 18. Dezember 2021).
- [47] *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen*, DIN ISO 5725-1:1997-11, 1997.
- [48] L. Rauh, „Wirtschaftliche Beurteilung der Straßenzustandserfassung mittels Beschleunigungssensorik“. Bachelorarbeit, Nürnberg, 15. Dez. 2020.

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Länge des Straßennetzes in Deutschland [2].....	1
Abbildung 2: Aufgabenstellung .....	4
Abbildung 3: JW56FR1 und Anordnung der Achsen des Sensors [8, 9].....	5
Abbildung 4: Aufbau eines Mikromechanik-Beschleunigungssensors [5] .....	7
Abbildung 5: GoPro Hero9 Black [12] .....	8
Abbildung 6: Messaufbau Fahrrad [19] .....	13
Abbildung 7: Messaufbau Fahrzeuginnenraum vorne [19].....	15
Abbildung 8: Messaufbau Lüftungsgitter [15] .....	16
Abbildung 9: Messaufbau Kofferraum [15] .....	17
Abbildung 10: Positionen der Kamera [15].....	18
Abbildung 11: Vergleich der GPS-Daten: Motorhaube (schwarz), Hecktür (blau) [15] 19	
Abbildung 12: Ausschnitt der Beschleunigungsdaten als Rohdaten.....	22
Abbildung 13: Anordnung der Achsen bei der GoPro [12] abgeändert.....	22
Abbildung 14: Ausschnitt der GPS-Daten als Rohdaten.....	23
Abbildung 15: Beschleunigungs- und GPS-Daten in einer Tabelle nach cts sortiert .....	24
Abbildung 16: Tabelle mit Beschleunigungs- und GPS-Werten bei jedem Datensatz...	25
Abbildung 17: Daten in QGIS .....	27
Abbildung 18: Ungenauigkeit der GPS-Daten im Stand.....	27
Abbildung 19: Straßenschaden auf der falschen Fahrspur .....	27
Abbildung 20: Diagramm mit den Beschleunigungsdaten der drei Messreihen .....	29
Abbildung 21: Straßenschaden bei maximalem Ausschlag der Beschleunigung .....	29
Abbildung 22: Beschleunigungen im Bereich des maximalen Ausschlags .....	30
Abbildung 23: Verlauf der Beschleunigungsdaten bei gefahrener Geschwindigkeit .....	31
Abbildung 24: Kreuzungsbereich bei der Messreihe GH010073 .....	32
Abbildung 25: Kreuzungsbereich bei der Messreihe GH010074 .....	33
Abbildung 26: Sensoreinstellungen .....	37
Abbildung 27: Aktivierung des Highspeed Modus.....	38
Abbildung 28: Übertragung der Einstellungen und des Modus an den Sensor .....	38
Abbildung 29: Deaktivierung des Highspeed Modus .....	40
Abbildung 30: Daten abrufen und im RAM zwischenspeichern .....	40
Abbildung 31: Codebeispiel, um Wert mit 16 Bits zu erhalten.....	40
Abbildung 32: Umrechnung eines Messwerts .....	41
Abbildung 33: Variable "Factor" als Umrechnungsfaktor .....	41

Abbildung 34: Umrechnungsformel von 16 Bits in $m/s^2$ .....	41
Abbildung 35: Erstellung der CSV-Datei.....	42
Abbildung 36: Variablen für die Funktion "write_data" .....	42
Abbildung 37: Ausschnitt aus der Funktion, um CSV-Datei zu schreiben.....	43
Abbildung 38: Diagramm der Messwerte (z-Werte) von dem Pi.....	44
Abbildung 39: Diagramm der Messwerte (z-Werte) von dem "MotionPlotter".....	44
Abbildung 40: Code, um zu ermitteln wie viele JW56FR1 angeschlossen sind .....	46
Abbildung 41: Zuordnung zweier identischen Sensoren.....	46
Abbildung 42: Achsen und Rotationen eines Fahrzeugs [43] .....	50
Abbildung 43: Zweidimensionales Hub- und Nickmodell [43] .....	50
Abbildung 44: Viertel-Fahrzeug-Modell [43] .....	51
Abbildung 45: Blockdiagramm von der Beschleunigungssimulation.....	51
Abbildung 46: Definiertes Hindernis "Rampe" .....	52
Abbildung 47: Rampe - Karosseriebeschleunigung bei 30 km/h [45] .....	53
Abbildung 48: Doppelrampe - Karosseriebeschleunigung bei 30 km/h [45].....	53
Abbildung 49: Rampe - Beschleunigung am Radträger bei 30 km/h [45] .....	54
Abbildung 50: Doppelrampe - Beschleunigung am Radträger bei 30 km/h [45].....	54
Abbildung 51: Fast Fourier Transformation [46] .....	55
Abbildung 52: Spektrogramm der Karosseriebeschleunigungen [45] .....	55
Abbildung 53: Spektrogramm der Beschleunigungen am Radträger [45] .....	56
Abbildung 54: Externer Sensor am Radträger .....	57
Abbildung 55: Externer Sensor im Einstieg .....	57
Abbildung 56: Wertesynthese bei der messtechnischen Zustandsbewertung [3].....	59

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Umrechnungsfaktor .....	6
Tabelle 2: Erfassbarkeit der Schadensmerkmale mit der Beschleunigungssensorik .....	9
Tabelle 3: Vor- und Nachteile der beschleunigungsbasierten Zustandserfassung.....	58
Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Gesamtwert und Zustandsklasse .....	60

## Anhang

### Anhang 1: E-Mail Korrespondenz mit der Stadt Nürnberg

Von: Urban.Erjavec@stadt.nuernberg.de  
An: "Helena Angerer" <helena.angerer@th-nuernberg.de>  
CC: Stefanie.Lunz@stadt.nuernberg.de  
Gesendet: Mittwoch, 6. Oktober 2021 12:44:32 GMT +01:00 Amsterdam/Berlin/Bern/Rom/Stockholm/Wien  
Betreff: AW: Zustandsbewertung 2019 - Daten

Hallo Frau Angerer,

können Sie mir bitte die Routen als shp Datei zuschicken? Arcmap öffnet der gpkg Datei leider nicht.

In Anhang finden Sie unsere letzte Ausschreibung. In dem Text ist detailliert beschrieben, was wir von dem Auftragnehmer fordern.

Wir befahren und bewerten nur die Hauptverkehrsstraßen. Der Zustand von Nebenstraßen wird nicht erfasst, deswegen sind diese auch nicht in Befahrungsnetz enthalten. Hier sorgen unseren Straßenbegeher dafür, dass die Verkehrssicherheit geleistet ist.

Mit freundlichen Grüßen

Urban Erjavec

Servicebetrieb Öffentlicher Raum Nürnberg  
Eigenbetrieb der Stadt Nürnberg  
Abteilung Betrieb und Unterhalt  
Sachgebiet Fachkoordination  
SÖR/2-FK/S  
Sulzbacher Str. 2-6  
90489 Nürnberg

### Anhang 2: E-Mail Korrespondenz mit Code Mercenaries

Von: "Support" <support@codemercs.com>  
An: "Helena Angerer" <helena.angerer@th-nuernberg.de>  
Gesendet: Freitag, 8. Oktober 2021 11:24:22 GMT +01:00 Amsterdam/Berlin/Bern/Rom/Stockholm/Wien  
Betreff: Re: JoyWarrior56FR1

Hallo Frau Angerer,

mit fällt auf Anhieb kein anderer Weg als Ihr bisheriger ein die Daten des JW56FR1 und der GoPro zu koppeln

Man könnte einen **Separaten GPS-Empfänger** nutzen um die Daten in der Rohform zu haben. Allerdings weiß ich nicht wie gut die Dokumentiert sind und wie man "einfach" an die Daten heran kommt.

Helena Angerer

Eine Idee wäre alle Daten über einen Raspberry PI zu ermitteln und dort zu verknüpfen. Für den Raspberry PI gibt es GPS-Sensoren inkl.

Anleitungen zur Integration und eine große Community mit vielen Beispielen und Code.

Der JW56FR1 wird auch von Linux/Raspberry PI unterstützt (Einschränkungen gibt es beim High-Speed mode des JW56FR1).

Die Referenzbilder der GoPro könnte man dann da hinzu packen oder direkt einen Webcam nutzen.

Mit freundlichen Grüßen  
Christoph Jung

---

Von: "Codemercs Support" <support@codemercs.com>  
An: "Luca Pillhöfer" <pillhoferlu73303@th-nuernberg.de>  
CC: "Helena Angerer" <helena.angerer@th-nuernberg.de>  
Gesendet: Mittwoch, 13. Oktober 2021 13:00:04 GMT +01:00 Amsterdam/Berlin/Bern/Rom/Stockholm/Wien  
Betreff: Re: Umrechnung Rohdaten JW56FR1

Sehr geehrter Herr Pillhöfer,

nach den Werten für die Ruhelage verwenden Sie offensichtlich die Z-Achse?

Die Nulllage wäre bei 32768. Die Z-Achse „sieht“ natürlich immer 1 g, zumindest bei präziser horizontaler Ausrichtung. Entsprechend haben Sie in der Ruhelage eine Abweichung von 1 g, was bei der Auflösung von 2 g einem Wert von 16384 entspricht.

**Bei einem Messbereich von  $\pm 2$  g bekommen Sie den g-Wert als  $g = (x - 32768) / 16384$**

Die Filter sind natürlich nicht in dieser Berechnung zu berücksichtigen, denn die verändern die zeitliche Auflösung des Signals und dienen zur Reduzierung des Rauschens.

Unterschiedliche Maximalwerte können auftreten, wenn die Beschleunigung höherfrequente Transienten hat, die über der Abtastung des Sensors liegen. Auch hier könnten die Filter helfen, das ist aber abhängig von der tatsächlichen Messaufgabe, da durch einen Tiefpassfilter die maximale Spitze reduziert würde.

Mit freundlichen Grüßen  
Guido Körber

---

Von: "Codemercs Support" <support@codemercs.com>  
An: "Luca Pillhöfer" <pillhoferlu73303@th-nuernberg.de>  
CC: "Helena Angerer" <helena.angerer@th-nuernberg.de>

Gesendet: Montag, 25. Oktober 2021 12:50:29 GMT +01:00 Amsterdam/Berlin/Bern/Rom/Stockholm/Wien  
Betreff: Re: Umrechnung Rohdaten JW56FR1

Sehr geehrter Herr Pillhöfer,

was ist denn so schwer daran zu verstehen?

**Der JW56FR1 liefert einen 16 Bit Wert, die Nulllage ist bei 50%, also 32767 oder 32768.**

**Wie viel g ein Digit ist hängt vom Messbereich ab. Bei  $\pm 2$  g teilt sich der Wertebereich also auf 4 g auf, also 16384 Werte pro g. Bei  $\pm 4$  g dann 8192 und so weiter.**

Da der Sensor den Absolutwert der Kraft misst, haben Sie auch die Gravitation auf dem Sensor, auf welchen Achsen und mit welchem Vorzeichen hängt von der Orientierung des Sensors ab.

Der Nullpunkt bleibt immer gleich, die Gravitation (hoffentlich) auch, der Wert den die Gravitation erzeugt, hängt aber vom Messbereich ab und halt von der Orientierung des Sensors. Wenn alle drei Achsen bei ca. 32768 sind, befindet sich der Sensor im freien Fall.

Mit freundlichen Grüßen  
Guido Körber

---

Von: "Support" <support@codemercs.com>  
An: "Christoph Mathes" <mathesch77436@th-nuernberg.de>  
Gesendet: Montag, 1. November 2021 13:02:00 GMT +01:00 Amsterdam/Berlin/Bern/Rom/Stockholm/Wien  
Betreff: Re: JoyWarrior56FR1

Hallo Herr Mathes,

zu 1.

Der Sensor startet immer nach einem Reset im normalen Modus. Der High-speed Modus muss immer eingeschaltet werden.

Der High-speed Modus ist im node-red nicht implementiert, weil es beim Raspi ein Problem mit den Kernel-Treibern gibt, den wir bisher nicht lösen konnten. Er kann aber eingeschaltet und genutzt werden. Allerdings wird die SD-Karte stark belastet und gerät schnell an das Speicherlimit, da die Log-Dateien durch den Kernel-Fehler zugeschüttet werden. Darum haben wir zum High-speed Modus keine Beispiele für den Raspi. Es gibt eine Möglichkeit die betroffenen Logs abzuschalten um dies zu verhindern.

zu 2.



Wenn der High-speed Modus aktiv ist wird der "normale" HID-Modus deaktiviert. Die Daten werden dann auf zwei anderen Interfaces ausgegeben. Die Daten zu High-speed Modus werden in zwei separaten Pfaden ausgegeben.

Der JW56FR1 erstellt drei Einträge unter /dev

/dev/hidraw0 -> Normale Interface

/dev/hidraw1 -> High-speed Acc

/dev/hidraw2 -> High-speed Gyro

zu 3.

Das Datenformat für den normalen Modus:

2 Byte Acc-X

2 Byte Acc-Y

2 Byte Acc-Z

2 Byte Gyro-X

2 Byte Gyro-Y

2 Byte Gyro-Z

1 Byte Buttons

zu 4.

Das ist an sich simpel:

```
x = ( buffer[0] | (buffer[1] << 8) )
```

```
y = ( buffer[2] | (buffer[3] << 8) )
```

usw...

Mit freundlichen Grüßen

Christoph Jung

---

Von: "Support" <support@codemercs.com>

An: "Christoph Mathes" <mathesch77436@th-nuernberg.de>

Gesendet: Donnerstag, 9. Dezember 2021 10:03:03 GMT +01:00 Amsterdam/Berlin/Bern/Rom/Stockholm/Wien

Betreff: Re: JoyWarrior56FR1

Hallo Herr Mathes,

leider nutze ich Python nur sehr sehr selten und daher bin ich da nicht so fit drin. Die JW56FR1 haben eine Seriennummer, die ausgelesen werden kann, das stimmt. Dieser Code lief bei mir (unter Windows 10 mit Python 2.7) und gab mir für meinen JW56FR1 die Seriennummer zurück.

```
import usb
```

```
dev = usb.core.find(idVendor=0x07C0, idProduct=0x111A)
if dev is None:
    raise ValueError('Device not found')

dev.set_configuration()
print(usb.util.get_string(dev, dev.iSerialNumber))
```

Mit freundlichen Grüßen  
Christoph Jung

### **Anhang 3: E-Mail Korrespondenz mit dem Datenschutzbeauftragten der TH**

Von: Kulke, Lars  
Gesendet: Freitag, 21. Mai 2021 10:09  
An: Best, Berthold <berthold.best@th-nuernberg.de>  
Betreff: AW: Datenschutzrechtliche Bedenken bei Straßenzustandserfassung?

Hallo Herr Prof. Best,

leider ist dieses Thema durchaus komplex. Kurzfristig darf ich Ihnen aber gerne mitteilen, dass Datenverarbeitungen zu Forschungszwecken grds. privilegiert sind (Vgl. Art. 89 DSGVO; Art. 25 BayDSG), so dass Daten auch ohne Einwilligung und Informationspflicht (vgl. Art. 14 Abs. 5b) DSGVO) verarbeitet werden können, wenn u.a. die Erteilung der Information über die Datenverarbeitung unmöglich oder nur mit unverhältnismäßigem Aufwand möglich wäre und die Forschung im öffentliche Interesse liegt. Insoweit wäre dies zu dokumentieren sowie entsprechende Aufzeichnungen zwecks Einhaltung der datenschutzrechtlichen Pflichten anzufertigen.

Ggf könnte dies jedoch umgangen werden, wenn die Kameras so eingestellt werden könnten (z.B. mittels einem Filter), dass weder die KFZ-Kennzeichen noch die Personen konkret erkennbar sind.

Ich hoffe, dass dies eine praktische Lösung wäre, ansonsten können wir uns nach Pfingsten gerne hierzu nochmals unterhalten und ggf. entsprechende Dokumente analysieren, die anzufertigen wären.

Viele Grüße

Lars Kulke

### **Anhang 4: Makro 1**

Sub Makro1()

'In diesem Makro werden die Daten eingelesen, aufbereitet und nach cts sortiert.

'Beschleunigungsdatei auswählen und in das erste Arbeitsblatt „Tabelle1“ einlesen  
MsgBox "Bitte wählen Sie die CSV-Datei mit den Beschleunigungsdaten aus!"

Dim PfadName As Variant, sName As String

```

PfadName = "TEXT;" & Application.GetOpenFilename("CSV-Datei (*.csv),*.csv")
If PfadName = False Then Exit Sub
sName = Right(PfadName, Len(PfadName) - InStrRev(PfadName, "\"))
sName = Left(sName, Len(sName) - 4)
Range("A19:V30000").ClearContents
With ActiveSheet.QueryTables.Add(Connection:=PfadName, Destination:=Range("$A$1"))
    .Name = ACC
    .FieldNames = True
    .RowNumbers = False
    .FillAdjacentFormulas = False
    .PreserveFormatting = True
    .RefreshOnFileOpen = False
    .BackgroundQuery = True
    .RefreshStyle = xlInsertDeleteCells
    .SavePassword = False
    .SaveData = True
    .AdjustColumnWidth = True
    .RefreshPeriod = 0
    ' .PreserveColumnInfo = True
    ' .ListObject.DisplayName = "ACCL"
    .Refresh BackgroundQuery:=False
End With

```

'Der Name des Videos wird in Tabelle1 gespeichert,  
'um ihn im weiteren Verlauf für die Benennung der Dateien verwenden zu können

```

Dim Video As String
Video = Left(sName, 8)
Cells(1, 7) = Video

```

'Das zweite Arbeitsblatt "Tabelle2" wird hinzugefügt

```
ActiveWorkbook.Worksheets.Add
```

'GPS-Datei auswählen und in das Arbeitsblatt „Tabelle2“ einlesen

MsgBox "Bitte wählen Sie die CSV-Datei mit den GPS-Daten aus!"

```

Dim PfadName2 As Variant, sName2 As String
PfadName2 = "TEXT;" & Application.GetOpenFilename("CSV-Datei (*.csv),*.csv")
If PfadName2 = False Then Exit Sub
sName2 = Right(PfadName2, Len(PfadName2) - InStrRev(PfadName2, "\"))
sName2 = Left(sName2, Len(sName2) - 4)
Range("A19:V30000").ClearContents
With ActiveSheet.QueryTables.Add(Connection:=PfadName2, Destination:=Range("$A$1"))
    .Name = GPS
    .FieldNames = True
    .RowNumbers = False
    .FillAdjacentFormulas = False
    .PreserveFormatting = True
    .RefreshOnFileOpen = False

```

```

.BackgroundQuery = True
.RefreshStyle = xlInsertDeleteCells
.SavePassword = False
.SaveData = True
.AdjustColumnWidth = True
.RefreshPeriod = 0
' .PreserveColumnInfo = True
' .ListObject.DisplayName = "GPS"
.Refresh BackgroundQuery:=False
End With

```

### 'Beschleunigungsdaten aus Tabelle1 in Query einlesen

```
Sheets("Tabelle1").Select
```

```

ActiveWorkbook.Queries.Add Name:="ACCL", Formula:= _
"let" & Chr(13) & "" & Chr(10) & " Quelle = Excel.CurrentWork-
book()[{Name=""Tabelle1!ExterneDaten_1""}][Content]," & Chr(13) & "" & Chr(10)
& " #""Spalte nach Trennzeichen teilen"" = Table.SplitColumn(Quelle, ""Column1"",
Splitter.SplitTextByDelimiter("","", QuoteStyle.Csv), {""Column1.1"", ""Column1.2"",
""Column1.3"", ""Column1.4"", ""Column1.5"", ""Column1.6""})," & Chr(13) & "" &
Chr(10) & " #""Höher gestufte Header"" = Table.PromoteHea" & _
ders(#""Spalte nach Trennzeichen teilen"", [PromoteAllScalars=true])," &
Chr(13) & "" & Chr(10) & " #""Ersetzter Wert"" = Table.ReplaceValue(#""Höher ge-
stufte Header"", ""Z"", "", Replacer.ReplaceText, {""date""})," & Chr(13) & "" &
Chr(10) & " #""Ersetzter Wert1"" = Table.ReplaceValue(#""Ersetzter
Wert"", ""T"", "", Replacer.ReplaceText, {""date""})," & Chr(13) & "" & Chr(10) & "
#""Spalte nach Trennzeichen teilen1"" = Table.SplitColumn(#""E" & _
rsetzter Wert1"", ""date"", Splitter.SplitTextByDelimiter("","", QuoteStyle.Csv),
{""date.1"", ""date.2""})," & Chr(13) & "" & Chr(10) & " #""Ersetzter Wert2"" = Ta-
ble.ReplaceValue(#""Spalte nach Trennzeichen teilen1"", "":""", ""-
"", Replacer.ReplaceText, {""date.2""})," & Chr(13) & "" & Chr(10) & " #""Ersetzter
Wert3"" = Table.ReplaceValue(#""Ersetzter Wert2"", "".""", ""-
"", Replacer.Repla-
ceText, {""cts"", ""date.2"", ""A" & _
ccelerometer [m/s2]"", ""1"", ""2"", ""temperature [Â°C]""})," & Chr(13) & "" &
Chr(10) & " #""Geänderter Typ"" = Table.TransformColumnTypes(#""Ersetzter
Wert3"", {{""cts"", type number}, {""Accelerometer [m/s2]"", type number}, {""1"",
type number}, {""2"", type number}, {""temperature [Â°C]"", type number}})," &
Chr(13) & "" & Chr(10) & " #""Umbenannte Spalten"" = Table.RenameCol-
umns(#""Geänderter Typ"", {{""date.1" & _
"", ""Date""}, {""date.2"", ""Time""}, {""Accelerometer [m/s2]"", ""Accelerome-
ter z [m/s2]""}, {""1"", ""Accelerometer x [m/s2]""}, {""2"", ""Accelerometer y
[m/s2]""}, {""temperature [Â°C]"", ""Temperature [°C]""}})" & Chr(13) & "" &
Chr(10) & "in" & Chr(13) & "" & Chr(10) & " #""Umbenannte Spalten""
ActiveWorkbook.Worksheets.Add
With ActiveSheet.ListObjects.Add(SourceType:=0, Source:= _
"OLEDB;Provider=Microsoft.Mashup.OleDb.1;Data Source=$Workbook$;Loca-
tion=ACCL;Extended Properties="""" _
, Destination:=Range("$A$1")).QueryTable
.CommandType = xlCmdSql
.CommandText = Array("SELECT * FROM [ACCL]")
.RowNumbers = False

```

```

.FillAdjacentFormulas = False
.PreserveFormatting = True
.RefreshOnFileOpen = False
.BackgroundQuery = True
.RefreshStyle = xlInsertDeleteCells
.SavePassword = False
.SaveData = True
.AdjustColumnWidth = True
.RefreshPeriod = 0
.PreserveColumnInfo = True
.ListObject.DisplayName = "ACCL"
.Refresh BackgroundQuery:=False
End With
ActiveSheet.ListObjects("ACCL").TableStyle = "TableStyleMedium4"
ActiveSheet.ListObjects("ACCL").ShowAutoFilterDropDown = False
ActiveSheet.ListObjects("ACCL").ShowTableStyleRowStripes = False

```

### 'GPS-Daten aus Tabelle2 in Query einlesen

```

Sheets("Tabelle2").Select
ActiveWorkbook.Queries.Add Name:="GPS", Formula:= _
    "let" & Chr(13) & "" & Chr(10) & "    Quelle = Excel.CurrentWork-
book() {[Name=""Tabelle2!ExterneDaten_1""][Content], " & Chr(13) & "" & Chr(10)
& "    #""Spalte nach Trennzeichen teilen"" = Table.SplitColumn(Quelle, ""Column1"",
Splitter.SplitTextByDelimiter("", "", QuoteStyle.Csv), {""Column1.1"", ""Column1.2"",
""Column1.3"", ""Column1.4"", ""Column1.5"", ""Column1.6"", ""Column1.7"",
""Column1.8"", ""Column1.9"", ""Column" & _
    "n1.10""})," & Chr(13) & "" & Chr(10) & "    #""Höher gestufte Header"" = Ta-
ble.PromoteHeaders(#""Spalte nach Trennzeichen teilen"", [PromoteAllScalars=true]),"
& Chr(13) & "" & Chr(10) & "    #""Ersetzter Wert"" = Table.ReplaceValue(#""Höher
gestufte Header"", ""Z"", "", Replacer.ReplaceText, {""date""})," & Chr(13) & "" &
Chr(10) & "    #""Ersetzter Wert1"" = Table.ReplaceValue(#""Ersetzter
Wert"", ""T"", "", Replacer.ReplaceText, {""date""})," & Chr(13) & "" & Chr(10) & "
#" & _
    ""Spalte nach Trennzeichen teilen1"" = Table.SplitColumn(#""Ersetzter Wert1"",
""date"", Splitter.SplitTextByDelimiter("", "", QuoteStyle.Csv), {""date.1"",
""date.2""})," & Chr(13) & "" & Chr(10) & "    #""Ersetzter Wert2"" = Table.Replace-
Value(#""Spalte nach Trennzeichen teilen1"", "", "",
"", Replacer.ReplaceText, {""date.2""})," & Chr(13) & "" & Chr(10) & "    #""Ersetzter
Wert3"" = Table.ReplaceValue(#""Ersetzter Wert2" & _
    "", "", "", Replacer.ReplaceText, {""cts"", ""date.2"", ""GPS (Lat.) [deg]"",
""GPS (Long.) [deg]"", ""GPS (Alt.) [m]"", ""GPS (2D speed) [m/s]"", ""GPS (3D
speed) [m/s]""})," & Chr(13) & "" & Chr(10) & "    #""Geänderter Typ"" = Ta-
ble.TransformColumnTypes(#""Ersetzter Wert3"", {{""cts"", type number}, {""GPS
(Lat.) [deg]"", type number}, {""GPS (Long.) [deg]"", type number}, {""GPS (Alt.) [m"
& _
    ""]""", type number}, {""GPS (2D speed) [m/s]"", type number}, {""GPS (3D speed)
[m/s]""", type number}, {""fix"", type number}, {""precision"", type number}})," &
Chr(13) & "" & Chr(10) & "    #""Umbenannte Spalten"" = Table.RenameCol-
umns(#""Geänderter Typ"", {{""date.1"", ""Date""}, {""date.2"", ""Time""}})" &

```

```

Chr(13) & "" & Chr(10) & "in" & Chr(13) & "" & Chr(10) & " #""Umbenannte Spalten""
ActiveWorkbook.Worksheets.Add
With ActiveSheet.ListObjects.Add(SourceType:=0, Source:= _
    "OLEDB;Provider=Microsoft.Mashup.OleDb.1;Data Source=$Workbook$;Location=GPS;Extended Properties=""""
    , Destination:=Range("$A$1")).QueryTable
    .CommandType = xlCmdSql
    .CommandText = Array("SELECT * FROM [GPS]")
    .RowNumbers = False
    .FillAdjacentFormulas = False
    .PreserveFormatting = True
    .RefreshOnFileOpen = False
    .BackgroundQuery = True
    .RefreshStyle = xlInsertDeleteCells
    .SavePassword = False
    .SaveData = True
    .AdjustColumnWidth = True
    .RefreshPeriod = 0
    .PreserveColumnInfo = True
    .ListObject.DisplayName = "GPS"
    .Refresh BackgroundQuery:=False
End With
ActiveSheet.ListObjects("GPS").TableStyle = "TableStyleMedium4"
ActiveSheet.ListObjects("GPS").ShowAutoFilterDropDown = False
ActiveSheet.ListObjects("GPS").ShowTableStyleRowStripes = False

```

### 'Beide Tabellen zusammenfügen und nach cts sortieren

```

ActiveWorkbook.Queries.Add Name:="Anfügen1", Formula:= _
    "let" & Chr(13) & "" & Chr(10) & " Quelle = Table.Combine({ACCL, GPS}),"
& Chr(13) & "" & Chr(10) & " #""Sortierte Zeilen"" = Table.Sort(Quelle,{{""cts"",
Order.Ascending}})" & Chr(13) & "" & Chr(10) & "in" & Chr(13) & "" & Chr(10) & "
#""Sortierte Zeilen""
ActiveWorkbook.Worksheets.Add
With ActiveSheet.ListObjects.Add(SourceType:=0, Source:= _
    "OLEDB;Provider=Microsoft.Mashup.OleDb.1;Data Source=$Workbook$;Location=Anfügen1;Extended Properties=""""
    , Destination:=Range("$A$1")).QueryTable
    .CommandType = xlCmdSql
    .CommandText = Array("SELECT * FROM [Anfügen1]")
    .RowNumbers = False
    .FillAdjacentFormulas = False
    .PreserveFormatting = True
    .RefreshOnFileOpen = False
    .BackgroundQuery = True
    .RefreshStyle = xlInsertDeleteCells
    .SavePassword = False
    .SaveData = True
    .AdjustColumnWidth = True
    .RefreshPeriod = 0

```

```
.PreserveColumnInfo = True
.ListObject.DisplayName = "Anfügen1"
.Refresh BackgroundQuery:=False
End With
```

'Einstellungen für die optische Darstellung der Tabelle werden festgelegt

```
ActiveSheet.ListObjects("Anfügen1").TableStyle = "TableStyleMedium4"
ActiveSheet.ListObjects("Anfügen1").ShowAutoFilterDropDown = False
ActiveSheet.ListObjects("Anfügen1").ShowTableStyleRowStripes = False
```

'Tabelle5 wird auf die relevanten Spalten begrenzt

```
Range("G:G,J:J,L:L,M:M,N:N,O:O").Select
Selection.EntireColumn.Hidden = True
End Sub
```

## Anhang 5: Makro2

```
Sub Makro2()
```

'In diesem Makro werden die Daten oben und unten gekappt, dann interpoliert und dann die GPS-Daten gelöscht

```
Dim a, b, c, d, e As Integer
```

'Behandelt den Fall, dass der Beschleunigungsdatensatz und der GPS Datensatz zufällig gleichzeitig erzeugt wurde

```
For d = 2 To Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
```

```
If Cells(d, 8).Value <> "" Then 'bei jedem GPS Datensatz
```

```
    If Cells(d, 1) = Cells(d + 1, 1) Then 'Falls der Beschleunigungsdatensatz unter dem
    GPS Datensatz gleichzeitig aufgenommen wurde
```

```
        For e = 8 To 15
```

```
            Cells(d + 1, e) = Cells(d, e)
```

```
        Next e
```

```
        Rows(d).Delete 'Lösche die Zeile mit dem GPS Datensatz, da dieser bereits zur
        Beschleunigung hinzugefügt wurde
```

```
    End If
```

```
    If Cells(d, 1) = Cells(d - 1, 1) Then 'Falls der Beschleunigungsdatensatz über dem
    GPS Datensatz gleichzeitig aufgenommen wurde
```

```
        For e = 8 To 15
```

```
            Cells(d - 1, e) = Cells(d, e)
```

```
        Next e
```

```
        Rows(d).Delete 'Lösche die Zeile mit dem GPS Datensatz, da dieser bereits zur
        Beschleunigung hinzugefügt wurde
```

```
    End If
```

```
End If
```

```
Next d
```

'Löschen der Beschleunigungswerte vor dem ersten GPS-Wert

```
a = 2
```

```
Do While Cells(a, 8).Value = ""
```

```
Rows(a).Delete
```

```
Loop
```

**'Löschen der Beschleunigungswerte nach dem letzten GPS-Wert**

```

b = Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
Do While Cells(b, 8).Value = ""
Rows(b).Delete
b = b - 1
Loop

```

**'Interpolieren der GPS-Daten**

```

Dim i As Single
Dim j As Single
Dim min1, min2, min3, wert1, wert2, wert3 As Double
DecimalSeperator = ","

For s = 8 To 11
For i = 1 To Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
    If Cells(i, s).Value = "" Then
        min1 = Cells(i - 1, 1)
        wert1 = Cells(i - 1, s)
        min2 = Cells(i, 1)

        j = i
        Do
            j = j + 1
        Loop Until Cells(j, s).Value <> ""

        min3 = Cells(j, 1).Value
        wert3 = Cells(j, s).Value
        wert2 = (wert3 - wert1) / (min3 - min1) * (min2 - min1) + wert1
        Cells(i, s).Value = wert2
    End If
Next i
Next s

```

**'Löscht die Zeilen der GPS-Werte, da keine Beschleunigungswerte**

```

For c = 1 To Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
    If Cells(c, 4).Value = "" Then
        Rows(c).Delete
    End If
Next c
End Sub

```

**Anhang 6: Marko, um zu speichern**

```

Sub Speichern()

```

```

'Speichert die Datei mit den Makros unter „Name des Videos_Datum der Aufnahme_ACC_und_GPS.xlsm“ in den Ordner der Rohdaten und Informiert den Benutzer darüber

```



```
ActiveWorkbook.SaveAs Tabelle1.Cells(1, 7).Text & "_" & ActiveSheet.Range("B2").Text & "_ACC_und_GPS" & ".xlsm"
MsgBox "Die Datei wurde unter " & Tabelle1.Cells(1, 7).Text & "_" & ActiveSheet.Range("B2").Text & "_ACC_und_GPS" & ".xlsm gespeichert.", , "OK"
```

'Speichert die Tabelle5 nur mit den relevanten Spalten zur weiteren Verarbeitung als CSV in UTF-8 Codierung in den gleichen Ordner und informiert den Benutzer darüber

```
Columns("L:O").Delete
Columns("J:J").Delete
Columns("G:G").Delete
```

```
Range("Anfügen1[#All]").Select
Selection.Copy
Sheets.Add After:=ActiveSheet
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
ActiveWorkbook.SaveAs Filename:=_
    Tabelle1.Cells(1, 7).Text & "_" & ActiveSheet.Range("B2").Text &
    "_ACC_und_GPS_CSV" & ".CSV" _
    , FileFormat:=xlCSVUTF8, CreateBackup:=False
```

```
MsgBox "Die Tabelle wurde unter " & Tabelle1.Cells(1, 7).Text & "_" & ActiveSheet.Range("B2").Text & "_ACC_und_GPS_CSV" & ".csv gespeichert.", , "OK"
```

'Die Datei wird ohne nochmaliges Speichern geschlossen → die erzeugten Dateien wurden bereits gespeichert und die Ausgangsdatei wird nicht verändert, sodass diese erneut zum Synchronisieren verwendet werden kann

```
ThisWorkbook.Saved = True
Application.Quit
End Sub
```

### Anhang 7: Makro, um mehrere Makros auszuführen

```
Sub Ausführen()
Call Makro1
Call Makro2
Call Speichern
End Sub
```

### Anhang 8: Makro, um Strecke zu berechnen

```
Sub Strecke()
'Beschriftung der Spalte und optische Darstellung
Range("P1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Strecke [m]"
ActiveSheet.ListObjects("Anfügen1").ShowAutoFilterDropDown = False
```

's=v\*t

'für die erste Zeile, da dort nur diese Zeile gerechnet wird und nichts aufsummiert wird

```
Cells(2, 16).Value = Cells(2, 11).Value * Cells(2, 1).Value / 1000
```

'für die restlichen Zeilen, da dort die Summe aus der aktuellen Zeile g und der darüberliegenden Zeile eingetragen werden muss

```
For g = 3 To Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
Cells(g, 16).Value = Cells(g - 1, 16).Value + Cells(g, 11).Value * (Cells(g, 1).Value -
Cells(g - 1, 1).Value) / 1000
Next g
End Sub
```

## Anhang 9: Code für den Pi

```
#!/usr/bin/env python
import usb.core
import usb.util
import sys
import csv
import os

from datetime import datetime
now = datetime.now()
current_time = now.strftime("%d-%m-%Y_%H-%M-%S")
current_date = now.strftime("%d-%m-%Y")
multiple = False

def device(DeviceName):
    for cfg in DeviceName:
        for intf in cfg:
            if DeviceName.is_kernel_driver_active(intf.bInterfaceNumber):
                try:
                    DeviceName.detach_kernel_driver(intf.bInterfaceNumber)
                except usb.core.USBError as e:
                    sys.exit("Could not detach kernel driver from interface({0}): {1}".format(intf.bInterfaceNumber, str(e)))

if usb.core.find(idVendor=0x07c0, idProduct=0x111A) is None:
    raise ValueError('No sensor found')
else:
    # Test to find how to add multiple devices
    List = usb.core.find(find_all=True, idVendor=0x07c0, idProduct=0x111A)
    count = 0
    while count < 2:
        # for item in List:
        if count == 0:
            dev0 = next(List)
            device(dev0)
            dev0.set_configuration()
            count += 1
        else:
            try:
```

```

        dev1 = next(List)
        device(dev1)
        dev1.set_configuration()
        count += 1
        multiple = True
        print('2 sensors connected')
    except:
        count = 2

if multiple == False:
    RowNames = ['time', 'X', 'Y', 'Z', 'rX', 'rY', 'rZ', 'Buttons']
elif multiple == True and usb.util.get_string(dev0, dev0.iSerialNumber) == '00000458':
    print('dev0 outside, dev1 inside')
    RowNames = ['time', 'X Outside', 'Y', 'Z', 'rX', 'rY', 'rZ', 'Buttons', 'X Inside', 'Y', 'Z',
'rX', 'rY', 'rZ', 'Buttons']
else:
    print('dev0 inside, dev1 outside')
    RowNames = ['time', 'X Inside', 'Y', 'Z', 'rX', 'rY', 'rZ', 'Buttons', 'X Outside', 'Y', 'Z',
'rX', 'rY', 'rZ', 'Buttons']

def transform(Value, Factor):
    return ((Value - (2 ** 16 / 2)) * Factor) * 9.81

Time = []
Data0 = []
Data1 = []

def write_data(Port, ByteSize, RowNames):
    filename = f'Messdaten/{current_date}/data_{current_time}.csv'
    print(filename)
    os.makedirs(os.path.dirname(filename), exist_ok = True)
    with open(filename, mode='w') as data_file:
        data_writer = csv.writer(data_file, delimiter=',', quotechar='\"', quot-
ing=csv.QUOTE_MINIMAL)
        data_writer.writerow(RowNames)
        try:
            while True:
                Time.append(datetime.now())
                Data0.append(dev0.read(Port, ByteSize, 0))
                if multiple == True:
                    Data1.append(dev1.read(Port, ByteSize, 0))
        except KeyboardInterrupt:
            # stop the loop with ctrl + c
            pass

    print('Starting to process data...')
    j = 0
    while j < len(Data0):
        Output = []
        Output.append(Time[j])

```

```

    # adding data in 16 bit resolution
    if (ByteSize % 2 == 0):
        for i in range(0, ByteSize, 2):
            if i < 5:
                Value = (Data0[j][i] | (Data0[j][i + 1] << 8))
                Output.append(transform(Value, Factor))
            else:
                Output.append(Data0[j][i] | (Data0[j][i + 1] << 8))
        else:
            for i in range(0, ByteSize - 1, 2):
                if i < 5:
                    Value = (Data0[j][i] | (Data0[j][i + 1] << 8))
                    Output.append(transform(Value, Factor))
                else:
                    Output.append(Data0[j][i] | (Data0[j][i + 1] << 8))
            Output.append(Data0[j][ByteSize - 1])
    if multiple == True:
        # adding data in 16 bit resolution
        if (ByteSize % 2 == 0):
            for i in range(0, ByteSize, 2):
                if i < 5:
                    Value1 = (Data1[j][i] | (Data1[j][i + 1] << 8))
                    Output.append(transform(Value1, Factor))
                else:
                    Output.append(Data1[j][i] | (Data1[j][i + 1] << 8))
            else:
                for i in range(0, ByteSize - 1, 2):
                    if i < 5:
                        Value1 = (Data1[j][i] | (Data1[j][i + 1] << 8))
                        Output.append(transform(Value1, Factor))
                    else:
                        Output.append(Data1[j][i] | (Data1[j][i + 1] << 8))
                Output.append(Data1[j][ByteSize - 1])
    data_writer.writerow(Output)
    j += 1
    print('Finished processing data!')

# sets sensor to: 16g; LP1 only at 416,5/3330Hz; Gyroscope at 1000dps with no HP filter
Config = [0x00, 0x01, 0x00, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00]

ConfigValue = [0x00, 0x02, 0x03, 0x01]
CalcValue = [2, 4, 8, 16]
i = 0
while i < len(ConfigValue):
    if Config[1] == ConfigValue[i]:
        Factor = (CalcValue[i] * 2) / 2 ** 16
        print(Factor)
        break
    i += 1

```

```
# change sensor configuration
mode = 'Normal'
if mode == 'Highspeed':
    # activate highspeed mode
    ConfigMode = [0x04, 0x01, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00]

    dev0.write(0x2, Config, 0)
    dev0.write(0x2, ConfigMode, 0)
    if multiple == True:
        dev1.write(0x2, Config, 0)
        dev1.write(0x2, ConfigMode, 0)

    Port = 0x83
    ByteSize = 62
    RowNames = ['time']
    write_data(Port, ByteSize, RowNames)

else:
    # deactivate highspeed mode
    ConfigMode = [0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00]
    dev0.write(0x2, Config, 0)
    dev0.write(0x2, ConfigMode, 0)
    if multiple == True:
        dev1.write(0x2, Config, 0)
        dev1.write(0x2, ConfigMode, 0)

    Port = 0x81
    ByteSize = 13
    write_data(Port, ByteSize, RowNames)
```

**Eidesstattliche Erklärung****Prüfungsrechtliche Erklärung der/des Studierenden**

Angaben des bzw. der Studierenden:

Name: Angerer

Vorname: Helena

Matrikel-Nr.: 3051177

Fakultät: Bauingenieurwesen

Studiengang: Urbane Mobilität

Semester: Wintersemester

21/22

**Titel der Abschlussarbeit:**

Entwicklung von alternativen Methoden zur Straßenzustandserfassung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig verfasst, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, alle benutzten Quellen und Hilfsmittel angegeben sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

---

 Ort, Datum, Unterschrift Studierende/Studierender
**Erklärung zur Veröffentlichung der vorstehend bezeichneten Abschlussarbeit**

Die Entscheidung über die vollständige oder auszugsweise Veröffentlichung der Abschlussarbeit liegt grundsätzlich erst einmal allein in der Zuständigkeit der/des studentischen Verfasserin/Verfassers. Nach dem Urheberrechtsgesetz (UrhG) erwirbt die Verfasserin/der Verfasser einer Abschlussarbeit mit Anfertigung ihrer/seiner Arbeit das alleinige Urheberrecht und grundsätzlich auch die hieraus resultierenden Nutzungsrechte wie z.B. Erstveröffentlichung (§ 12 UrhG), Verbreitung (§ 17 UrhG), Vervielfältigung (§ 16 UrhG), Online-Nutzung usw., also alle Rechte, die die nicht-kommerzielle oder kommerzielle Verwertung betreffen.

Die Hochschule und deren Beschäftigte werden Abschlussarbeiten oder Teile davon nicht ohne Zustimmung der/des studentischen Verfasserin/Verfassers veröffentlichen, insbesondere nicht öffentlich zugänglich in die Bibliothek der Hochschule einstellen.

- Hiermit  genehmige ich, wenn und soweit keine entgegenstehenden Vereinbarungen mit Dritten getroffen worden sind,  
 genehmige ich nicht,

dass die oben genannte Abschlussarbeit durch die Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, ggf. nach Ablauf einer mittels eines auf der Abschlussarbeit aufgetragenen Sperrvermerks kenntlich gemachten Sperrfrist

von            Jahren (0 - 5 Jahren ab Datum der Abgabe der Arbeit),

der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird. Im Falle der Genehmigung erfolgt diese unwiderruflich; hierzu wird der Abschlussarbeit ein Exemplar im digitalisierten PDF-Format auf einem Datenträger beigelegt. Bestimmungen der jeweils geltenden Studien- und Prüfungsordnung über Art und Umfang der im Rahmen der Arbeit abzugebenden Exemplare und Materialien werden hierdurch nicht berührt.

---

 Ort, Datum, Unterschrift Studierende/Studierender

**Datenschutz:** Die Antragstellung ist regelmäßig mit der Speicherung und Verarbeitung der von Ihnen mitgeteilten Daten durch die Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm verbunden. Weitere Informationen zum Umgang der Technischen Hochschule Nürnberg mit Ihren personenbezogenen Daten sind unter nachfolgendem Link abrufbar: <https://www.th-nuernberg.de/datenschutz/>